



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UnICEUB
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

GEOVANA MILHOMEM MOSQUÉRA

CARACTERIZAÇÃO DE GEOTECNICA PARA IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTO
PERMEÁVEL EM ÁREA URBANA – BRASÍLIA DF

BRASÍLIA

2018



GEOVANA MILHOMEM MOSQUÉRA

**CARACTERIZAÇÃO DE GEOTECNICA PARA IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTO
PERMEÁVEL EM ÁREA URBANA – BRASÍLIA DF**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica
apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e
Pesquisa.

Orientação: Dra. Neuza Maria Bezerra Mota

BRASÍLIA

2018

CARACTERIZAÇÃO DE GEOTECNICA PARA IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL EM ÁREA URBANA

Geovana Milhomem Mosquéra – UniCEUB, PIC voluntário em Arquitetura

Geovana.mosquera@sempreceub.com

Dra. Neusa Maria Bezzera Mota – UniCEUB, professor orientador

Neusa.mota@ceub.edu.br

A análise superficial do solo local, por meio de caracterização geotécnica, é a primeira etapa de um projeto de implantação de pavimento permeável, uma vez que, o solo superficial irá absorver os esforços de tráfego de pessoas e ou veículos, e ainda, por ser parte do sistema que deve garantir a adequada infiltração de água ao longo do seu perfil estratigráfico. A utilização de solos locais para a pavimentação permeável é uma alternativa que já se provou eficiente em diferentes estudos como o de Brattebo & Booth (2003) que por seis anos avaliaram a performance de 4 (quatro) estacionamentos com a implantação de pavimento permeável; e como Hotz (2011) que alcançou, após pesquisas, traços adequados de concreto permeável para o uso em pavimentos com tráfego de pedestres e veículos leves. A técnica permite a infiltração da água e evita enchentes, alagamentos, dentre outros. O presente trabalho realiza ensaios geotécnicos para a caracterização do solo superficial do estacionamento do bloco 8, do Centro Universitário de Brasília (UniCeub), localizado na Asa Norte em Brasília/DF, com vista a implementação de pavimentos permeáveis. O solo local apresenta-se coberto por camada de brita, de variados tamanhos, sob aterro compactado, o que exigiu uma separação adequada desse material para alcançar a parcela natural da camada de solo. Com o propósito de estudar o solo no local, foram executados ensaios geotécnicos *in situ* e laboratoriais, por meio de coleta de amostras deformadas em 9 (nove) pontos distintos do estacionamento. Os ensaios realizados *in situ* foram: frasco de areia, infiltração duplo anel, permeabilidade (método de Porchet), DCP (Dynamic Cone penetration test); e os ensaios laboratoriais foram: granulometria, método MCT – Miniatura, Compactado, Tropical – compactação, massa específica real e os limites de liquidez e plasticidade. Após a finalização dos ensaios o solo foi identificado como sendo solo tropical laterítico, classificado

pela metodologia MCT como LA' (solo arenoso laterítico), que é de frequente uso como base de pavimentos. Tais ensaios são essenciais para a obtenção da caracterização e do conhecimento mais detalhado do solo que serão parâmetros importantes para um dimensionamento adequado de um pavimento permeável.

Palavras-Chave: solo, caracterização, pavimento permeável, solo laterítico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo geral	9
2.2 Objetivo específico.....	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 Solos.....	10
3.1.1 Classificação dos Solos.....	12
3.1.2 Solos Lateríticos.....	12
3.2 Caracterização dos Solos.....	14
3.2.1 Análise Granulométrica dos Solos.....	14
3.2.2 Limites de Consistência dos Solos	16
3.3 Pavimentos Permeáveis	18
4 METODOLOGIA	20
4.1 Localização da Amostra do Solo Ensaiado.....	20
4.2 Metodologia de Ensaio.....	22
4.2.1 Preparação da Amostra para Ensaios de Caracterização.....	22
4.2.2 Granulometria	23
4.2.2.1 Peneiramento Grosso	23
4.2.2.2 Sedimentação.....	23
4.2.3 Limites de Atterberg.....	24

4.2.1 Limite de Liquidez.....	24
3.2.2 Limite de Plasticidade.....	24
4.2.4 Massa Específica Real dos Grãos (Gs)	26
4.2.5 MCT	27
5 RESULTADOS E DISCURSSÃO.....	28
5.1 Perfil de sondagens SPT	28
5.2 Ensaio de caracterização	30
5.2.1 Análise Granulométrica	30
5.2.2 Limites de Atterberg	32
5.3 Índices Físicos.....	34
5.4 Classificação dos Solos: SUCS, HBR e MCT.....	34
5.5 Taxa de Infiltração: Infiltração Duplo Anel.....	36
5.6 Permeabilidade: Método de Porchet.....	37
6 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação tem ganhado, ao longo dos anos, uma enorme influência ao redor do mundo, uma vez que, seu principal objetivo é garantir trafegabilidade a qualquer época seja qual for a condição climática, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. Além disso, a construção de pavimento permeável torna-se necessária principalmente porque o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas.

Algumas obras como as de pavimento são conglomerados de materiais que associados as suas propriedades e as suas interações determinam a qualidade do resultado final da construção. Por isso, um bom entendimento desses materiais, como eles são caracterizados, como eles funcional é fundamental para compreender o pavimento e muitos outros aspectos que são amplamente afetados pelo solo utilizado.

A engenharia geotécnica explora exclusivamente a compreensão das características do solo, seu funcionamento mecânico e as características de desempenho do mesmo, consolidando o uso de princípios hidráulicos para lidar com questões relativas a sedimentos e outros depósitos. Uma boa análise é consequência de um bom funcionamento do pavimento.

No Brasil, pesquisas retiradas do site “Governo do Brasil” em 2016 confirmam que, nos últimos 15 anos, a extensão de rodovias pavimentadas no Brasil aumentou 23,2%. No entanto, mesmo o País apresentando menos de 15% de pavimentação no ano de 2015, já é perceptível os impactos ambientais provocados pelo mesmo.

Além de problemas como expansão urbana e perda de terras agrícolas, o asfalto tradicional e pavimentos de concreto também são responsáveis por fazer com que a chuva escorra e distribua poluentes acumulados na superfície para córregos e lagos, aumentando o risco de inundações.

A execução excessiva de asfalto é inclusive responsável pela falta de absorção de água que solos abaixo do pavimento recebem. Assim, aquíferos naturais correm o risco de secar; reduzindo a quantidade de água potável disponível para as pessoas e para a vida selvagem e causando um desequilíbrio no ecossistema.

Em resposta a tais preocupações, estudos têm procurado medidas de prevenção a impactos ambientais como os mencionados acima. Um meio de prevenir tais problemas, é a

construção de pavimentos permeáveis. Tais pavimentos permitem que a água seja absorvida em uma camada de rocha (concreto) e então se mova para o solo ou para um dreno subterrâneo. Ao ter resultados como, a infiltração da maior parte da água no local, a quantidade de água e poluição chegando a córregos e na natureza são bastante reduzidos.

A utilização de solos locais para a pavimentação permeável é uma alternativa que já se provou eficiente em diferentes estudos como o de Brattebo & Booth (2003) que por seis anos avaliaram a performance de 4 (quatro) estacionamentos com a implantação de pavimento permeável; e como Hotz (2011) que alcançou, após pesquisas, traços adequados de concreto permeável para o uso em pavimentos com tráfego de pedestres e veículos leves.

Neste trabalho, o solo analisado é tropical e apresenta particularidades de propriedades e de comportamentos quando comparados aos solos não tropicais. Assim, foi preciso realizar a caracterização física do solo e seu desempenho para uma futura execução de pavimento permeável na área de estudo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa teve como finalidade a caracterização de solo para a implantação de pavimento permeável em área urbana, dentro dos parâmetros técnicos e das normas exigidas para sua execução.

2.2 Objetivo Específico

- Inédita caracterização geotécnica com amostras deformadas recolhidas em 9 (nove) pontos diferentes da área de estudo, e determinação da permeabilidade e infiltração do solo através de ensaios *in situ* em 3 (três) pontos do estacionamento;
- Comparar todos os resultados das amostras e obter um resultado geral equiparando-se com a normas;
- Garantir se o solo estudado é adequado ou não para a implantação de um pavimento permeável no local.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1 SOLOS

Para fins da engenharia civil, estuda-se as propriedades físicas do solo, especialmente aquelas propriedades que afetam sua capacidade de suportar peso, como teor de água, densidade, força, compactação, etc. Os engenheiros estão preocupados com as propriedades mecânicas do mesmo sendo elas: a permeabilidade, a rigidez e a resistência (Pinto, 2006)

O solo consiste de uma interação de partículas sólidas - matéria orgânica e matéria mineral - água (ou outro líquido) e ar. Esta composição fundamental dá origem a propriedades únicas dos solos, e a descrição de seu comportamento mecânico requer alguns dos princípios mais clássicos da mecânica dos solos.

Atualmente, a rotulação de cada solo se dá pela espessura de seus grãos, se há matéria orgânica ou não, pela sua cor, textura, consistência, cheiro composições mineralógicas, histórico local etc. A sua classificação começa com o recolhimento das amostras no campo, no qual, se deve obedecer normas e técnicas de coleta para que não haja contaminação e erros nos materiais.

As análises do solo nesse trabalho são necessárias para presumir se o solo recolhido é adequado para ser base de pavimentos permeáveis que futuramente podem ser executados no estacionamento de estudo. A importância da classificação e da caracterização está nas previsões do seu comportamento geomecânico ligada ao meio ambiente e a engenharia.

3.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

A classificação no geral é obtida com base na avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e de acordo com a mineralogia que o perfil apresenta. É também importante considerar conhecimentos do ecossistema local do solo como clima, vegetação, relevo, estado hídrico e a visão geral da paisagem. Cada classificação e especificação pode depender da área de interesse da engenharia. (Embrapa, 2013)

O que distingue os solos, a princípio, é o tamanho de suas partículas. Os grãos de um solo apresentam diversos tamanhos podendo variar entre aqueles que tem tamanhos consideravelmente grandes a ponto de serem vistos a olho nu como pedregulhos, cascalhos

e areia; e aqueles cujas partículas somente podem ser vistas por microscópio eletrônico como silte e argila.

De acordo com Das (2006), para classificar os solos é muito comum os engenheiros de solos usarem o sistema da AASHTO e SUCS. Ambos são fundamentados em climas temperados, na granulometria e nos limites de consistência.

O sistema de classificação da AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials – também conhecido como Sistema Rodoviário, ou HBR, elaborado em 1929 nos Estados Unidos, tem a finalidade de guiar e de especificar protocolos de testes e diretrizes que são usados em projetos. É de muita aplicação em estradas e aterros pois melhor se adapta nos quesitos de suporte.

A respeito do AASHTO – Sistema Rodoviário – Das (2006) declara:

De acordo com este sistema, o solo é classificado em sete grupos principais: de A-1 a A-7. Os solos classificados sob os grupos A-1, A-2 e A-3 são de materiais granulares dos quais 35% das partículas, ou menos, passam pela peneira Nº 200. Os solos com mais de 35% passando pela peneira Nº 200 são classificados sob os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Esses solos são, na maioria dos casos, silte e materiais do tipo da argila.

Ainda segundo Das (2006), para esse sistema de classificação, usa-se os limites de fração com base na seguinte avaliação; pedregulho com fração entre a peneira de 75 mm e a peneira Nº 10 (2 mm); areia com fração contida entre a peneira Nº 10 (2 mm) e a peneira Nº 200 (0,075 mm); silte e argila com fração que passa na peneira Nº 200.

O sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), proposto por Casagrande em 1942, surgiu de um sistema de classificação voltado para pistas de aeroportos. Neste sistema a classificação do solo é dividida em duas categorias: solos de graduação grossa com mais de 50% desse material retido na peneira #200, sendo constituído principalmente de areia ou pedregulho; e solo de graduação fina tendo mais de 50% do material passante na peneira #200 representando uma maior quantidade de material siltoso e argiloso.

O solo raramente será composto somente de um grão, por isso a classificação se dá pelo tamanho predominante entre os elementos presentes. Neste sistema, o solo é representado por um conjunto de letras como na Tabela 3.1. O primeiro conjunto representa o tipo de solo predominante. No segundo conjunto são características complementares como

a granulometria, com parâmetros mais representativos para a sua classificação em solos grossos, e limites de consistência para solos finos por serem parâmetros mais importantes do que apenas o tamanho das partículas.

Tabela 3.1 – Sistema de Classificação SUCS

1º conjunto de letras			2º conjunto de letras		
Símbolo	Nome	Tradução	Símbolo	Nome	Tradução
G	Gravel	Pedregulho	W	Well Graded	Bem graduado
S	Sand	Areia	P	Poor Graded	Mal graduado
M	Mo	Silte	L	Low Liquid Limit	Baixa plasticidade
C	Clay	Argila	H	High Liquid Limit	Alta plasticidade
O	Organic	Orgânico			

Fonte: (Pinto, 2006)

3.1.2 SOLOS LATERÍTICOS

Solos lateríticos são encontrados em áreas onde há processo de laterização resultante de um intemperismo químico muito comum em ambientes quentes e úmidos. Esses solos têm origem em regiões tropicais e subtropicais podendo ser encontrados em quase toda extensão brasileira.

É um solo de aparência notável com pigmentos de origem do vermelho, do amarelo, do marrom e do laranja devido a oxidação. Tal processo de oxidação é resultado do aumento de óxidos hidratados de ferro e alumínio no solo.

Os solos lateríticos em sua consistência natural e não saturada podem apresentar uma eficiência baixa para suporte, devido ao alto índice de vazios. No entanto, quando submetido ao processo de compactação, os vazios são reduzidos aumentando a rigidez e resistência de forma considerável. Segundo Pinto (2006), depois da compactação, o solo laterítico apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água.

Os solos lateríticos quando na umidade ótima mostram excelentes resultados. De Mio (2005) reconhece que o solo quando bem desenvolvido, exibe pequena diferenciação de horizontes, elevada porosidade e permeabilidade, e alta variação granulométrica.

Para meios econômicos, esses solos são conhecidos pela sua aplicação na base de pavimentos de baixo custo. De acordo com Vilibor et al. (1996), o uso de solos lateríticos em regiões de clima tropical úmido para a construção é mais baixo comparado aos materiais de uso mais tradicional. Ele relata também que a aplicação desse solo em pavimentação tem beneficiado construções pois apresenta: baixa ou nenhuma incidência de ruptura da base, deflexões quase imperceptíveis e entre outros.

Segundo Santos e Parreira (2015), devido as exclusivas características do solo laterítico, os sistemas de classificação mais ordinários não se encaixam para uma classificação completa de tal solo. A resolução mais adequada desse problema seria a criação de um ensaio menos complexo que forneça a previsão de comportamento dele para que sirva de base na execução de um futuro pavimento.

Em um sistema de classificação específico para solos lateríticos deve haver uma correlação com as características dos solos habituais, pois desta maneira engenheiros e técnicos conseguem fazer comparações e prever o desempenho do solo na obra.

Nogami & Villibor (1994 & 1996) designaram um ensaio expedito para classificar os solos tropicais: o MCT (Miniatura Compactado Tropical). Tal método permite a classificação do solo, através do comportamento de pastilhas modeladas em anéis de aço inox de 20 mm de diâmetro interno e 5 mm de altura. Santos e Parreira (2015), enfatizam que o ensaio de MCT é muito utilizado para identificar o comportamento dos solos lateríticos e é um recurso útil para a área de pavimentação.

Machado et al. (2016) estudaram o comparativo entre a classificação MCT e os sistemas usuais de classificações geotécnicas em solos Brasileiros. Em sua pesquisa afirmam que devido ao fato do método de classificação MCT ser mais complexo do que os demais seria interessante comparar as três técnicas de classificação. No entanto, os resultados não coincidiram com o MCT. Logo, os três ensaios são importantes para uma análise mais detalhada, porém, HBR e USCS são métodos mais específicos para climas temperados, já o MCT para climas tropicais.

3.2 CARATERIZAÇÃO DOS SOLOS

A granulometria do solo é o estudo da distribuição de partículas por tamanho que está ligada ao percentual de ocorrência de cada grão constituinte do solo. A análise granulométrica é o processo de separação do tamanho e a quantidade de cada grão distinto em massa; sua divisão vai desde pedregulho à argila, grãos que podem ser distintos por meio da visão e do tato e do olfato.

3.2.1 ANÁLISE GRANULOMETRICA DOS SOLOS

A análise granulométrica é fundamental para a classificação e caracterização do solo, uma vez que, é responsável por dimensionar a distribuição do tamanho das partículas em sua fase sólida e suas devidas porcentagens.

Segundo Pinto (2006), para uma previa distinção tátil-visual dos grãos de um solo, é necessário que ele se encontre bastante úmido. As propriedades do solo quando completamente saturados capacita identifica-los pois solos mais finos, como a argila, quando em contato com a água tendem a formar uma pasta fina, enquanto solos mais grossos são reconhecidos facilmente pelo toque de seus grãos maiores.

Uma vez que os solos não são compostos apenas por um só tamanho de grão, há ensaios específicos para o processo de separação da massa em frações (tamanhos) que normalmente seguem o padrão de limites da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – como visto na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Limites definidos pela Norma da ABNT

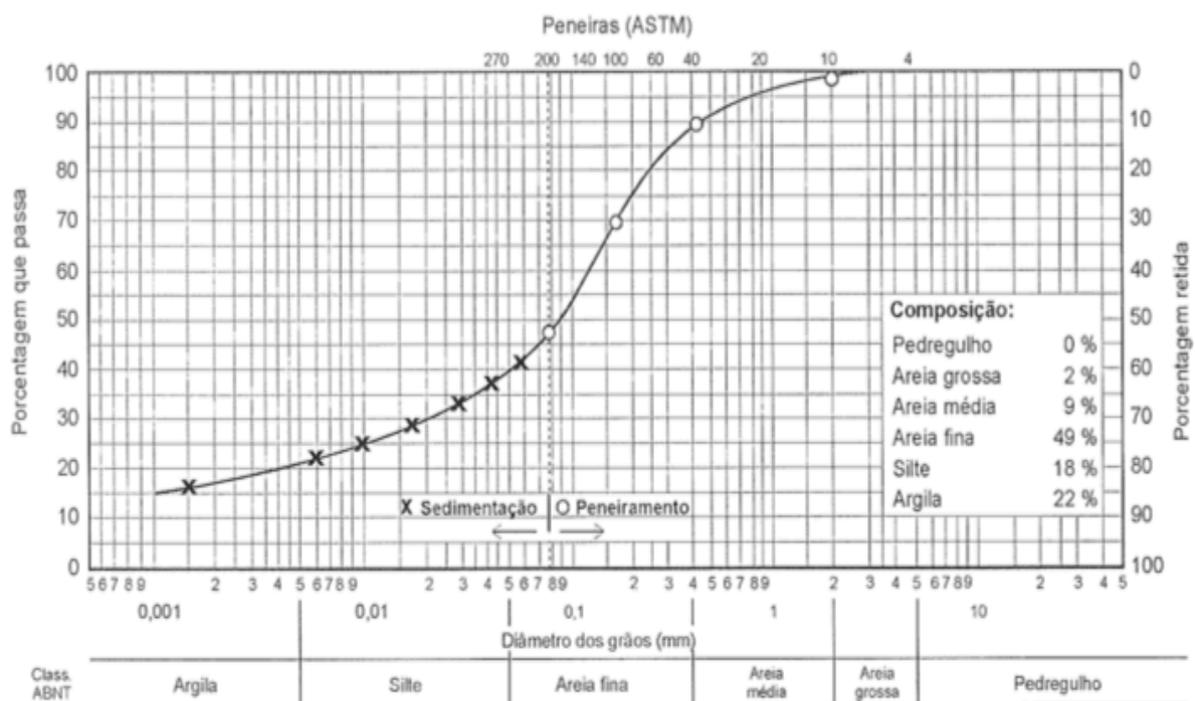
Fração	Limites definidos pela Norma da ABNT
Matacão	de 25 cm a 1 m
Pedra	de 7,6 cm a 25 cm
Pedregulho	de 4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	de 2,0 mm a 4,8 mm
Areia média	de 0,42 mm a 2,0 mm
Areia fina	de 0,05 mm a 0,42 mm
Silte	de 0,005 mm a 0,05 mm
Argila	inferior a 0,005 mm

Fonte: (Pinto, 2006)

Um solo bem graduado tem partículas de variados tamanhos o que resulta na diminuição de vazios devido ao fato deles serem ocupados proporcionalmente. Este tipo de graduação produz qualidades mecânicas como a resistência. Um solo mal graduado é mais uniforme, contendo maior quantidade de grãos de mesmo tamanho.

Para a determinação da análise granulométrica, usa-se a norma NBR 7181/84 que determina as frações através de duas etapas: o peneiramento que é utilizado para a fração grossa do solo, e a sedimentação que estuda os solos mais finos. Esse ensaio granulométrico, tem como propósito obter a curva de distribuição granulométrica de um solo – como o Gráfico 3.1 demonstra – no qual, relaciona-se o diâmetro dos grãos do solo analisado, e porcentagem passante nas peneiras.

Gráfico 3.1 – Curva de distribuição granulométrica do solo



Fonte: (Pinto, 2006)

Para o ensaio de peneiramento há um limite de diâmetro das peneiras, em que, a menor peneira utilizada é a de nº 200 com abertura de 0,075 mm. Na análise de solos mais finos – passantes na peneira de nº 200 – é utilizada a sedimentação, que tem como base a Lei de Stokes. Esta lei expressa as velocidades em que as pequenas partículas esféricas

mergulham no fluido, no qual, depende do peso específico do solo, do peso específico do fluido, da viscosidade do fluido e do diâmetro da esfera.

Ao entendimento de Oliveira et al. (2016), a realização de alguns ensaios pelo método convencional da análise granulométrica teoricamente deveria apresentar limitações. Nos ensaios tradicionais, consideram-se que os elementos contidos no solo apresentam densidade real similar, em que as partículas de grão são divididas por frações como se não houvesse uma interação entre eles durante a fase da sedimentação. No entanto, ao compararem os resultados pelo método convencional e por um método mais moderno como o granulômetro a laser, concluíram que há similaridade entre os resultados de ambos.

3.2.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLOS

Para uma caracterização mais detalhada do solo, é necessário mais do que a distribuição granulométrica. O solo pode existir em qualquer um dos vários estados encontrados na natureza, mas isto, depende diretamente da quantidade de água contida em seu sistema. Dependendo do teor da água, os solos mostram diferentes pontos de estabilidade no qual variam de sólido, semi-sólido, plástico e líquido.

Segundo Pinto (2006), a argila se transforma muito quando na presença da água comparada com outros solos, e isto é devido a sua estrutura mineralógica e ao seus cátions adsorvidos. Conforme as características dos minerais presentes na argila, o comportamento do solo é diferente. Por isso, buscou-se uma maneira mais funcional de reconhecer o efeito das partículas de argila no solo. Com uma análise indireta, tal reconhecimento é tido pelo comportamento do solo na presença de água.

Assim, para compreender o funcionamento dos grãos são necessárias doses específicas de água que variam para cada tipo de solo. Em busca de como alcançar a consistência de cada estado, Albert Atterberg desenvolveu métodos e um sistema de classificação. Seu método baseou-se na determinação do teor de água em transições distintas entre diferentes estados de consistência. Cada transição foi nomeada como: limite de contração, limite de plasticidade e limite de liquidez. Mais tarde, o professor de Mecânica dos Solos, Arthur Casagrande, adaptou e normalizou os ensaios de consistência do solo.

Para ensaios de caracterização do solo, o limite de plasticidade (LP) e o limite de liquidez (LL) são os mais utilizados. Deles se encontra o índice de plasticidade, que é a diferença entre os dois limites.

A plasticidade é a propriedade em que o solo pode ser submetido a altas deformações sem sofrer ruptura ou fissuramento. Usa-se um padrão de método, em conformidade com a NBR 7180/2016, para a determinação do limite de plasticidade. Para determinar o tal limite, é necessário o valor da umidade no qual esse solo passa do estado plástico para o semi-sólido, isto é, menor teor de umidade em que o solo se comporta plasticamente.

O ensaio de Casagrande define o limite de liquidez de uma amostra de solo. O limite de liquidez delimita fronteira entre o estado líquido e o estado plástico. Experimentalmente corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sobre o impacto de 25 golpes pelo aparelho de Casagrande padronizado pela ABNT seguindo o método NBR 6459/2016.

A plasticidade é uma propriedade marcante dos solos lateríticos. O que praticamente a determina é o teor de fração fina, composição química e mineralogia. Independente de ser um solo tropical ou temperado, os limites de Atterberg aumentam com a presença de argila no solo. No entanto, esses limites podem se alterar por causa da presença de agregações de oxi-hidróxidos presentes nos solos tropicais que diminuem a plasticidade do mesmo.

Em afirmação, Cardoso (2002) realizou um estudo dos solos do Distrito Federal, e analisou que a remoção dos oxi-hidróxidos de ferro das argilas diminuiu a plasticidade do solo laterítico. Sua pesquisa teve base nas demonstrações dos autores Hendershort & Carson (1978), no qual, determinam os limites de consistência em amostras naturais e amostras tratadas com extratores de oxi-hidróxidos; ao comparar os resultados confirmam que as presenças desses elementos são favoráveis para uma boa plasticidade do solo.

O fato dos solos lateríticos terem sais de ferro ou alumínio em sua composição os torna diferente dos demais solos utilizados como parâmetro desses ensaios. O processo de secagem, para o uso da amostra antes dos ensaios de limites, é feito ao ar livre e depois destorroada e amassada com o uso de uma espátula durante a incorporação da água. Como consequência, esses procedimentos podem alterar a estrutura original do solo. (Pinto, 2006).

Cardoso (2002) complementa afirmando que solos lateríticos quando submetidos à desidratação se tornam menos plásticos apresentando valores dos limites de Atterberg

menores devido a secagem dos hidróxidos que eram responsáveis pelas ligações mais forte entre as partículas. Esse processo não pode ser revertido.

3.3 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

A crescente urbanização nas cidades conduz o aumento de escoamentos que resulta no fluxo de poluentes. Esses acúmulos reduzem as águas dos aquíferos, contribuindo para o aumento do escoamento superficial, que conseqüentemente, acarreta em poluição por sedimentos, enchentes, riscos à saúde pública, altos custos para correção dos problemas gerados etc.

Os grandes fluxos de águas pluviais nos pavimentos somados ao aumento da velocidade de escoamento nos pontos de lançamento tornam inevitáveis o surgimento de erosões superficiais (Carvalho et al., 2012). Soluções viáveis para este problema estão relacionadas á técnicas de infiltrações.

É necessário a infiltração de um pavimento bem projetado, uma vez que, evita que a água da chuva, através do revestimento, afete a capacidade de carga das camadas de base, sub-base e subleito. (Carvalho et al., 2012).

Isto está relacionado com o experimento que ocorreu ao leste da Carolina do Norte nos Estados Unidos. De acordo Bean et. al (2007), de fato, os pavimentos permeáveis são efetivos na redução de escoamentos associados a poluentes. O local de experimento infiltrou todas as chuvas que ocorreram no local durante o monitoramento. Segundo os pesquisadores, isto é consequência de três motivos: o pavimento esta situado sobre solos arenosos, há um grande armazenamento do mesmo, e a superfície livre se encontra sem finos.

Solos com perfil de intemperismo em regiões tropicais são químico e mineralogicamente mais estáveis e apresentam maior permeabilidade. No entanto, devido a elevada porosidade, os solos são estruturalmente mais instáveis e mais suscetíveis de apresentar problemas como erosão interna e colapso estrutural quando ocorre infiltração concentrada em maior escala.

Para a execução de pavimentos permeáveis é necessário que o solo seja composto por um índice de vazios alto. O índice de vazios é definido como a relação entre o volume de

vazios e o volume de partículas sólidas existente numa massa de solo. Segundo a Tabela 3.3 pode-se avaliar o índice de vazios em solos lateríticos analisado por diferentes autores.

Tabela 3.3 - Índice de vazios em solos lateríticos

Índice de Vazios	Referência
0,25 – 1,50	Vargas (1953)
0,3 – 2,15	Sandroni (1985)
0,95 – 2,21	Guori (1986)
0,48 – 2,10	Zongyuan (1986)
0,82 – 2,21	Dias & Gehling (1986)

Fonte: (Cardoso, 2002)

Segundo Villibor & Nogami (2009) os solos lateríticos apresentam pequena perda do valor de suporte, com a imersão e com a supressão da sobrecarga, enquanto solos não lateríticos apresentam grande perda. Porém, todo pavimento quando for executado deve seguir as normas vigentes, para que assim continue tendo sua função de resistir aos esforços nele solicitados e ainda permitindo a infiltração de água (Nigri, 2017)

A porosidade para pavimentos permeáveis é importante para garantir uma drenagem adequada da água. Essa propriedade é definida sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total de uma massa de solo, e expresso em porcentagem. Devido as particularidades dos solos lateríticos, eles têm sido considerados como “porosos” pela sua aparência macroscópica, o que justifica a sua baixa massa específica aparente e elevada permeabilidade (Holtz, 2011).

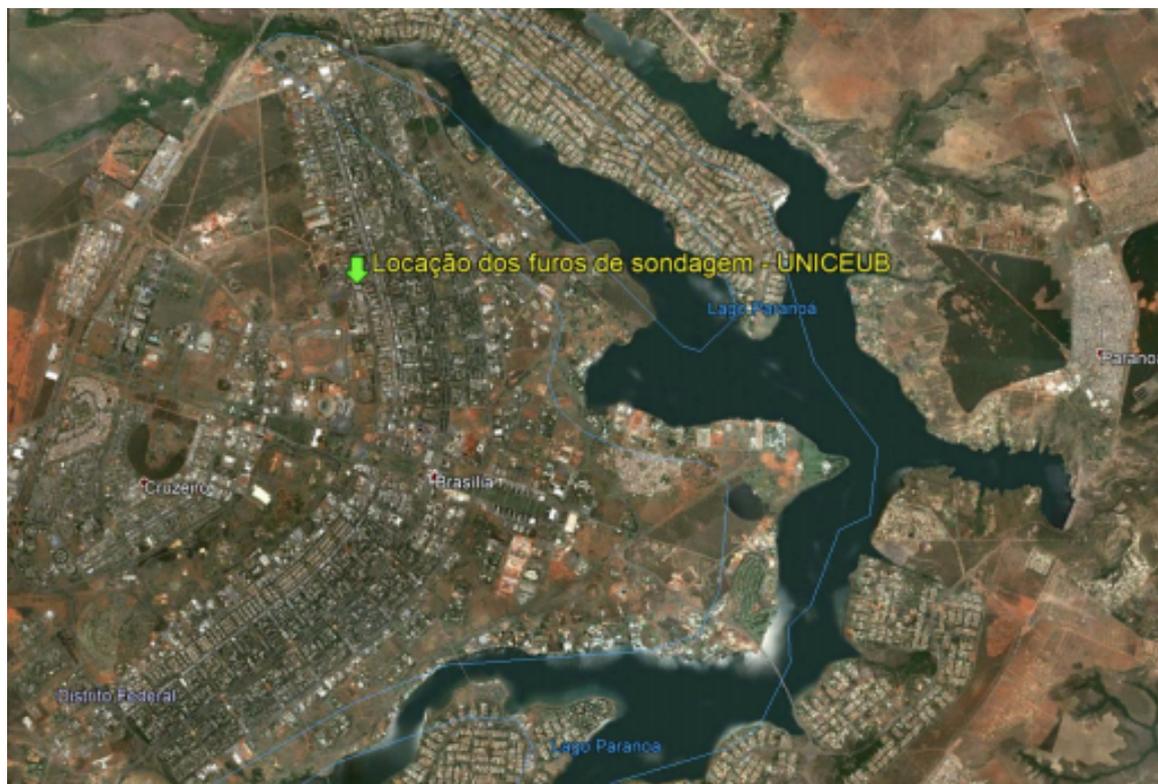
4. METODOLOGIA

Os solos analisados foram retirados de 9 pontos diferentes do local escolhido, e passaram por uma série de ensaios e análises da perspectiva química, física e mineralógica. Posteriormente aos ensaios, foi possível a compreensão e a analogia entre cada uma das propriedades para análises mais detalhadas.

4.1 LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRA DO SOLO ENSAIADO

No presente trabalho foi realizado ensaios geotécnicos para a caracterização do solo superficial do estacionamento do Bloco 8, do Centro Universitário de Brasília (UniCeub), localizado na Asa Norte em Brasília/DF, com vista a implementação de pavimentos permeáveis. As figuras 4.1 e 4.2 mostram detalhadamente a localização do local.

Figura 4.1 – Vista macro do local de ensaio



Fonte: Google Earth (modificado)

Figura 4.2 – Vista superior do local de ensaio



Fonte: Google Earth (modificado)

O solo local apresentava-se coberto por uma camada de brita, de variados tamanhos, sob aterro compactado, o que exigiu uma separação adequada desse material para alcançar a parcela natural da camada de solo. Logo, com o propósito de estudar o solo no local, foram executados ensaios geotécnicos *in situ* e laboratoriais.

Os ensaios elaborados *in situ* foram: sondagem SPT (NBR 6484/1986), realizado em 04 (quatro) pontos do estacionamento, em 2017; e devido a uniformidade do solo ao longo da região de estudo, os demais ensaios em campo foram elaborados em 2018 com apenas 03 (três) pontos ao longo do estacionamento, sendo eles: Frasco de areia (DNER-ME 092/1994); infiltração duplo anel (MINVU/1996); e permeabilidade - método de Porchet (MINVU/1996); Por fim, a coleta de amostra deformada (NBR 9604/1986) que foi realizada nos 9 (nove) pontos para os ensaios laboratoriais.

As amostras deformadas para serem usadas nos ensaios de laboratório foram guardadas parte em sacos de lona e outra parte em sacos plásticos lacrados para manter a umidade natural. Após a coleta das amostras em campo, as mesmas foram encaminhadas ao laboratório de mecânica dos solos do UniCeub.

4.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS

4.2.1 Preparação da Amostra para Ensaio de Caracterização

A secagem das amostras foram ao ar, até próximo da umidade higroscópica, em um terreno localizado em Brasilândia. Foram colocadas em uma lona de plástico aberta durante a manhã e fechados pela noite para não haver contato com a umidade. Após a secagem foram levados para o laboratório para serem usados nos ensaios de caracterização. O material que retornou ao laboratório, mas que não foi utilizado, ficou na estufa para manter suas condições.

Foi utilizado a NBR 6457/2016 para a preparação da amostra dos ensaios de caracterização, sendo eles: análise granulométrica, determinação dos limites de consistência e ensaio de GS. Após a secagem natural, de acordo com a norma, foi separado 1,5 kg de amostra devido a dimensão dos grãos maiores serem menores que 5 mm; a mesma foi destorroada com o auxílio do almofariz (Figura 4.3), evitando-se a quebra de grãos, e passado na peneira de nº 10 (abertura 2 mm). O material retido na peneira, foi colocado na estufa para o peneiramento grosso. O restante do material que passou na peneira nº 10 voltou para a estufa para a realização dos demais ensaios.

Figura 4.3 – Processo de destorroamento e secagem para umidade hidrosfópica respectivamente



4.2.2 Granulometria

Para maiores informações sobre a distribuição do solo nas várias dimensões dos grãos encontradas foi realizado a análise granulométrica. Este ensaio é normalizado pela NBR 7181/84.

4.2.2.1 Peneiramento Grosso

Para o ensaio de peneiramento usou-se as partículas que ficaram retidas na peneira nº 10 (2 mm). O material foi peneirado pelas peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm com o uso do agitador mecânico. Em seguida, a quantidade retida em cada peneira foi pesada com o uso de uma balança com resolução de 0,01 g.

4.2.2.2 Sedimentação

Para a execução do ensaio de sedimentação obteve-se para cada solo recolhido duas amostras de 70 g com o material passante na peneira nº 10 (0,075 mm) – quantidade determinada pela NBR 6457/2016 para solos argilosos. As amostras ficaram em repouso por cerca de 12 horas onde metade estava saturada com 125 ml de água e o restante com 125 ml de defloculante. O procedimento com e sem defloculante é o mesmo.

Após o repouso, o material foi transferido da cápsula para o dispersor com auxílio de uma bisnaga contendo água destilada. Adicionou-se água até que o nível no dispersor ficasse com 5 cm. O aparelho foi ligado por 15 minutos e depois a dispersão foi transferida para uma proveta de 1000 ml, no qual, foi completado o volume com água destilada. Em seguida o solo foi agitado na proveta por 1 minuto e então começou a contagem de tempo e leituras com o densímetro e após a terceira leitura com o termômetro também. Para a leitura da temperatura e da densidade foi preciso mergulhar os aparelhos devagar para não afetar os resultados.

Posteriormente as leituras subsequentes de 4, 8, 15 e 30 minutos e 1, 2, 4, 8 e 24 horas, o material foi lavado com água dentro da peneira de nº 200 para a remoção da argila. A parte retida foi colocada na estufa para secar. No dia seguinte, com o material seco foi realizado o peneiramento com as peneiras de 1, 2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15, e 0,075 mm com o

auxílio de um agitador mecânico durante 10 minutos. Em seguida, a quantidade retida em cada peneira foi pesada com o uso de uma balança com resolução de 0,01 g.

4.2.3 Limites de Atterberg

Os ensaios do limite de consistência foram determinados e executados a partir da NBR 6459/2016 para o Limite de consistência, e NBR 7180/2016 para o Limite de Plasticidade.

4.2.3.1 Limite de Liquidez

Para os ensaios do Limite de Liquidez e de Plasticidade foram separadas 300 g de amostra. Neste ensaio foi necessário pegar metade da quantidade de amostra separada dos ensaios de Limite de Consistência.

Com o auxílio de uma espátula e adição de água destilada aos poucos, o solo foi homogeneizado sobre uma placa de vidro (Figura 4.4) por 15 minutos. Para saber se o solo já estava adequado, foi feito uma espécie de rampa de 1 cm de altura e aplicou-se o penetrômetro para ver se ele entrava 1 mm, conforme mostrado na Figura 4.4; caso não entrasse, deveria homogeneizar o solo por mais tempo.

Figura 4.4 - Ensaio do Limite de Liquidez

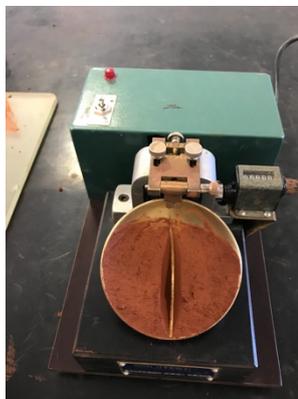


Após a homogeneização da amostra, foi separado uma quantidade de material para a realização do ensaio MCT que ocorreu posteriormente aos limites de consistência.

Com a adequada textura da amostra, a massa do solo foi moldada na concha do aparelho Casagrande eletrônico (Figura 4.5), de modo que a parte central tenha espessura de 1 cm. Em seguida, a mesma é riscada com um cinzel específico para solos argilosos formando

uma fenda de 1 cm. Inicialmente o aparelho é ligado até que a fenda feche com 35 golpes. O mesmo desenvolvimento foi repetido até obter cinco pontos ao todo desde 35 golpes a 15 golpes.

Figura 4.5 - Aparelho Casagrande elétrico



Ao final de cada ponto foi coletado material e colocado em cápsulas para determinar a umidade como definido pela NBR 6457/2016.

4.2.3.2 Limite de Plasticidade

Para o ensaio do limite de plasticidade, deve-se fazer o mesmo processo de homogeneização do limite de liquidez com a outra metade do material que havia sido separada. Após obter o solo homogeneizado, foi usado aproximadamente 10 gramas desse material para fazer uma esfera que logo foi transformada em um cilindro com a palma da mão. Os cilindros devem medir 3 mm com cerca de 10 cm de comprimento com o aparecimento de fissuras e trincas. Caso eles fragmentem antes de alcançarem essas medidas, deve fazer o processo de homogeneizar novamente. Após alcançar o objetivo, o material foi colocado em cápsulas pesado e levado para a estufa por 16 horas, no qual, conforme a Figura 4.6, foi pesado novamente depois do aguardo desse tempo.

Figura 4.6 - Amostras do Limite de Plasticidade



4.2.4 Massa Específica Real dos Grãos– G_s

Para o ensaio de Massa Específica Real dos Grãos foram separadas três amostras de solo com 50 gramas cada – quantidade determinada para solos argilosos. Após a separação da amostra foi adicionado água destilada em cada porção (com 1 cm de nível) e deixado de repouso por 12 horas, no mínimo.

Em seguida, as amostras foram colocadas em dispersores distintos com a ajuda de uma bisnaga contendo água destilada e com cuidados para que não ultrapassasse as chicanas inferiores. O dispersor ficou ligado por 15 minutos. Ao finalizar, as amostras foram transferidas para os picnômetros com o auxílio de um funil, no qual, o volume foi preenchido até a metade com água destilada.

Os picnômetros foram deixados no banho maria durante 15 minutos e depois levados para a bomba de vácuo, conforme a Figura 4.7 mostra, no qual permaneceram 15 minutos, mas eram retirados e agitados em intervalos de 5 minutos. Após isso, as amostras foram preenchidas com água destilada até 1 cm abaixo do menisco de cada picnômetro e retornaram para o banho maria por mais 15 minutos.

Com a finalização desses procedimentos, o material foi deixado de repouso por aproximadamente um dia para que esfriasse totalmente chegando à temperatura ambiente. Por fim, foi adicionado água destilada no picnômetro até a marca do menisco, com o auxílio de conta-gotas para que não houvesse quantidades extras; e depois foi pesado e tirada a temperatura do conjunto picnômetro + solo + água.

Para encontrar os resultados do peso específico real dos grãos é determinada em função do peso e temperatura como imposto na fórmula da NBR 6508.

Figura 4.7 – Ensaio da Massa Especifica Real dos Grãos



4.2.5 MCT

Como citado nos ensaios de Limite de Liquidez, o material para a execução do MCT foi separado no processo de homogeneização daquele.

Durante a realização do ensaio, foram tomados 3 anéis de aço inox de 20 mm de diâmetro interno e 5 mm de altura como determinado por Nogami & Villibor, 1994 e 1996. Foi necessário espalhar vaselina na superfície de cada anel, de modo que, no momento que o solo foi moldado, o material não grudou. Com o restante da amostra separada pro ensaio, foram moldadas e pesadas 3 esferas de aproximadamente 20 mm com pesos entre 10 a 12 gramas.

As esferas e os anéis foram secados por 24 horas na temperatura ambiente (Figura 4.8). Após a secagem, determinou-se a contração medindo-se o diâmetro interno dos anéis e o diâmetro das pastilhas com o auxílio de um paquímetro. O diâmetro de cada anel e cada pastilha foi resultado da média de três medições afastadas entre si.

Figura 4.8 – Ensaio MCT – Secagem do Material



Em um recipiente, colocou-se as pastilhas sobre uma placa de pedra porosa de 5 mm de altura revestida por um papel filtro (Figura 4.9); em seguida foi acrescentado água destilada para medir a ascensão da água na pastilha que é perceptível através da mudança de cor dela. É necessário a contagem do tempo desde o momento que é acrescentado água até o momento em que a pastilha se encontra completamente saturada. Após 2 horas ainda submerso, com o penetrômetro, foi avaliado a penetração em cada pastilha; e avaliado a peculiaridade das mesmas, se apareceram trincas, a sua expansão ou se nada ocorreu.

Por fim, as esferas secas são pesadas e avaliadas de acordo com a resistência ao esmagamento podendo esmagar ao manuseio, ou apenas com a pressão dos dedos, ou com a pressão dos dedos sobre a placa dura.

Figura 4.9 – Pastilhas sobre placa porosa e esferas secas



5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão exibidos e analisados os resultados dos ensaios realizados *in situ* e laboratoriais. O estudo tem objetivo de compreender o solo estudado e ter informações suficientes para saber se ele tem características adequadas para servir como base de pavimentos permeáveis.

5.1 PERFIL DE SONDAGEM SPT

As localizações dos 4 furos realizados para o perfil de sondagem foram distribuídas como a apresentado na Figura 5.1 e descrito as camadas do subsolo como na Figura 5.2.

Figura 5.1 – Localização dos perfis de sondagem SPT

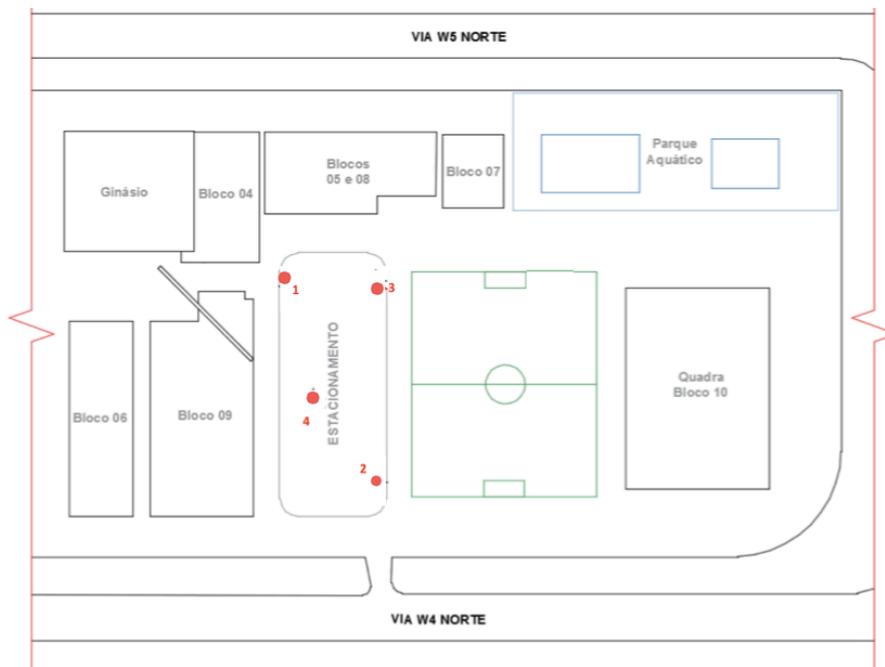


Figura 5.2 – Perfil de Sondagem SPT

DIÂMETRO DO FURO	REVESTIMENTO	COTAS (m) & NÍVEL D'ÁGUA	PROFUNDIDADE	MANOBRAS	PERFIL GEOLÓGICO	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	ENSAIO PENETROMÉTRICO (GOLPES/CM)			ENSAIO PENETROMÉTRICO (GOLPES/CM)								
							&	&	&	&	&	&						
							1	2	3	4								
		-1,00	1,00			Camada de brita (aterro)	2 15	2 15	2 15	4 15	7 15	8 15	1 15	2 15	2 15	1 15	2 15	2 15
		-2,00					1 15	3 15	3 15	1 15	2 15	2 15	1 15	1 15	1 15	4 15	4 15	4 15
		-3,00					3 15	3 15	4 15	2 15	2 15	2 15	1 15	2 15	1 15	1 15	2 15	2 15
		-4,00					2 15	3 15	4 15	2 15	3 15	3 15	3 15	3 15	4 15	2 15	2 15	2 15
		-5,00					3 15	4 15	3 15	1 15	2 15	3 15	3 15	4 15	5 15	1 15	2 15	1 15
		-6,00				Argila, pouco siltsosa, pouco arenosa, vermelha, seca.	3 15	3 15	2 15	2 15	1 15	2 15	4 15	4 15	5 15	3 15	3 15	4 15
		-7,00					2 15	4 15	5 15	3 15	4 15	5 15	4 15	5 15	3 15	3 15	4 15	4 15

Ao analisar os furos SP01, SP02, SP03 e SP04, as camadas situadas a 1 e a 2 metros de profundidade apresentam um padrão de valores ao longo da região de estudo. O fato do local ser um estacionamento com passagem constante de carros e aterrado com brita de variados tamanhos, deu consequência a variação entre os furos nas maiores profundidades. Os valores de N_{SPT} no primeiro metro, ao desconsiderar o furo 2 devido a alta variação, deu em média 4 golpes, enquanto o segundo metro com todos os furos resultou entre 3 a 4 golpes. Analisando tais resultados com os estudos de Ferreira et al (1989), valores de SPT abaixo ou igual a 4 são considerados colapsíveis quando em seu estado natural. Por isso, a importância da compactação para uma maior resistência.

Nas camadas seguintes ainda houve variações entre os pontos, no entanto, o N_{SPT} no geral passou a ser maior que 4. Essa alteração entre os pontos e as camadas, foi observado na pesquisa de Gomes (2006) que ao comparar os resultados de SPT com o ensaio de compressão endométrica simples, concluiu que tal discrepância está ligada ao mecanismo de interligação das partículas e devido a outros fatores é necessária uma investigação mais aprofundada para compreender a variação de comportamento.

Não foi encontrado nível de água nos 17 metros estudados através do perfil de sondagem.

5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

5.2.1 Análise Granulométrica

Os ensaios de granulometria com e sem defloculante podem ser observados conforme o Gráfico 5.1 e as Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente. No geral, os resultados dos nove pontos então parecidos, porém devido aos solos 2 e 4 estarem variando muito mais do que os demais, eles foram tirados de plano. Assim, essas amostras nas análises foram apresentadas, porém desconsideradas.

A análise das amostras com defloculante resultou em um solo bem graduado composto por 64.07% das partículas com diâmetro menor que 0,002 mm, identificado como argiloso e com parcelas consideráveis de silte e argila. Logo, como exposto na Tabela 5.2, os resultados da granulometria sem defloculante deram características de um solo arenoso com pouco silte e quase nada de argila.

Araújo et al. (2017) declaram em sua pesquisa que o grau de intemperismo da solo influência diretamente na sua estrutura, e que, as distinções dos resultados é consequência do defloculante que desagrega a macroestrutura proveniente da cimentação das partículas finas por óxidos e hidróxidos de ferro. Como complemento, os pesquisadores Teixeira et al (2002) concluem ainda que, a estrutura macroagregada dos solos argilosos faz com que na prática esses solos se comportem como siltes ou até mesmo areias finas, e por isso a importância da sedimentação sem defloculante para representar o estado do solo em campo.

Gráfico 5.1 – Curva Granulométrica com e sem Defloculante

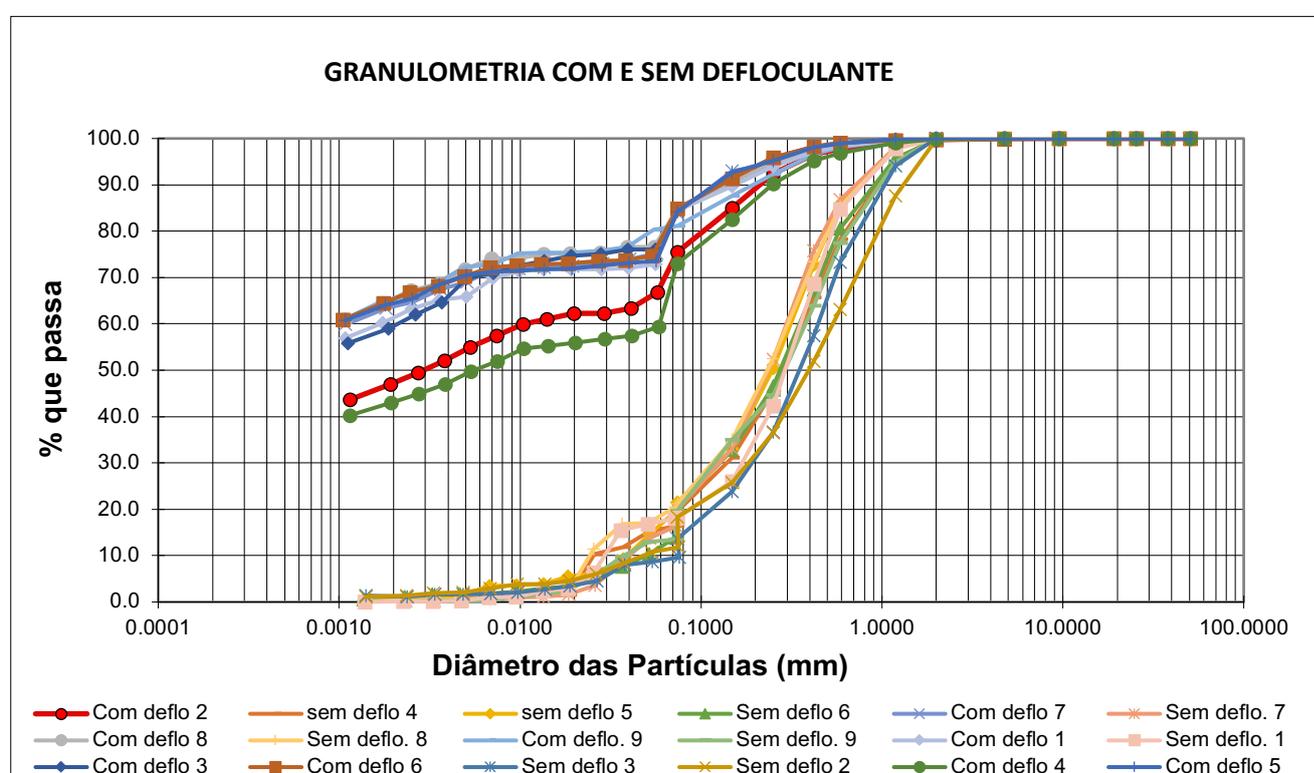


Tabela 5.1 – Granulometria do solo analisado com defloculante

MATERIAL	PORCENTAGEM DO MATERIAL COM DEFLOCULANTE									Média (Sem os pontos 2 e 4)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
6,0<Pedregulho médio<20,0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0,00
2,0<Pedregulho fino<6,0	0	0,2	0	0,1	0	0,1	0	0	0	0,01
0,6<Areia grossa<2,0	1,6	1,9	0,9	3,1	1	0,7	1,4	1,3	1,8	1,24
0,2<Areia média<0,6	6,5	9,1	5,4	10,4	5	5,4	4,9	6,1	8,1	5,91
0,06 < Areia fina <0,2	18,7	21,4	17,7	26,9	20,3	18,6	18,3	16,1	8,4	16,87
0,002 < Silte < 0,06	11,7	20,1	16,5	16,4	8,7	9,2	11,1	10,7	15	11,84
Argila < 0,002	61,5	47,3	59,5	43,1	65	65,8	64,3	65,9	66,5	64,07

Tabela 5.2 – Granulometria do solo analisado sem defloculante

MATERIAL	PORCENTAGEM DO MATERIAL SEM DEFLOCULANTE									Média (Sem os pontos 2 e 4)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
6,0<Pedregulho médio<20,0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0.01
2,0<Pedregulho fino<6,0	0	0.2	0	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0.01
0,6<Areia grossa<2,0	14.9	36.2	26.3	21.4	13.9	18.9	12.9	14.6	22.2		17.67
0,2<Areia média<0,6	50.7	32.3	43.4	40.1	44.2	41.1	44.2	41.6	37.8		43.29
0,06 < Areia fina <0,2	16.9	20.1	21.4	22.7	25.3	28	28.1	25.4	26.7		24.54
0,002 < Silte < 0,06	17.2	9.5	7.9	15.2	15.8	10.4	14.4	17.9	13		13.8
Argila < 0,002	0.4	2	0.7	0.8	1	2.2	0.6	0.9	0.3		0.87

5.2.1 LIMITES DE ATTERBERG

Na tabela 3, encontram-se os resultados dos ensaios dos Limites de Atterberg. A plasticidade dos solos deu em média de 35,33% para o limite de plasticidade e 48,86% para o limite de liquidez. Pode-se observar que o índice de plasticidade do solo foi em média 14,43%, o que classifica ele como altamente plástico, conforme a Tabela 5.4; Cardoso (2002) confirma que o limite de plasticidade está diretamente ligado ao crescimento do teor da fração argila e dos principais minerais que a compõem.

O solo de estudo dessa pesquisa, segundo Camapum de Carvalho et al. (1993), é um material conhecido como argila porosa pois tem a combinação de argilas, siltes e areias em quantidades diferentes de acordo com a região de retirada. Ele determina que as características mais comuns desse tipo de solo apresentam N_{SPT} inferior a 6 golpes, limite de liquidez entre 25 e 78%, limite de plasticidade entre 18 e 58%, índice de plasticidade entre 4 e 38%; e Índice de vazios entre 1,2 e 2,2. Logo, foram observadas tais propriedades nas amostras.

Tabela 5.3 – Limites de Atterberg

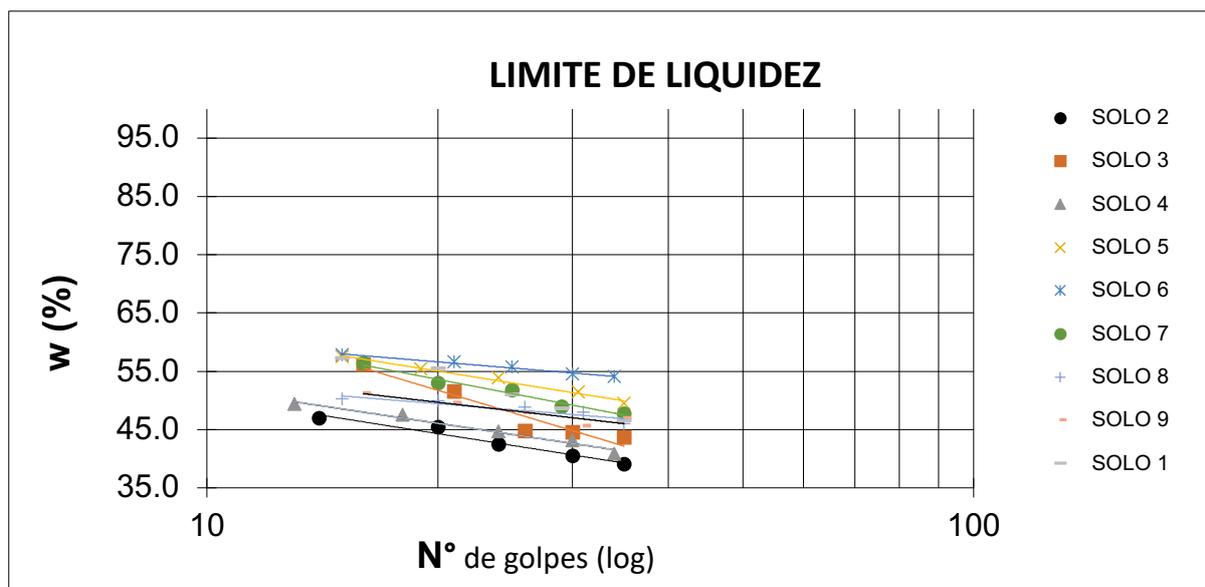
SOLOS	LIMITE DE PLASTICIDADE (%)	LIMITE DE LIQUIDEZ (%)	IP (%)
1	32.65	51.13	18
2	34.15	42.29	8
3	33.82	47.92	14
4	34.29	44.16	10
5	36.27	53	17
6	37.04	55.59	19
7	34.99	51.17	16
8	37.79	48.42	11
9	34.78	34.78	13
Média (Sem os pontos 2 e 4)	35.33	48.86	14.43

Tabela 5.4 – Classificação para o Índice de Plasticidade

IP	DESCRIÇÃO
0	Não-plástico
1 – 5	Ligeiramente plástico
5 – 10	Plasticidade baixa
10 – 20	Plasticidade media
20 – 40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

Fonte: (Das, 2007)

Gráfico 5.3 – Limite de Liquidez



5.3 ÍNDICES FÍSICOS

Para os índices físicos apresentados na Tabela 5.5, foram analisados apenas 3 pontos devido a uniformidade ao longo do estacionamento. Os resultados mostram uma variação baixa de perfil, ou seja, não demanda variações significativas ao longo da região analisada. Segundo Araújo et al. (2017), o alto valor do índice de vazios é típico de um solo tropical com grau de intemperismo elevado. O valor da massa específica do solo deste estudo é de 2,66 g/cm³, valores encontrados em solos argilosos.

Tabela 5.5 – Índices físicos do solo estudado

Solos	Massa específica aparente Solo úmido (g/cm ³)	Massa específica aparente do Solo Seco (g/cm ³)	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	Índice de vazios (e)	Massa específica real dos grãos (g/cm ³)
1	1.6	1.23	12.1	1.16	2.66
2	1.53	1.16	11.4	1.27	2.63
3	1.33	1.39	13.6	0.94	2.70
Média	1.49	1.26	12.37	1.12	2.66

5.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS: HBR, SUCS E MCT

Na tabela 5.6, observa-se a classificação do solo segundo os sistemas mais usuais – HBR e SUCS – e segundo o MCT, específico para solos tropicais pois suas propriedades mecânicas e hídricas são consideradas.

Tabela 5.6 – Classificação do solo estudado

SOLO	COM DEFLOCULANTE		SEM DEFLOCULANTE		MCT
	HBR	SUCS	HBR	SUCS	
1	A-5	ML	A-2-4	SW	LA-LA'
2	A-7-5	ML	A-2-7	SP	LA
3	A-5	ML	A-2-5	SW	LA-LA'
4	A-7-5	MH	A-2-7	SW	LA
5	A-7-5	MH	A-2-7	SP	LA-LA'
6	A-7-5	MH	A-2-7	SW	LA-LA'
7	A-7-5	ML	A-2-7	SW	LA-LA'
8	A-7-5	ML	A-2-7	SP	LA-LA'
9	A-7-5	MH	A-2-7	SW	LA-LA'

Para o sistema HBR, ou sistema rodoviário, foi utilizada a Tabela 5.7 para se obter os resultados que classificaram quase todas as amostras com o emprego de defloculante como A-7-5, definidos como solos argilosos. Os solos 1 e 3 que tiveram classificação A-5 são determinados como solos siltosos. Para os ensaios sem o defloculante, a maioria resultou em A-2-7 que é definido como areia e areia siltosa ou argilosa.

Tabela 5.7 – Classificação dos Solos pelo Sistema Rodoviário

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
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	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:											
Límite 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.

Fonte: (DNIT, 2006)

A classificação SUCS teve como base a Tabela 5.8. As amostras com defloculante foram determinadas como ML – siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosa com pequena plasticidade – e MH – siltes inorgânicos, finos arenosos ou solos siltosos, siltes elásticos. Para as amostras sem defloculante, os resultados deram SW definido como areias bem graduadas e SP tipo como areias mal graduadas.

As metodologias usuais para as classificações de solos apresentam delimitações quando empregadas para solos de regiões tropicais, pois não mostram seu desempenho em campo quando utilizado em bases de pavimentos.

Tabela 5.8 – Classificação Unificada dos Solos

TABELA III - Classificação Unificada dos Solos							
Processo para identificação no campo					Grupo	Designação característica	
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA Mais de metade é maior que a abertura da peneira de malha n.º 40	PEDREGULHOS Mais de metade da fração grosseira e maior que a # n.º 10	PEDREGULHOS PUROS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		GW	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.	
			Predominância de um tamanho de grão ou graduação falhada (ausência de alguns tamanhos de grão)		GP	Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino.	
		PDREGULHOS COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH).		GF	Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados.	
			Finos plásticos (CL ou CH)		GC	Pedregulhos argilosos, misturas de pedregulho, areia e argila bem graduados.	
	AREIAS Mais de metade da fração grosseira menor que a # n.º 10	AREIAS PURAS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		SW	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	
			Predominância de um grão ou graduação falhada		SP	Areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	
		AREIA COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH)		SF	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte.	
			Finos plásticos (CL ou CH ou OH)		SC	Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila.	
	SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA Mais que a metade do material é menor que a abertura de malha da # 200	Processo de identificação executado sobre a fração < # n.º 40				A abertura da malha # n.º 200 corresponde aproximadamente à menor partícula visível a olho nu	
		ENSAIO EXPEDITO →	RESISTENCIA a SECO (esmagamento pelos dedos)	DILATÂNCIA (DILAÇÃO)	RIGIDEZ (consistência na proximidade do LP)		
SILTES E ARGILAS Limite de liquidez menor que 50		nenhuma a pequena	rápida a lenta	nenhuma	ML	Siltos inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas com pequena plasticidade.	
		média a elevada	Nenhuma a muito lenta	média	CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.	
		Pequena à média	lenta	pequena	OL	Siltos orgânicos e siltos argilosos orgânicos de baixa plasticidade	
SILTES E ARGILAS Limite de liquidez maior que 50		Pequena a média	Lenta a nenhuma	Pequena a média	MH	Siltos inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos arenosos ou solos siltosos, siltos elásticos.	
		Elevada a muito elevada	nenhuma	elevada	CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.	
		Média a elevada	Nenhuma a muito lenta	Pequena a média	OH	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade	
TURFAS		Facilmente identificáveis pela cor, cheiro, porosidade e frequentemente pela textura fibrosa.			Pt	Solos com elevado teor de matéria orgânica	

Fonte: Milton Vargas, “Introdução à Mecânica dos Solos”

Os resultados obtidos pela classificação MCT das amostras, identificou um solo, em sua maioria do tipo LA-LA', o que indica solos arenoso de comportamento laterítico que apresentam um bom desempenho quando compactado. Segundo Nogami e Villibor (1995), o resultado obtido permite ser utilizado em camadas de pavimentos como reforço de bases.

5.5 TAXA DE INFILTRAÇÃO: INFILTRAÇÃO DUPLO ANEL

O ensaio de infiltração Duplo Anel estimou a velocidade de infiltração da água no solo existente do local onde será contruído o pavimento permeável. O ensaio de infiltração foi executado em 3 pontos do estacionamento como observado na Tabela 5.9.

Pelas análises dos resultados, pode-se verificar que a velocidade de infiltração do solo saturado na área 1 foi de 0,09 mm/h, no ponto 2 de 0,14 mm/h e no ponto 3 de 0,1 mm/h. De acordo com a EPA – Environmental Protection Agency - (1999), é aconselhado o uso de pavimentos permeáveis apenas em solos com taxa de infiltração superior a 7 mm/h.

Tabela 5.9 – Resultados do ensaio de infiltração com duplo anel.

ÁREA 1				ÁREA 2				ÁREA 3			
Tempo (min)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (mm/h)	Tempo (min)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (mm/h)	Tempo (min)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (mm/h)
0	16.3	0.00		0	55.2	0.00		0	55	0.00	
5	19	0.03	3.24	5	57.9	0.03	3.24	5	56.4	0.01	1.68
10	21	0.02	1.20	10	60	0.02	1.26	10	57.4	0.01	0.60
15	22.5	0.02	0.60	15	61.5	0.02	0.60	15	58.3	0.01	0.36
20	23.5	0.01	0.30	20	63.4	0.02	0.57	20	59.2	0.01	0.27
25	24.9	0.01	0.34	25	65.4	0.02	0.48	25	60	0.01	0.19
30	25.6	0.01	0.14	30	67.1	0.02	0.34	30	60.8	0.01	0.16
35	26.9	0.01	0.22	35	68.7	0.02	0.27	35	61.5	0.01	0.12
40	28.2	0.01	0.20	40	70.5	0.02	0.27	40	62.3	0.01	0.12
45	29.4	0.01	0.16	45	72	0.02	0.20	45	62.8	0.01	0.07
50	30.5	0.01	0.13	50	73.5	0.02	0.18	50	63.5	0.01	0.08
55	31.6	0.01	0.12	55	74.4	0.01	0.10	55	64	0.01	0.05
60	32.4	0.01	0.08	60	75.5	0.01	0.11	60	64.5	0.01	0.05
65	33.4	0.01	0.09	65	77	0.02	0.14	65	65.6	0.01	0.10

5.6 PERMEABILIDADE: MÉTODO DE PORCHET

A partir dos dados obtidos dos ensaios de permeabilidade, como observado na Tabela 5.10, ao comparar com os valores de referência para permeabilidade dos solos apresentados na Tabela 5.11, conclui-se que o solo em estudo apresenta permeabilidade de areia fina.

Ao comparar ainda os resultados com a Tabela 5.12, a permeabilidade desse solo é considerada alta para pavimentos permeáveis, superando o valor exigido pela norma ABNT NBR 16416 (2015).

Tabela 5.10 – Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Permeabilidade (m/s)	
Área 1	$3.62 \cdot 10^{-5}$
Área 2	$6.92 \cdot 10^{-5}$
Área 3	$5.30 \cdot 10^{-5}$

Tabela 5.11 - Valores de Referência para a Permeabilidade dos Solos

Tipo de Solo (m/s)	
Areia Grossa	10^{-3}
Areia Média	10^{-4}
Areias Finas	10^{-5}
Areias Argilosas	10^{-7}
Siltos	10^{-6} a 10^{-9}
Argilas	$< 10^{-9}$

Fonte: (Abreu et al., 2017)

Tabela 5.12 – Classificação de Permeabilidade

Valores típicos de coeficientes de permeabilidade para solos		
Permeabilidade		K (m/s)
Pavimentos permeáveis	Muito alta	$> 10^{-3}$
	Alta	10^{-3} a 10^{-5}
	Baixa	10^{-5} a 10^{-7}
Pavimentos impermeáveis	Muito Baixa	10^{-7} a 10^{-9}
	Baixíssima	$< 10^{-9}$

Fonte: (Abreu et al., 2017)

6. CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados, tendo em vista que, o objetivo do trabalho foi caracterizar o solo para uma futura implantação de pavimento permeável; foi possível um melhor entendimento do mesmo para ser usado como base de tal pavimento. Uma boa análise permite que não haja futuros danos em pavimentos como colapsos, drenagem ineficiente, sedimentação, entre outros.

O local de estudo (estacionamento do UniCeub), mostrou no geral uniformidade ao longo da sua região. No entanto, acredita-se que os resultados distintos de caracterização e SPT sejam consequência da passagem constante de carros que compactou o solo ao longo dos anos. Essa alteração entre os pontos e as camadas, também pode ser por outros motivos como foi observado na pesquisa de Gomes (2006) que ao comparar os resultados de SPT com o ensaio de compressão endométrica simples, concluiu que tal discrepância está ligada ao mecanismo de interligação das partículas e devido a outros fatores é necessária uma investigação mais aprofundada para compreender a variação de comportamento.

Verificou-se que o solo estudado é laterítico, segundo classificação MCT, com uma boa graduação, no entanto, precisa de considerações importantes devido as suas propriedades únicas mecânicas e hídricas. A presença de areia e argila em sua composição são consideradas boas como base de pavimentos encontrados em calçadas, estacionamentos e locais de cargas mais leves. De acordo com Veturini (2015), esse solo tropical traz benefícios pois quando compactados apresentam baixa expansão e alto módulo de resiliente.

No entanto, a taxa de infiltração do solo estudado deu insuficiente segundo a EPA (1999) que deve ser superior a 7 mm/h., enquanto, a permeabilidade desse solo é considerada alta para pavimentos permeáveis, superando o valor exigido pela norma ABNR NBR 16415 (2015). Com base no ensaio de SPT, as primeiras camadas do solo apresentam N_{SPT} média de 5 golpes, não mostrando resistência alta quando em seu estado natural. Por isso a importância da compactação.

Para complementar os estudos é fundamental a análise de mais pontos que relacionam infiltração e permeabilidade. A comparação entre o solo coletado no estacionamento, com outros pontos ao redor do Distrito Federa, seria importante para entender melhor o solo da região e detalhes mecânicos, físicos e químicos que são muito marcantes em solos tropicais.

REFERÊNCIAS

AASHTO T 309-99 (1999). **Standard method of test for determining the resilient modulus of soils aggregate materials**. American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABREU, L.S.L.G.; COUTINHO, L.F.M. (2017). **Metodologia para Implantação de Pavimentos Permeáveis em Brasília: Um Estudo de Caso**. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89 p.

ACIOLI, L.A. 2005. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre. [145]f.

ARAUJO, A.G; ALVES, E.C; SOUZA, J.C; SILVA, I.L; CORRECHEL, V. **Análise da determinação granulométrica de um latossolo por dois métodos: densímetro e granulômetro a laser**. Revista Mirante. Anápolis (GO), 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo. ABNT- Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo. Determinação do limite de liquidez. Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo. Determinação do limite de plasticidade. Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo. Análise granulométrica. Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de insperção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas.** Rio de Janeiro 1986.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELESPACH, D. A. **Field Survey of Pavement Surface Infiltration Rates.** *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 133, No. 3, June, 2007.

BRATTEBO, B.O.; BOOTH, D.B. **Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems.** *Water Res.* 2003, 37, 4369–4376.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. et.al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; MORTARI, D.; SILVA, P.R. & PAIXÃO, M.M.O.M. (1993) **Avaliação da colapsividade de um solo poroso em consequência da construção de um aterro.** 27ª Reunião Anual de Pavimentação, Belém, PA, 255-263.

CARDOSO, F.B.F. (2002). **Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-009A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357 p.

CARVALHO, J.C; JUNIOR, G.F.N.G; CARVALHO, E.T.L. **Tópicos sobre infiltração teoria e prática aplicadas a solos tropicais.** Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2012.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DE MIO, G. **Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental.** Tese (Doutorado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2005.

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

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação.** 3a. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2ª Edição. 2013

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Stormwater technology fact sheet, Porous Pavement.** Washington, D. C.: EPA, 1999. EPA 832-F-99-023.

FERNANDES, E. **Estudo comparativo da aplicação de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais.** 106f. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FERREIRAR.C.; MONTEIRO, L.B.; PERES, J.E.E. & BENVENUTO, C. **Some aspects on the behaviour of brazilian collapsible soils.** In: ICSMFE, 12, Rio de Janeiro, suppl. vol., p.117-120, 1989.

GOMES, Ribamar de Jesus. **Estudo geotécnico de um solo superficial da cidade de Bragança Paulista – SP / Ribamar de Jesus Gomes.** Campinas, SP: [s.n.], 2006. P. 107

HENDERSHORT, W.H. & CARSON, M.A. (1978) **Changes in the plasticity of a sample of Champlain clay after selective chemical dissolution to remove amorphous material.** Can. Geotech. J, 15:609-616.

HOLTZ, F.C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental.** (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

MACHADO, A.C; FERREIRA, L.D; COUTO, B.O; FILGUEIRAS, R.A.C; SOUZA, R.R. **Estudo comparativo entre a classificação MCT e os sistemas tradicionais de classificações geotécnicas para solos brasileiros.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Belo Horizonte (2016).

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

NIGRI, Ilan Ricardo Nigri. **Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos Gerais de Projeto Estabelecidos pela Norma ABNT NBR 16416: 2015**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2017.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1994). **Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais**. São Paulo, ABMS, pp.1293-1300.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1996). **Importância e determinação do grau de laterização em geologia de engenharia**. Rio de Janeiro, ABGE, pp.345-358.

OLIVEIRA, T.G; MENDES, G.C; PEREIRA, E.L e FERREIRA, L.D. **Análise comparative entre o granulômetro a laser e o método convencional de granulometria por sedimentação**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Belo Horizonte (2016).

PINTO, Carlos de Sousa. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3a Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, E.F; PARREIRA, A.B. **Estudo comparative de diferentes sistemas de classificação geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. 44º reunião annual de pavimentação e 18º encontro nacionalde conservação rodoviária. Foz do Iguaçu, 2015).

VARGAS, Milton. Introdução à Mecânica dos Solos. Ed. McGraw Hill. São Paulo, 1985.

VENTURINI, Jéssica Anversa. **Aplicação da metodologia MCT para classificação de alguns solos e rochas da região de Santa Maria**. Santa Maria (2015)

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. (2009) **Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**, São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291 p.

TEIXEIRA, R. S.; OSAWA, M.Y. e RETT, R.F., 2002. **Estudo da granulometria do solo superficial de Londrina/PR, com e sem uso de defloculante**. III Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura – ENTECA 2002. Maringá/PR p.453-460.