

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS EM BRASÍLIA: UM ESTUDO DE CASO**

LEONARDO SALOMÃO LUSTOSA GONDIM DE ABREU
LUIZ FELIPE MASCARENHAS COUTINHO

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM GEOTECNIA

BRASÍLIA / DF: JULHO/2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS EM BRASÍLIA: UM ESTUDO DE CASO**

**LEONARDO SALOMÃO LUSTOSA GONDIM DE ABREU
LUIZ FELIPE MASCARENHAS COUTINHO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD. (ENC-UnB)
(ORIENTADOR)**

**LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, D.Sc. (ENC-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DIANA NASCIMENTO LINS, Engenheira Civil (Grupotecno Sistemas Construtivos)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 07 de Julho de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

ABREU, LEONARDO SALOMÃO LUSTOSA GONDIM DE
COUTINHO, LUIZ FELIPE MASCARENHAS

Metodologia para Implantação de Pavimentos Permeáveis em Brasília: Um Estudo de Caso. [Distrito Federal] 2017.

xii, 89 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| 1. Pavimentos Permeáveis | 2. Placas permeáveis de concreto |
| 3. Controle de Inundações | 4. Desenvolvimento Sustentável |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Leonardo Salomão Lustosa Gondim de Abreu e Luiz Felipe Mascarenhas Coutinho

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Metodologia para Implantação de Pavimentos Permeáveis em Brasília: Um Estudo de Caso.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Leonardo Salomão Lustosa Gondim de Abreu
Rua 35 Norte, Lote 05 Ed. Cidade das Águas Ap. 702
71919-000 – Brasília/DF – Brasil

Luiz Felipe Mascarenhas Coutinho
SHIN QI 3 Conjunto 7 Casa 1
71505-270 – Brasília – Brasil

RESUMO

A crescente impermeabilização dos solos nos ambientes urbanos vem provocando recorrentes problemas de inundações, aumento do escoamento superficial e danos econômicos de maneira geral. O pavimento permeável surge como uma das soluções para esse problema, uma vez que permite a percolação da água, reduzindo os danos em grandes enchentes. Sendo o tráfego pesado de veículos um fator limitante, a concepção almejada é a utilização desse tipo de revestimento em um estacionamento, onde a solicitação mecânica é menor e a área de captação é grande, contribuindo ainda mais para reter e permitir a absorção pelo solo da água precipitada nas chuvas. Destarte, será almejado ao fim do presente trabalho o dimensionamento de um pavimento composto por uma placa de concreto permeável, bem como a realização de todos os experimentos necessários para se adequar às exigências normativas do projeto e fornecer um pavimento de boa qualidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.2	JUSTIFICATIVA.....	2
1.3	HIPÓTESE.....	2
1.4	OBJETIVO.....	3
1.5	METODOLOGIA.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	4
2.2	RELAÇÃO ENTRE O CBR E O DCP.....	7
2.3	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.....	8
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	23
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS.....	23
4.1.1.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	23
4.1.2.	PERMEABILIDADE.....	24
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA DE BASE.....	24
4.2.1.	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	24
4.2.2.	ABRASÃO “LOS ANGELES”.....	25
4.2.3.	ÍNDICE DE VAZIOS.....	26
4.2.4.	MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA #200.....	27
4.2.5.	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFORNIA (ISC).....	28
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA DE ASSENTAMENTO.....	30
4.3.1.	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	30
4.3.2.	ABRASÃO “LOS ANGELES”.....	31
4.3.3.	ÍNDICE DE VAZIOS.....	31
4.3.4.	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO.....	32
4.3.5.	MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA #200.....	34
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO SUBLEITO.....	35
4.4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	35
4.4.2.	ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE (DCP).....	41
4.4.3.	PERMEABILIDADE.....	43

5	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO	46
5.1	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO.....	46
5.2	DIMENSIONAMENTO MECÂNICO	48
6	CONCLUSÃO.....	51
6.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	52
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	APÊNDICE A.....	56
	APÊNDICE B.....	61
	APÊNDICE C.....	82
	APÊNDICE D.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Seção transversal de um pavimento permeável com infiltração total. (Adaptado de EISENBERG, LINDOW, SMITH, 2015).....	5
Figura 2-2 – Seção transversal de um pavimento permeável com infiltração parcial. (Adaptado de EISENBERG; LINDOW; SMITH, 2015).....	5
Figura 2-3 – Seção transversal de um pavimento permeável sem infiltração. (Adaptado de EISENBERG, LINDOW, SMITH, 2015).....	6
Figura 2-4 – Correlações DCP x CBR obtidas para os solos analisados por Carvalho, 2005.....	8
Figura 3-1 – Fluxograma com etapas do trabalho.....	10
Figura 3-2 – Representação do ensaio de resistência à tração na flexão (ABNT NBR 12142/2010) ...	11
Figura 3-3 – Cilindro grande (ABNT NBR 7182/1986)	15
Figura 3-4 – Representação do estacionamento em estudo.....	19
Figura 3-5 - Esquematização do DCP (CARVALHO, 2005)	20
Figura 3-6 – Aparelho de Casagrande e cinzel utilizados para determinação do limite de liquidez (DNER – ME 122/94)	21
Figura 3-7 – Situação da massa de solo antes e depois do ensaio (DNER – ME 122/94)	22
Figura 4-1 – Curva da mistura da camada de base.....	25
Figura 4-2 – Gráfico de correção (DNIT 172/2016 – ME)	28
Figura 4-3 – Curva penetração x pressão aplicada no pistão	29
Figura 4-4 – Curva do material da camada de assentamento	31
Figura 4-5 – Curva da mistura hipotética 1 da camada de assentamento.....	34
Figura 4-6 – Curva da mistura hipotética 2 da camada de assentamento.....	35
Figura 4-7 – Curva do Limite de liquidez do solo.....	36
Figura 4-8 – Curvas granulométricas médias do solo, com e sem defloculante.....	38
Figura 4-9 – Curvas profundidade x resistência de todos os furos.....	41
Figura 4-10 – Taxa de infiltração x tempo em todas áreas.....	44
Figura 5-1 – Ábaco para o dimensionamento (SENÇO, 2007)	49
Figura 5-2 - Ábaco para o dimensionamento 1991 (SENÇO, 2007)	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável (ABNT NBR 16416/2015)	12
Tabela 3-2 – Determinação da massa de água para o ensaio (ABNT NBR 16416/2015)	13
Tabela 3-3 – Determinação do coeficiente de permeabilidade (ABNT NBR 16416/2015)	13
Tabela 3-4 – Energia de compactação (ABNT NBR 7182/1986)	16
Tabela 3-5 – Distribuição granulométrica recomendada para a camada de assentamento (ABNT NBR 16416/2015)	16
Tabela 3-6 – Especificação para o material de assentamento (ABNT NBR 16416/2015)	17
Tabela 3-7 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de sub-base e/ou base (ABNT NBR 16416/2015)	18
Tabela 3-8 – Especificação para o material de sub-base e/ou base (ABNT NBR 16416/2015)	18
Tabela 4-1 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.....	23
Tabela 4-2 – Dados obtidos nos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade.....	24
Tabela 4-3 – Curva da mistura da camada de base.....	25
Tabela 4-4 – Índice de vazios para a mistura da camada de base.....	27
Tabela 4-5 – Resultados do ensaio CBR para mistura da camada de base.....	29
Tabela 4-6 – Curva da mistura da camada de assentamento.....	30
Tabela 4-7 – Índice de vazios para a mistura da camada de assentamento.....	32
Tabela 4-8 – Dimensão máxima característica do material a ser utilizado na camada de assentamento.....	33
Tabela 4-9 – Resultados limite de liquidez.....	36
Tabela 4-10 – Resultados limite de plasticidade.....	37
Tabela 4-11 – Curva média sem defloculante.....	37
Tabela 4-12 – Curva média com defloculante.....	38
Tabela 4-13 – Correlação entre IG e CBR (DNER – Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis/1991).....	40
Tabela 4-14 – Classificação dos solos de acordo com a TRB (DNIT – Manual de Pavimentação/2006).....	40
Tabela 4-15 – Penetração média do DCP.....	42
Tabela 4-16 - Valores de CBR obtidos a partir do DCP.....	43
Tabela 4-17 – Infiltração média.....	44
Tabela 4-18 – Valores de referência para a permeabilidade dos solos (adaptada de Souza Pinto, 2006).....	45
Tabela 4-19 - Tipo de infiltração do pavimento em função das condições locais (ABNT NBR 16416/2015)	45
Tabela 5-1 - valores dos coeficientes de equivalência estrutural - K (SENÇO, 2007)	48

1 INTRODUÇÃO

A urbanização causa um aumento significativo em áreas cobertas com superfícies pavimentadas, tais como rodovias, estacionamentos e pátios (DPLG, 2010). Essas áreas pavimentadas impermeabilizam os solos em bacias hidrográficas, resultando em um aumento no volume de água pluvial escoado superficialmente. O excesso de escoamento superficial resulta em inundações, transporte de poluentes e detritos para os sistemas de drenagem, redução no volume de recarga dos lençóis freáticos e mudanças físicas e químicas no sistema hidrológico natural da bacia (EISENBERG; LINDOW; SMITH, 2015).

Sistemas de drenagem de água superficial projetados de acordo com os ideais do desenvolvimento sustentável são chamados de sistemas de drenagem sustentáveis. Eles são destinados a administrar os riscos ambientais resultantes de escoamento urbano e contribuir, quando possível, para o aprimoramento ambiental. Controlando de maneira efetiva o escoamento, é minimizada a necessidade de estruturas para conter grandes inundações. Um desses sistemas de drenagem sustentável é o pavimento permeável (WOODS-BALLARD *et al.*, 2007).

De acordo com Kayhanian *et al.* (2015), pavimentos permeáveis podem ser definidos como pavimentos que são capazes de armazenar água até sua infiltração total no solo e que funcionam como um pavimento convencional para resistir a carregamentos de tráfego leve de veículos e pedestres. Além dos benefícios citados anteriormente, esse tipo de pavimento ainda reduz os ruídos de rolamento dos veículos, aumenta a qualidade da água, melhora o desempenho térmico do pavimento e reduz a formação de ilhas de calor nas cidades.

Tendo em vista essas vantagens, foram concebidas placas de concreto permeável para serem utilizadas como revestimento em um sistema de pavimentação. Essas placas foram desenvolvidas tendo como referência a Norma ABNT NBR 16416:2015 e são destinadas a atender a um tráfego leve de veículos. Este trabalho tem como objetivo dar suporte teórico e tecnológico para aplicação deste tipo de pavimento em Brasília, contribuindo para o desenvolvimento de uma metodologia adequada de projeto e controle de construção deste tipo de obra.

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Quais as dimensões a serem empregadas na estrutura do pavimento de um estacionamento construído com placas de concreto permeável de modo a suportar as solicitações mecânicas do tráfego, distribuir os esforços oriundos do carregamento e permitir a percolação da água? Quais as características do solo quanto à infiltração?

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido às baixas solicitações mecânicas que ocorrem em um estacionamento, a utilização de placas de concreto permeável se torna possível, desde que garantidos os parâmetros de resistência da estrutura e as condições de rolamento. A utilização desse tipo de pavimento tem como fundamento a retenção e percolação de parte da precipitação e, eventualmente, do escoamento que chega ao pavimento, com o intuito de diminuir o escoamento superficial causado pela impermeabilização de uma grande extensão da superfície.

Segundo Eisenberg, Lindow e Smith (2015), os principais benefícios de se utilizar um pavimento permeável ao invés de um pavimento impermeável incluem uma redução do volume de escoamento superficial (*runoff*) e picos de vazão, dispersando o volume de precipitação ao longo do tempo e reduzindo o carreamento de material poluente, uma redução dos efeitos de ilha de calor, causada pelas cores frias da superfície dos pavimentos permeáveis, um aumento da taxa de infiltração no solo favorecendo a recarga do aquífero, uma redução da infraestrutura e dos custos dos sistemas de drenagem e, por fim, uma redução dos riscos de aquaplanagem.

A utilização desse tipo de pavimento no Brasil é bastante recente, sendo a norma que regulamenta esse tipo de serviço, a ABNT NBR 16416, publicada em 06 de agosto de 2015.

1.3 HIPÓTESE

É possível dimensionar um pavimento, revestido por placas de concreto permeável, para sua consequente implantação em um estacionamento, atendendo aos requisitos normativos.

1.4 OBJETIVO

O objetivo deste estudo é dimensionar a estrutura de um pavimento permeável de placas de concreto simples, desenvolvidas no Distrito Federal, para um estacionamento a ser implantado na Universidade de Brasília. Para atingir tal objetivo serão realizados ensaios de caracterização do solo *in situ*, ensaios laboratoriais de caracterização do solo, do agregado graúdo e da placa de concreto, de modo a obter os dados necessários ao dimensionamento correto da estrutura.

1.5 METODOLOGIA

O escopo do trabalho é o dimensionamento da estrutura de um pavimento para um estacionamento que possui como camada de revestimento uma placa de concreto simples permeável. Trata-se, portanto, de um estudo de caso.

Em um primeiro momento será realizado um levantamento bibliográfico com o intuito de abordar os principais aspectos de um pavimento permeável. Os principais assuntos que norteiam este trabalho são: placa de concreto permeável, camada de base/armazenamento e subleito não compactado.

Findada esta etapa inicial, o planejamento experimental torna-se o foco a fim de se selecionar os ensaios a serem realizados para caracterização da placa de concreto, do material a ser utilizado na camada de base e do subleito, bem como a verificação da necessidade de instalação de tubos dreno no sistema e uma camada de regularização entre a base e a placa de concreto.

Por fim, espera-se alcançar o objetivo almejado e dimensionar o estacionamento de um pavimento permeável, respeitando os requisitos da norma para a placa de concreto e para a sua infraestrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Pavimentos permeáveis são pavimentos alternativos que permitem que a água das chuvas seja filtrada através dos vazios em seu revestimento para a base e sub-base, as quais funcionam também como um reservatório, onde a água é temporariamente armazenada e em seguida escoada para o subleito (EISENBERG, LINDOW, SMITH, 2015).

Diferentemente dos pavimentos convencionais, pavimentos permeáveis são comumente construídos sobre camadas não compactadas de solo, a fim de maximizar a infiltração pelo solo. Sobre o subleito não compactado, pode-se usar um geotêxtil, que previne a migração de finos dele para o reservatório, ao mesmo tempo em que permite que a água passe por ele (WAPA, 2015).

Ainda segundo o boletim técnico da WAPA (2015), sobre o subleito há uma camada que atua como sub-base e base do pavimento. Ela deve ser formada por pedra britada de graduação uniforme, com 40% de vazios e deve funcionar como uma camada estrutural ao mesmo tempo em que temporariamente armazena água para infiltrar no subleito. Tendo em vista a função hidrológica dessas camadas, a espessura delas é determinada por meio de uma análise tanto estrutural quanto hidrológica (EISENBERG, LINDOW, SMITH, 2015).

Sobre a base, a fim de regularizar a superfície para a aplicação do revestimento, usualmente utiliza-se uma camada fina de aproximadamente 20 a 60 milímetros de espessura constituída de pedra britada, limpa, de granulometria aberta (WAPA, 2015). Com relação a infiltração, esta camada deve ter um coeficiente de permeabilidade maior que a camada de base.

Segundo Eisenberg, Lindow e Smith (2015), os pavimentos permeáveis podem conter ainda um tubo drenante localizado na base do reservatório. Eles são usados quando o volume de água que pode infiltrar no subleito é limitado ou quando não é permitida a recarga de água no solo. Isso ocorre em situações em que o solo é pouco permeável, o nível do lençol freático é elevado, o solo é contaminado, ou a base rochosa encontra-se a uma baixa profundidade.

Quanto à infiltração da água do reservatório para o subleito, os pavimentos permeáveis podem ser projetados para infiltrar toda a água pluvial (infiltração total), uma parte (infiltração parcial) ou nenhuma infiltração.

Na infiltração total, normalmente não é utilizado um tubo drenante e podem ser implantados em áreas que apresentam solos com alta permeabilidade. A Figura 2-1 apresenta a ilustração da seção transversal de um pavimento permeável com infiltração total.



Figura 2.1 – Seção transversal de um pavimento permeável com infiltração total. (Adaptado de EISENBERG, LINDOW, SMITH, 2015)

Na infiltração parcial, uma parte da água é infiltrada para o subleito e o restante da água armazenada é escoado por um tubo drenante. Esta solução costuma ser implantada em solos com baixa permeabilidade. A Figura 2-2 apresenta a ilustração da seção transversal de um pavimento permeável com infiltração parcial.

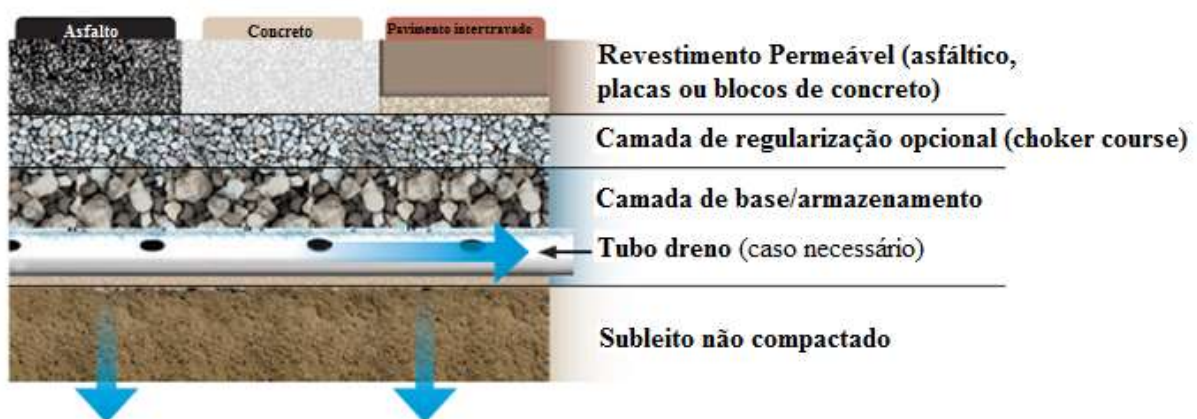


Figura 2-2 – Seção transversal de um pavimento permeável com infiltração parcial. (Adaptado de EISENBERG; LINDOW; SMITH, 2015)

Nos casos de solos onde não pode haver infiltração, é utilizado um material impermeável sobre o subleito, para garantir que a água não vai percolar para ele. A Figura 2-3 apresenta a ilustração da seção transversal de um pavimento permeável sem infiltração.



Figura 2-3 – Seção transversal de um pavimento permeável sem infiltração. (Adaptado de EISENBERG, LINDOW, SMITH, 2015)

De acordo com Dylla e Hansen (2015), para determinar a espessura das camadas do pavimento permeável, são necessárias três considerações: (i) verificar se esse tipo de pavimento pode ser aplicado no local desejado; (ii) o projeto hidrológico para garantir que o pavimento sustente a potencial demanda de água pluvial e; (iii) o projeto estrutural para garantir que o pavimento suporte a carga de tráfego esperada.

Quanto ao local de implantação, os pavimentos permeáveis desempenham melhor sua função em terrenos com maior elevação. Além disso, deve-se considerar o tipo de solo, a profundidade do leito rochoso, a declividade do pavimento e fontes adicionais de escoamento superficial de água. Alguns quesitos que o terreno precisa atender são os seguintes:

- As taxas de infiltração do solo devem estar entre 0,25 a 25 centímetros/hora;
- A profundidade mínima do leito rochoso ou do lençol freático deve ser maior que 60 centímetros;
- Para estacionamentos, a declividade do pavimento deve ser menor que 5%. Para declividades maiores que 5%, devem ser construídas bermas;
- Devem ser avaliadas as oportunidades de direcionar escoamentos de áreas impermeáveis próximas. A relação entre as áreas impermeáveis e as permeáveis deve ser menor que 5:1.

Quanto ao projeto hidrológico, deve-se determinar qual espessura é suficiente para infiltrar, armazenar e liberar o fluxo esperado de água. Isso exige informações sobre a espessura das camadas, permeabilidade do subleito e intensidade das precipitações.

Quanto ao projeto estrutural, para pavimentos sujeitos a tráfego leve de veículos, as solicitações às quais ele deve resistir não são significantes. Sendo assim, a espessura das camadas é definida pelo projeto hidrológico. Para tráfegos mais pesados, o projeto estrutural deve seguir os procedimentos para dimensionamento de pavimentos comuns.

2.2 RELAÇÃO ENTRE O CBR E O DCP

De acordo com Al-Refeai e Al-Suhaibani (1996), o Índice de Suporte Califórnia (CBR) é um valor muito utilizado em projetos de pavimentos para indicar a resistência do solo. Entretanto, sua determinação em campo é difícil, caro e relativamente demorada. Portanto, a utilização de relações entre resultados obtidos por meio de outros ensaios e o CBR pode ser uma boa alternativa.

Um desses ensaios é o DCP - *Dynamic Cone Penetration* - ou ensaio de penetração de cone. Por ser um ensaio leve e portátil, é uma opção atrativa para determinar o valor do CBR de maneira simples e rápida. O valor obtido por este ensaio é definido como a profundidade de penetração (D), em milímetros, de um cone de aço no solo causada por um único golpe do martelo.

Para solos brasileiros, de acordo com Carvalho (2005), em estudo para relacionar os valores de DCP com os de CBR de solos saprolíticos de textura fina de composições granulométricas distintas, variando de extremamente argilosa a extremamente arenosa, no Estado de São Paulo, foi obtida a seguinte correlação geral:

$$\log CBR = 2,54 - 0,96 * (\log D) \quad R^2 = 0,90 \quad (2-1)$$

em que:

D = penetração média do martelo, expressa em mm/golpe.

O autor ressalta que pelo fato de a relação geral obtida, apresentada na Equação 2-1, apresentar uma significativa dispersão dos pontos, é preferível utilizar-se das correlações obtidas para cada tipo de composição granulométrica de solo, apresentadas a seguir:

$$\log CBR = 2,87 - 1,12 * (\log D) \quad R^2 = 0,98 \quad (2-2)$$

$$\log CBR = 2,65 - 1,12 * (\log D) \quad R^2 = 0,95 \quad (2-3)$$

$$\log CBR = 2,33 - 0,83 * (\log D) \quad R^2 = 0,96 \quad (2-4)$$

$$\log CBR = 2,38 - 0,80 * (\log D) \quad R^2 = 0,96 \quad (2-5)$$

Tal que a Equação 2-2 é utilizada para areias e siltes quartzosos, a 2-3 para siltes arenosos e siltes caoliníticos e micáceos, a 2-4 para siltes argilosos e a 2-5 para argilas. A Figura 2-4 apresenta graficamente as correlações para cada tipo de solo obtidas por Carvalho em 2005.

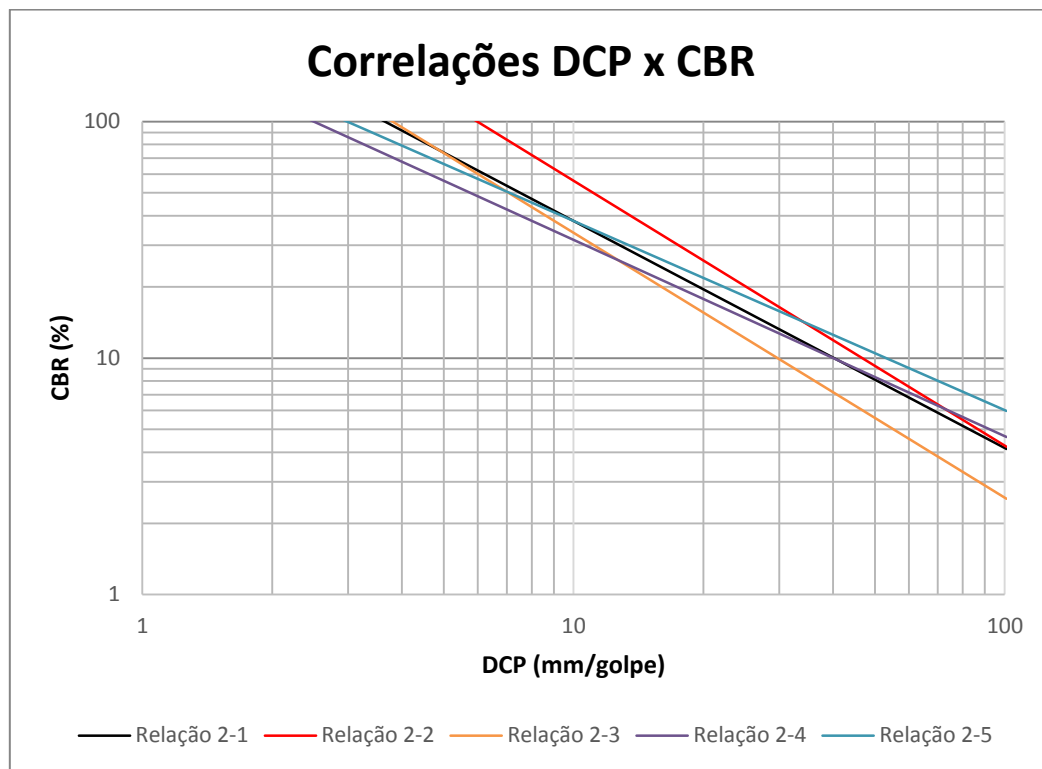


Figura 2-4 – Correlações DCP x CBR obtidas para os solos analisados por Carvalho (2005)

2.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

De acordo com a NBR 16416/2015 o projeto deve conter o coeficiente de permeabilidade do subleito conforme ABNT NBR 13292 ou ABNT NBR 14545, dependendo do tipo de solo. Entretanto, visando obter a permeabilidade do solo *in situ*, tendo em vista que esses valores correspondem melhor ao comportamento real do solo, foram executados dois ensaios. O primeiro deles foi a determinação da capacidade de infiltração do solo através de

infiltrômetros. O segundo foi o método de Porchet para determinação da permeabilidade do solo.

O ensaio da capacidade de infiltração, descrito por Mattos e Villela (1975), consiste em posicionar dois cilindros de aço concêntricos, infiltrômetros, em determinado ponto e, em seguida, verter água primeiramente no cilindro externo e depois no cilindro interno. A adição de água no cilindro externo tem como objetivo fornecer a quantidade de água necessária ao espalhamento lateral devido à capilaridade, fazendo com que a infiltração do anel interno seja relativa somente à área limitada pelo mesmo. Então, deve-se medir a variação do nível da água no cilindro interno em função do tempo decorrido, sendo esse valor a taxa de infiltração do solo em determinado momento. Dessa forma, pode-se determinar a capacidade de infiltração como a taxa de infiltração do solo com o tempo tendendo a infinito.

Já o método de Porchet para a obtenção da permeabilidade é executado conforme descrito em MINVU (1996). Primeiramente, é escavado um buraco no solo e é adicionada água nele até que esteja completamente cheio. Então, cronometra-se o tempo para que o nível da água desça uma determinada altura. A partir desses dados, calcula-se a permeabilidade do solo por meio da seguinte equação:

$$f = \frac{R}{(2*\Delta t)} * \ln\left(\frac{2*h1+R}{2*h2+R}\right) \quad (2-6)$$

em que:

f = permeabilidade do solo, expressa em cm/s;

R = raio do buraco escavado, expressa em cm;

Δt = intervalo de tempo cronometrado, expresso em s;

$h1$ = altura inicial do nível de água dentro do buraco, expressa em cm;

$h2$ = altura final do nível de água dentro do buraco, expressa em cm.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 3-1 apresenta o fluxograma das etapas de trabalho.

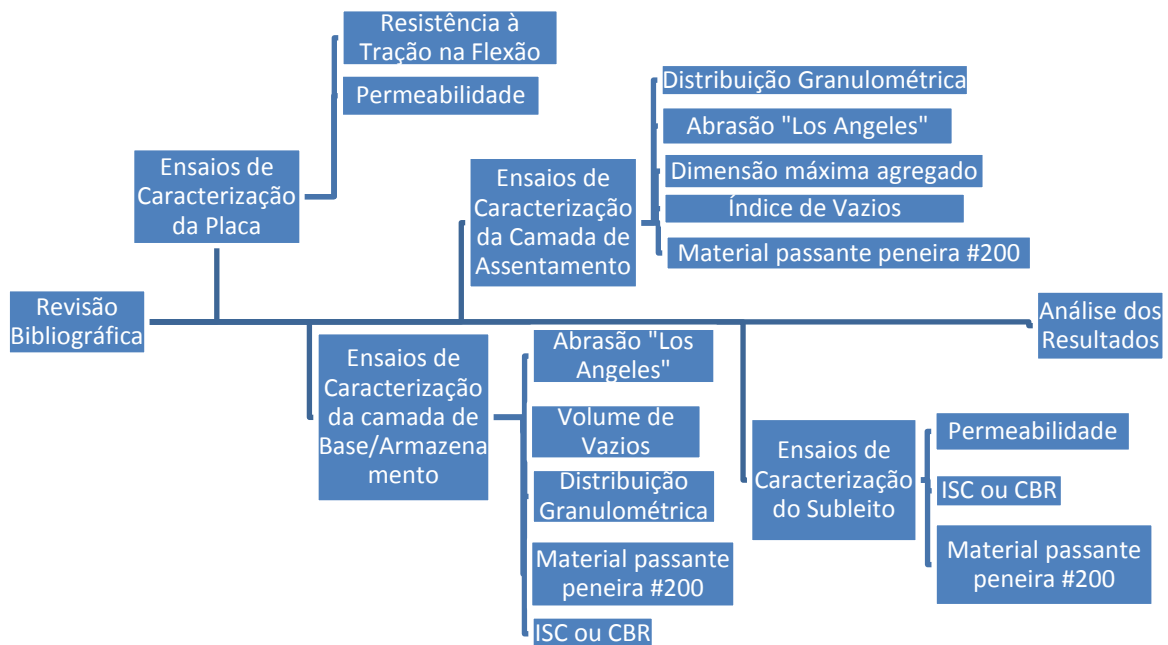


Figura 3-1 – Fluxograma com etapas do trabalho

A primeira etapa constituiu-se da revisão das normas requeridas ao dimensionamento de uma estrutura de pavimento permeável feito com uma placa de concreto de forma a determinar quais são os parâmetros a serem ensaiados de cada componente da estrutura.

Ao final desta etapa, foram iniciados os ensaios. Para a placa de concreto, foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão. De acordo com a norma ABNT NBR 16416/2015, o ensaio deve ser executado conforme norma ABNT NBR 15805/2015. Entretanto, essa norma refere-se a pisos elevados de placas de concreto e no método de ensaio proposto é necessário que haja uma distância entre os apoios na base da prensa igual a 10 vezes a espessura da placa, exigência adequada a placas de concreto a serem utilizadas em pisos elevados, mas não em placas destinadas à pavimentação, como no presente caso. Tendo em vista que as placas em estudo apresentam 8 cm de espessura e 40 cm tanto de comprimento quanto de largura, esse ensaio torna-se inviável.

Portanto, o método de ensaio utilizado para determinar a resistência à tração na flexão das placas foi o descrito na norma ABNT NBR 12142/2010. Para tanto, foi necessário cortar a placa em corpos de prova prismáticos, com dimensões de 40 cm de comprimento e 8 cm de

largura, mantendo sua espessura original de 8 cm. A Figura 3-2 apresenta uma ilustração do ensaio realizado.

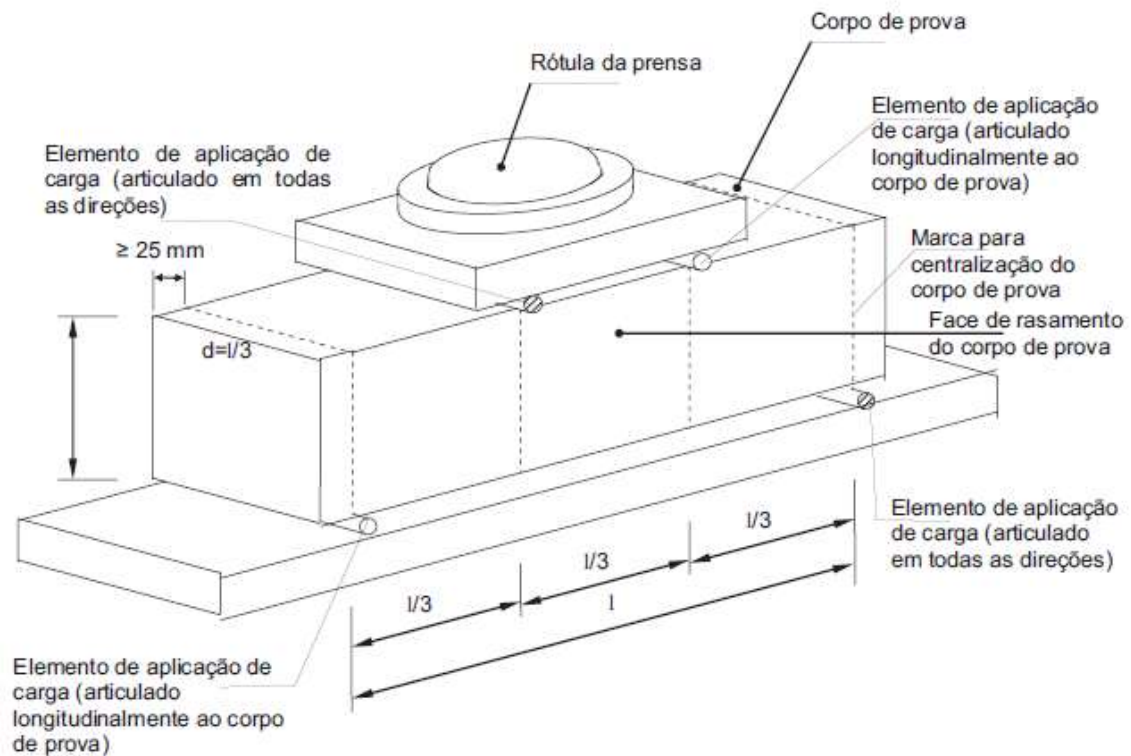


Figura 3-2 – Representação do ensaio de resistência à tração na flexão (ABNT NBR 12142/2010)

O ensaio consiste na aplicação de uma força contínua e sem choques sobre o corpo de prova, de forma que o aumento de tensão sobre ele esteja compreendido entre 0,9 MPa/min e 1,2 MPa/min, até que o corpo de prova seja rompido. Após o ensaio, são medidas a largura e a altura do corpo de prova na seção de ruptura. Em seguida, é calculada a resistência à tração na flexão, de acordo com a seguinte equação:

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (3-1)$$

em que:

$f_{ct,f}$ = resistência à tração na flexão, expressa em MPa;

F = força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em N;

l = dimensão do vão entre apoios, expressa em mm;

b = largura média do corpo de prova, expressa em mm.

d = altura média do corpo de prova, expressa em mm.

De acordo com a NBR 16416/2015, as placas devem apresentar resistência à tração na flexão maior ou igual a 2,0 MPa, como indicado na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável (ABNT NBR 16416/2015)

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	$\geq 35,0^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 20,0^a$	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 2,0^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$	
^a determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT NBR 9781. ^b determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805. ^c determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142.				

No que tange às placas de concreto, deve-se também realizar o ensaio de taxa de infiltração de água de modo a verificar a permeabilidade da placa. Para obter-se os resultados quanto a permeabilidade da placa, deve-se realizar o ensaio descrito no Anexo A da norma ABNT NBR 16416/2015.

O ensaio consiste em verter de uma determinada massa de água de maneira uniforme sobre um anel de infiltração, com diâmetro de 30 cm, posicionado sobre a placa e vedado na parte em contato com a placa com massa de calafetar, para não permitir vazamentos. A altura do nível da água deve ficar entre 1 cm e 1,5 cm acima da superfície da placa. Deve-se medir o intervalo de tempo em que toda a água é escoada e não haja mais água na superfície da placa.

Para determinar a quantidade de água a ser utilizada nos ensaios, primeiro deve ser executada uma pré-molhagem. Ela consiste em despejar água no anel de infiltração até que o nível da água esteja 1,5 cm acima da superfície da placa. Então, é marcado esse intervalo de tempo e a massa de água a ser utilizada no ensaio é determinada de acordo com a Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Determinação da massa de água para o ensaio (ABNT NBR 16416/2015)

Tempo de pré-molhagem s	Massa de água para o ensaio kg
≤ 30	18 ± 0,05
> 30	3,60 ± 0,05

O valor do coeficiente de permeabilidade é obtido a partir da seguinte equação:

$$k = \frac{C*m}{(d^2*t)} \quad (3-2)$$

em que:

k = coeficiente de permeabilidade, expresso em mm/h;

m = massa de água infiltrada, expressa em kg;

d = diâmetro interno do cilindro de infiltração, expresso em mm;

t = tempo necessário para toda a água percolar, expresso em s;

C = fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual a 4.583.666.000.

O pavimento permeável, logo após sua construção, deve apresentar uma permeabilidade maior que 10^{-3} m/s. Dessa forma, espera-se que as placas de concreto permeável que funcionam como revestimento também devem apresentar permeabilidade maior que 10^{-3} m/s, como apresentado na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Determinação do coeficiente de permeabilidade (ABNT NBR 16416/2015)

Tipo de revestimento	Método de Ensaio		Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído m/s
	Local de avaliação		
	Em laboratório	Em campo	
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Anexo A	Anexo A	> 10^{-3}
Peça de concreto permeável	ABNT NBR 13292 ou Anexo A		
Placa de concreto permeável			
Concreto permeável moldado no local			

Conforme indicado na ABNT NBR 16416/2015, a implantação de placas de concreto permeável requer uma camada de assentamento composta de materiais pétreos de granulometria aberta. Para esta camada, deve-se determinar a distribuição granulométrica do material, a resistência à abrasão por meio do ensaio “Los Angeles”, o índice de vazios, o material passante na peneira com abertura de malha 0,075 milímetros (#200) e dimensão máxima característica do agregado.

A determinação da abrasão “Los Angeles” é realizada conforme o prescrito na norma ABNT NBR NM 51/2001. O ensaio consiste na determinação do desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rotações por minuto a 33 rotações por minuto. O desgaste é expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 milímetros (ABNT nº 12).

O índice de vazios, segundo Sousa Pinto (2006), é a relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas, e pode ser determinado a partir da seguinte equação:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (3-3)$$

em que:

e = índice de vazios;

γ_s = peso específico dos sólidos (ou dos grãos);

γ_d = peso específico aparente seco.

O peso específico aparente seco é a relação entre o peso dos sólidos e o volume total, sendo determinado a partir da equação:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1+w} \quad (3-4)$$

em que:

γ_n = peso específico natural;

w = umidade.

O peso específico natural é a relação entre o peso total do solo e seu volume total. Para sua determinação, molda-se um cilindro do solo cujas dimensões conhecidas permitem calcular o volume. Para o presente trabalho, foram moldados corpos-de-prova conforme norma ABNT NBR 6457/1986, sendo realizado o ensaio de compactação para determinação da curva de compactação da amostra conforme norma ABNT NBR 7182/1986. Para o presente trabalho, foi utilizado o cilindro grande, com dimensões apresentadas na Figura 3-3.

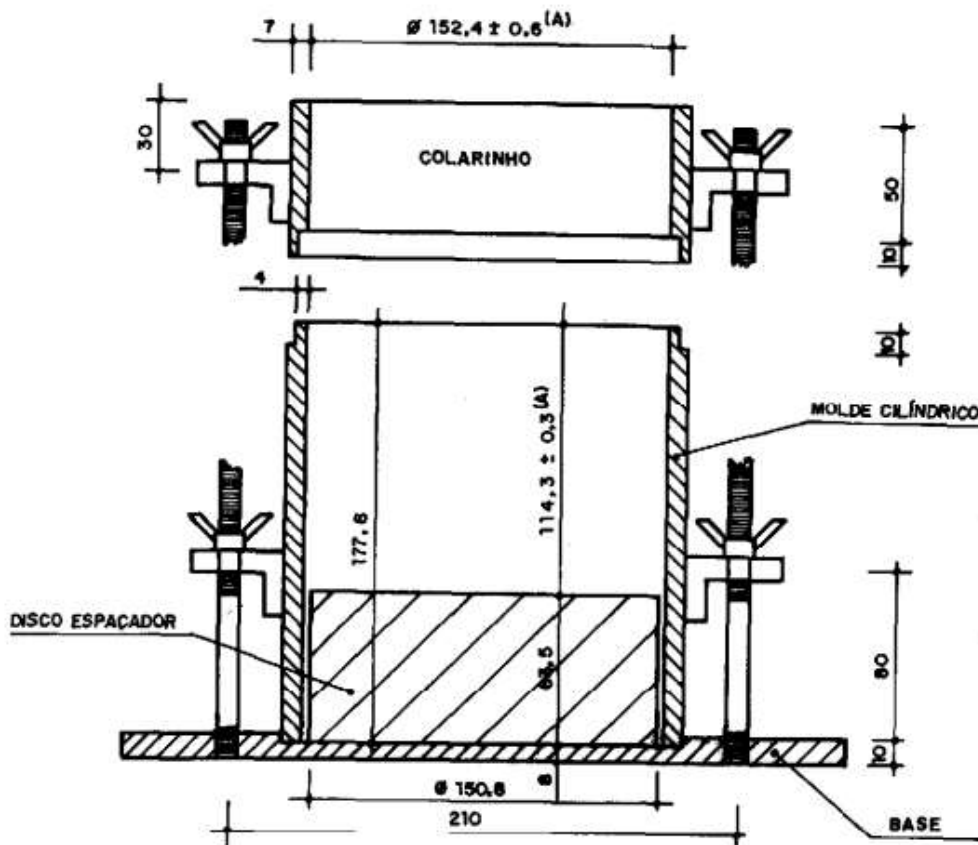


Figura 3-3 – Cilindro grande (ABNT NBR 7182/1986)

Para a energia de compactação, foi utilizada a energia Proctor normal, sendo o número de camadas e o número de golpes determinados conforme norma, apresentados na Tabela 3-4. A opção pela energia normal teve por objetivo manter um volume de vazios compatível com o dimensionamento hidráulico da camada de armazenamento (base) do pavimento permeável.

Tabela 3-4 – Energia de compactação (ABNT NBR 7182/1986)

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

A determinação da dimensão máxima característica do agregado é realizada de acordo com a norma ABNT NBR 7212/2012. Ela corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

A determinação da porcentagem do material passante na peneira #200 ou 0,075 milímetros é realizada conforme prescrito na norma ABNT NBR NM 46/2006.

Para a camada de assentamento, a distribuição granulométrica recomendada é apresentada na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 – Distribuição granulométrica recomendada para a camada de assentamento (ABNT NBR 16416/2015)

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

As características necessárias para o material a ser utilizado na camada de assentamento são apresentadas na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Especificação para o material de assentamento (ABNT NBR 16416/2015)

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão "Los Angeles"	ABNT NBR NM 51	< 40 %
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32 %
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2 %
Dimensão máxima característica (D _{máx})	ABNT NBR 7212	9,5 mm

Para o material componente da base, deve-se determinar a distribuição granulométrica, sendo compatível com a recomendada na ABNT NBR 16416/2015, o volume de vazios para dimensionar a capacidade de armazenamento desta camada, determinar o Índice de Suporte Califórnia, sendo requerido o ensaio de compactação, determinar a resistência à abrasão por meio do ensaio "Los Angeles" e, por fim, determinar a porcentagem do material passante na peneira com abertura de malha 0,075 milímetros (#200).

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia foi realizado conforme norma DNIT 172/2016 – ME, sendo o corpo-de-prova montado de acordo com o montado para a compactação. A sobrecarga utilizada, conforme prescrito em norma, foi superior a 4,536 kg. A prensa utilizada no ensaio deve aplicar uma carga de, aproximadamente 45 N, a uma velocidade de 1,27 mm/minuto (0,05 polegadas/minuto), sendo cada leitura considerada no extensômetro do anel em função da penetração do pistão no solo e do tempo especificado para o ensaio. Para determinação do Índice de Suporte Califórnia, é realizada a razão entre a pressão aplicada no pistão corrigida e a pressão padrão, sendo adotado como valor de ISC o maior valor desta razão para as penetrações de 1,0 ou 2,0 polegadas.

A camada de base/sub-base deve apresentar a distribuição granulométrica recomendada na Tabela 3-7.

Tabela 3-7 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de sub-base e/ou base (ABNT NBR 16416/2015)

Peneira com abertura de malha	Porcentagem retida, em massa	
	%	
	Sub-base	Base
75 mm	0	—
63 mm	0 a 10	—
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

O material da camada de base/sub-base deve obedecer às especificações relacionadas na Tabela 3-8.

Tabela 3-8 – Especificação para o material de sub-base e/ou base (ABNT NBR 16416/2015)

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 com abertura de malha de 0,075 mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2 %

Para o subleito foram realizados os ensaios de caracterização do solo, determinação da taxa de infiltração do solo por meio de ensaios de permeabilidade e, por fim, a determinação do Índice de Suporte Califórnia por meio do ensaio de penetração de cone.

Esses ensaios foram realizados no estacionamento do prédio destinado a Unidade de Laboratórios de Ensino e Graduação da Faculdade de Tecnologia - ULEG-FT, localizado no Campus Universitário Darcy Ribeiro, em Brasília/DF. A Figura 3-4 apresenta uma representação do estacionamento.

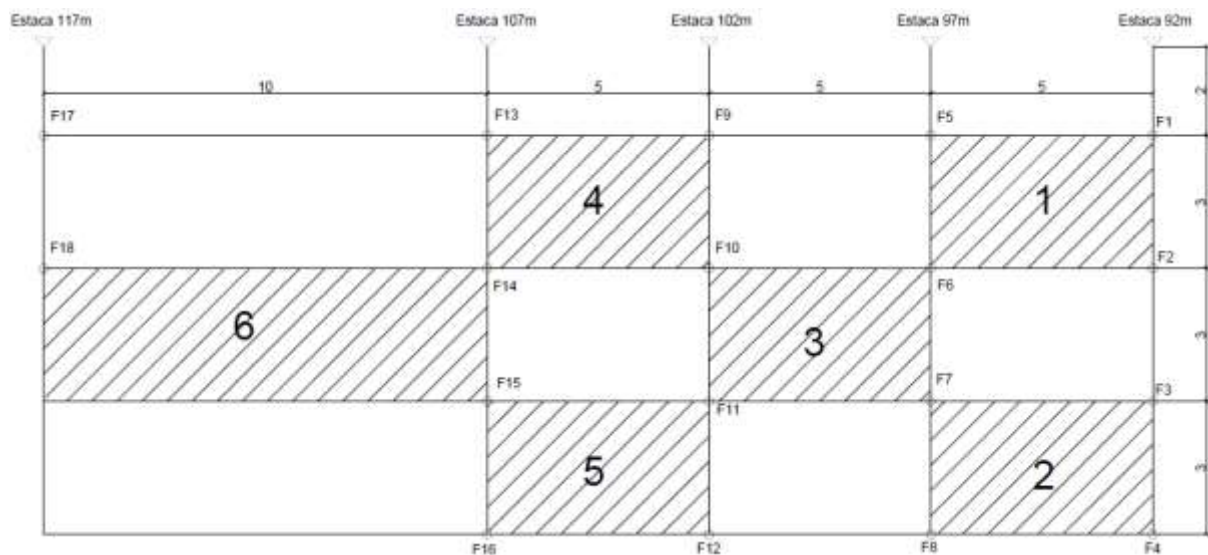


Figura 3-4 – Representação do estacionamento em estudo

Diferentemente do material da camada de base, a determinação do Índice de Suporte Califórnia do solo foi feita com a utilização do ensaio de penetração de cone ou ensaio DCP – *Dynamic Cone Penetration*. O ensaio consiste na aplicação de golpes com um martelo de 8 kg de massa sobre um cone de aço, fazendo com que ele penetre o solo e medindo-se a penetração a cada golpe. Os dados obtidos foram correlacionados com o CBR baseado em pesquisas experimentais realizadas por Carvalho (2005), após as devidas calibrações para o solo local da área de estudo. Esse ensaio foi realizado em 18 pontos, representados na Figura 3-4 como F1 a F18. A Figura 3-5 apresenta um esquema representativo do aparelho utilizado no ensaio.

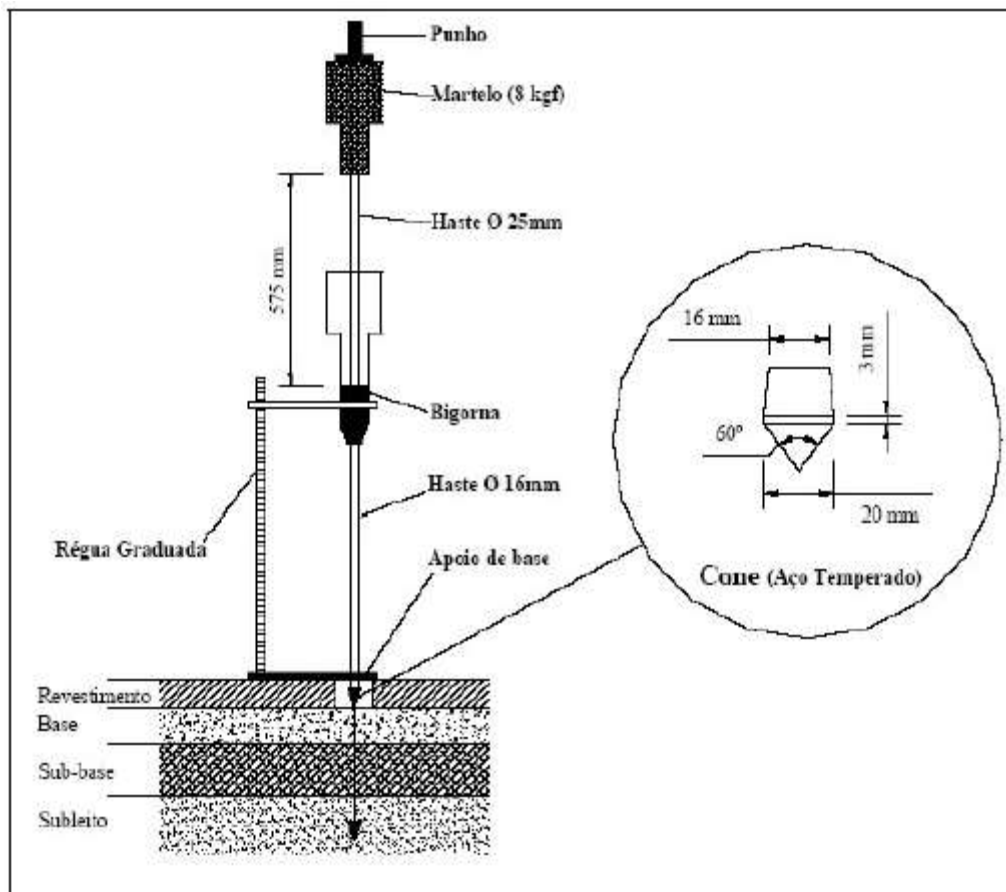


Figura 3-5 – Esquemática do DCP (CARVALHO, 2005)

A permeabilidade do subleito foi determinada por dois ensaios *in situ*, o ensaio da capacidade de infiltração do solo através de infiltrômetros e o método de ensaio de Porchet. Esses ensaios foram executados no ponto central das áreas hachuradas representadas na Figura 3-4, numeradas de 1 a 6. Cabe ressaltar que no ensaio de Porchet o buraco escavado teve dimensões de 30 cm de diâmetro e 70 cm de profundidade, e o tempo cronometrado foi relativo ao rebaixamento de 30 cm do nível da água.

A caracterização do solo do subleito foi realizada por meio de ensaios para a determinação do seu limite de liquidez, limite de plasticidade e sua distribuição granulométrica, além da determinação de seu índice de grupo. A preparação das amostras para a execução desses ensaios foi realizada de acordo com a Norma DNER-ME 041/94.

Para a determinação do limite de liquidez é executado o método de ensaio descrito pela Norma DNER-ME 122/94. Primeiramente, homogeneiza-se a amostra de solo acrescentando certa quantidade de água. Então, uma parte dessa amostra é colocada na concha do Aparelho de Casagrande, apresentado na Figura 3-5, de forma a preencher

aproximadamente $\frac{2}{3}$ da superfície da concha e ter uma espessura de aproximadamente 1 cm no ponto de máxima espessura.

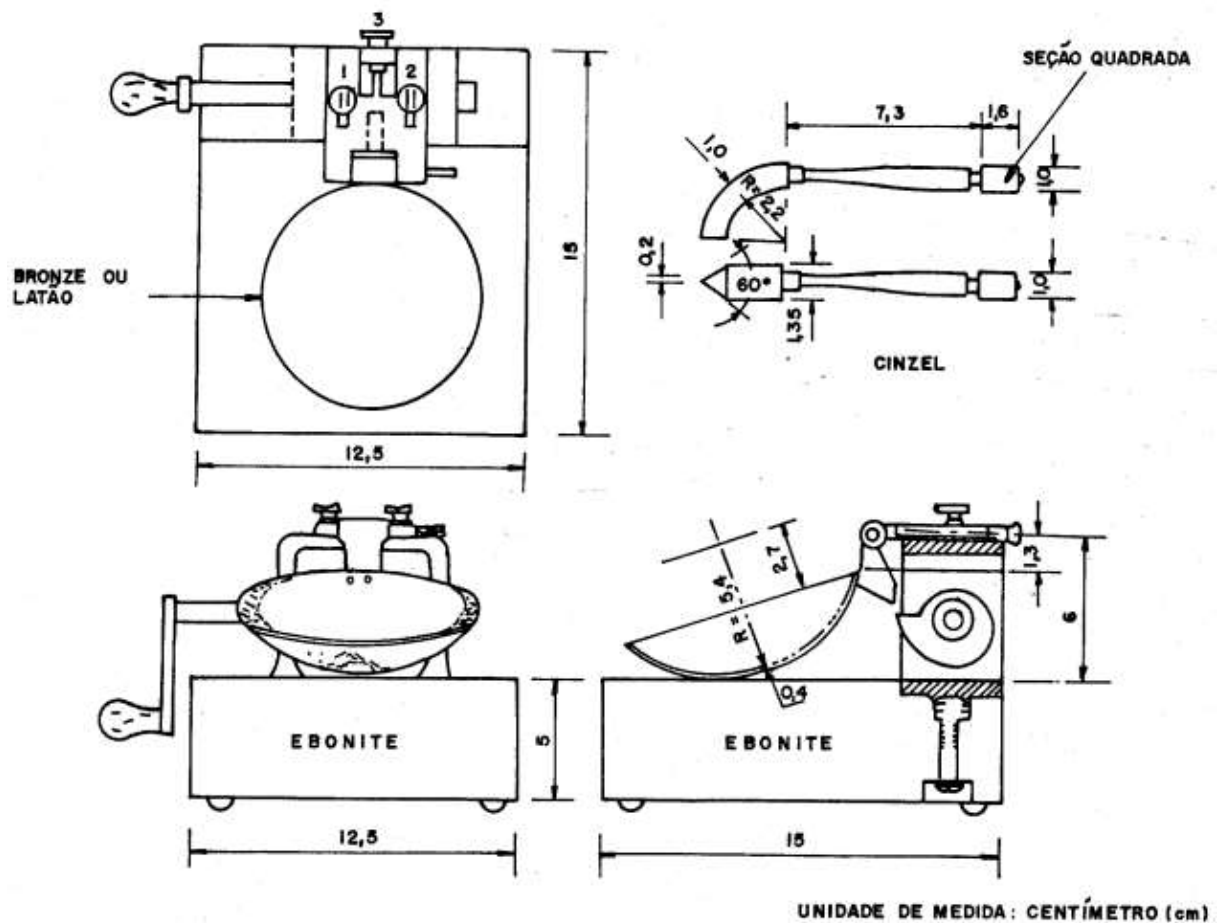


Figura 3-6 – Aparelho de Casagrande e cinzel utilizados para determinação do limite de liquidez (DNER – ME 122/94)

Em seguida, é utilizado um cinzel, também representado na Figura 3-6, para abrir uma canalura na massa de solo, no eixo de simetria do aparelho. Por fim, liga-se o aparelho para que a concha golpeie contra a base até que as duas bordas inferiores da canalura se unam. A Figura 3-7 apresenta a situação da massa de solo antes e após o ensaio.

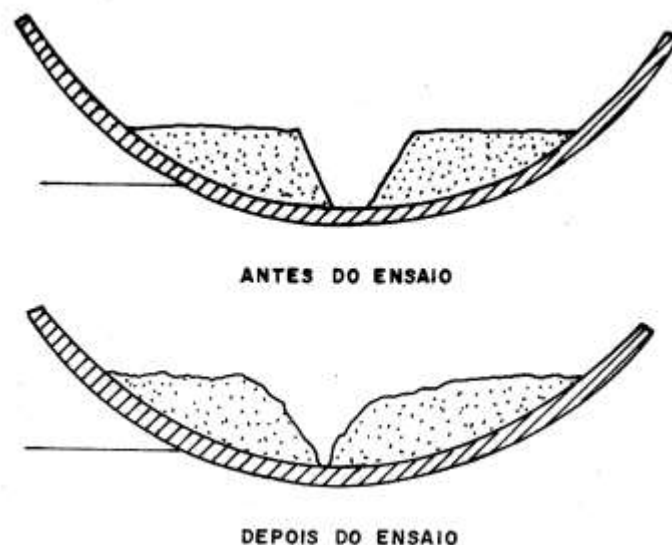


Figura 3-7 – Situação da massa de solo antes e depois do ensaio (DNER – ME 122/94)

O número de golpes necessários para essa união é anotado e uma parte da amostra é utilizada para obter-se seu teor de umidade. Esse procedimento é repetido mais 3 vezes, com umidades diferentes, a fim de se obter uma curva que relacione o número de golpes com a umidade da amostra. O valor do limite de liquidez é o teor de umidade correspondente a 25 golpes.

Para a determinação do limite de plasticidade do solo, é executado o ensaio proposto na Norma DNER-ME 082/94. Primeiramente, é adicionada água à amostra e ela é homogeneizada até obter-se uma massa plástica. Então, separa-se aproximadamente 20 g da amostra homogeneizada e ela é rolada entre os dedos e uma placa de vidro, moldando-a na forma de um cilindro de diâmetro uniforme até obter-se um cilindro com diâmetro de 3 mm. Então, esse cilindro é quebrado, amassado e repete-se o processo até que o solo se desagregasse com a pressão necessária para a formação de um novo cilindro. Ao atingir essa situação, mede-se o teor de umidade dos fragmentos de solo. Esse processo é repetido mais algumas vezes e o valor do limite de plasticidade é a média dos valores obtidos.

A distribuição granulométrica do solo foi obtida conforme o ensaio apresentado na Norma DNER-ME 051/94. Primeiramente peneira-se a amostra na peneira de abertura de 2,0 mm. O material retido nela, em seguida, é passado nas peneiras com abertura de 50 - 38 - 25 - 19 - 9,5 - 4,8 e 2,0 mm. Já do material que passou nela, são separados 140 g para o processo de sedimentação, sendo 70 g para a sedimentação com defloculante e 70 g para a sedimentação sem defloculante. Ao fim do processo de sedimentação, o material é passado

nas peneiras com abertura de 1,2 - 0,6 - 0,42 - 0,30 - 0,15 e 0,075 mm. Dessa forma, anota-se a massa de solo retida em cada peneira e obtém-se a curva granulométrica do solo.

Cabe ressaltar que a norma ABNT NBR 16416/2015 estabelece que os pavimentos compostos por placas de concreto permeável não apresentam intertravamento, conseqüentemente não necessitam de rejunte.

Ao final dos ensaios, serão analisados os dados obtidos e dimensionado hidráulico do pavimento permeável de acordo com o Anexo B da norma ABNT NBR 16416/2015.

O dimensionamento mecânico de um pavimento permeável deve ser feito conforme métodos reconhecidos e apropriados a cada tipo de revestimento.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS

4.1.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os dados obtidos no ensaio de tração na flexão são apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão

Corpo de Prova	F (N)	l (mm)	b (mm)	d (mm)	fct (MPa)
1	12980,00	240,00	83,20	77,03	6,31
2	9520,00	240,00	80,00	76,57	4,87
3	8650,00	240,00	83,37	77,17	4,18
4	11390,00	240,00	82,03	77,00	5,62
					Média = 5,25 MPa
					Desvio = 0,80 MPa

Comparando os valores obtidos com o exigido pela norma, apresentado na Tabela 3-1, percebe-se que as resistências à tração na flexão de todos os corpos de prova são superiores ao mínimo de 2,0 MPa exigido.

4.1.2. PERMEABILIDADE

O tempo de pré-molhagem de todas as placas ensaiadas foi de aproximadamente 10 segundos, portanto, de acordo com a Tabela 3-2, foi utilizada uma massa de 18 kg para os ensaios. Os resultados são apresentados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 – Dados obtidos nos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade

Placa	m (kg)	d (mm)	t (s)	k (mm/h)	k (m/s)
1	18	300	175,91	5210,218	1,45E-03
2	18	300	234,66	3910,117	1,09E-03
3	18	300	166,32	5514,926	1,53E-03
				Média = 1,36E-03	
				Desvio = 1,93E-04	

Conforme apresentado na Tabela 3-3, a placa do pavimento permeável deve apresentar uma permeabilidade maior que 10^{-3} m/s. Pode-se observar nos resultados obtidos para esse ensaio que a permeabilidade nos três corpos de prova que foram ensaiados superou o requisito da norma ABNT NBR 16416.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA DE BASE

4.2.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica do material a ser utilizado na camada de base foi realizada pelo engenheiro Igor Amorim Beja em sua tese de doutorado em andamento: “Projeto de Mistura Asfáltica a Quente (MAQ)”Binder” Faixa 4 – SPV 25,0”.

Conforme apresentado na Tabela 3-7, a norma ABNT NBR 16416 recomenda uma distribuição granulométrica apropriada para a camada de base. Para tanto, a mistura final obtida foi de 5% de brita 2, 65% de brita 1 e 30% de pedrisco. A Tabela 4-3 apresenta a relação da mistura final obtida.

Tabela 4-3 – Curva da mistura da camada de base

Definição da curva da mistura Camada de Base												
Peneira N°		Brita 2	Brita 1	Pedrisco	Pó grosso	Pó fino	Cal hidratada	Mistura Final Obtida	Erro (%)	Faixa Especificada		
		CERTIFICADO N° 109/2016	CERTIFICADO N° 110/2016	CERTIFICADO N° 111/2016	CERTIFICADO N° 112/2016	CERTIFICADO N° 113/2016	CERTIFICADO N° 423/2015			Lim. Inferior	Lim. Superior	Ideal
ASTM	mm	(%) Pass	(%) Pass	(%) Pass	(%) Pass	(%) Pass	(%) Pass					
2"	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	0,0	100	100	100
1 1/2"	37,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	0,0	100	100	100
1"	25	38,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97	0,5	95	100	97,5
3/4"	19	4,10	89,20	100,00	100,00	100,00	100,00	90	7,5	65	100	82,5
1/2"	12,5	0,20	18,20	100,00	100,00	100,00	100,00	42	0,5	25	60	42,5
N° 4	4,75	0,20	0,30	32,90	99,80	99,90	100,00	10	5,0	0	10	5
N° 10	2	0,20	0,30	6,40	53,10	71,10	100,00	2	0,5	0	5	2,5
N° 40	0,42	0,10	0,30	5,10	16,20	38,40	94,00	2	0,5	0	5	2,5
N° 80	0,18	0,10	0,30	5,00	9,50	24,30	88,00	2	0,5	0	5	2,5
N° 200	0,075	0,10	0,30	4,90	7,90	13,90	84,00	2	1,0	0	2	1
Percentual dos materiais		5,00%	65,00%	30,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,0%	16			

A Figura 4-1 apresenta o gráfico que representa os resultados obtidos no ensaio, sendo as curvas em azul os limites superiores e inferiores obtidos em norma e a curva em preto a distribuição granulométrica final da mistura.

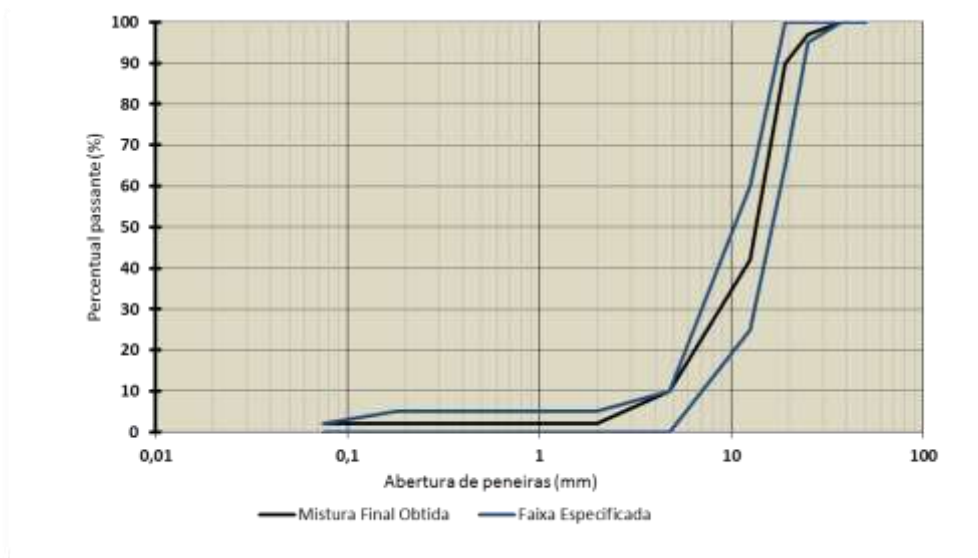


Figura 4-1 – Curva da mistura da camada de base

Para a camada de base em estudo, tem-se que a distribuição granulométrica da mistura de 5% de brita 2, 65% de brita 1 e 30% de pedrisco está dentro dos limites recomendados pela norma ABNT NBR 16416, sendo, portanto, adotada para os demais ensaios a serem realizados na camada em questão.

4.2.2. ABRASÃO “LOS ANGELES”

A abrasão “Los Angeles” do material a ser utilizado na camada de base foi realizada pelo engenheiro Igor Amorim Beja em sua tese de doutorado em andamento: “Projeto de

Mistura Asfáltica a Quente (MAQ) "Binder" Faixa 4 – SPV 25,0". O resultado obtido para a abrasão "Los Angeles" do material foi de 18%.

Quanto à abrasão "Los Angeles", conforme ilustrado na Tabela 3-8 deste trabalho, o material deve possuir uma abrasão menor ou igual a 40%. Nos ensaios realizados, encontrou-se o valor de 18%, valor este em conformidade com a norma.

4.2.3. ÍNDICE DE VAZIOS

Para determinação da curva de compactação, desprezou-se o material retido na peneira 19,1 mm, conforme previsto em norma, não se fazendo necessário substituição por agregado de outras dimensões dado ao fato do material retido não representar valor superior a 10% do peso total da amostra. Desta forma, a brita 1 representa 68,42% da massa total da amostra e o pedrisco 31,58%. Assim, o peso específico dos sólidos da mistura pode ser determinado conforme a equação que segue:

$$\gamma_s = \frac{1}{\left(\frac{\%b_1}{\gamma_{sb1}} + \frac{\%p}{\gamma_{sp}}\right)} \quad (4-1)$$

em que:

$\%b_1$ = porcentagem de brita 1 da amostra;

$\%p$ = porcentagem de pedrisco da amostra;

γ_{sb1} = peso específico dos sólidos da brita 1;

γ_{sp} = peso específico dos sólidos do pedrisco.

Os pesos específicos dos agregados a serem utilizados na camada de base foram obtidos pelo engenheiro Igor Amorim Beja em sua tese de doutorado em andamento: "Projeto de Mistura Asfáltica a Quente (MAQ) "Binder" Faixa 4 – SPV 25,0". Para o presente trabalho, tem-se que:

$$\gamma_{sb1} = 2,725 \text{ g/cm}^3 \quad \gamma_{sp} = 2,726 \text{ g/cm}^3$$

Portanto, o peso específico dos sólidos da mistura é 2,725 g/cm³.

A curva de compactação é construída com base na determinação do peso específico aparente seco para teores de umidade variáveis, a partir do peso específico natural. No presente trabalho, adotou-se como valor inicial de umidade a adição de 1% de água na massa da amostra seca ao ar, sendo incrementados valores de 1% a cada novo ensaio, ou seja, o segundo ensaio foi realizado com 2% de água na massa da amostra seca ao ar, o terceiro com 3% e assim sucessivamente.

Determinada curva de compactação da mistura da camada de base, procedeu-se ao cálculo do índice de vazios, conforme a Equação 3-3. Os resultados encontrados para a camada de base se encontram na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 – Índice de vazios para a mistura da camada de base

Ensaio	w	γ_n (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)	e
1	0,95%	1,633	1,617	2,725	68,53%
2	1,69%	1,656	1,629		67,30%
3	1,94%	1,667	1,635		66,70%
4	1,95%	1,658	1,627		67,54%

Com relação ao índice de vazios, a mistura deve possuir valor superior a 32% de forma a permitir a camada de base a funcionar como uma espécie de reservatório e evitar a acumulação de água na superfície do pavimento. Para a energia normal de compactação e umidade de 2%, obteve-se um índice de vazios de 68%, valor superior ao normatizado. Em retrospectiva, talvez fosse possível adotar a energia Proctor Intermediária e, ainda assim atender aos requisitos de vazios da camada de armazenamento ao mesmo tempo que haveria um ganho de resistência em termos de CBR.

4.2.4. MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA #200

A porcentagem do material passante na peneira de abertura 0,075 milímetros (#200) do material a ser utilizado na camada de base foi realizada pelo engenheiro Igor Amorim Beja em sua tese de doutorado em andamento: “Projeto de Mistura Asfáltica a Quente (MAQ) Binder” Faixa 4 – SPV 25,0”.

Conforme apresentado na Tabela 3-8 deste presente trabalho, a norma ABNT NBR 16416 recomenda que a porcentagem de material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 milímetros seja menor ou igual a 2% (dois por cento). Na Tabela 4-3 deste documento, tem-se que a porcentagem de material passante na peneira em questão é de 2% (dois por cento), portanto, no limite da norma.

4.2.5. ÍNDICE DE SUPORTE CALIFORNIA (ISC)

Conforme normatizado, foi traçada a curva penetração x pressão aplicada no pistão, sendo feita a correção da pressão conforme apresentado no Anexo B da norma DNIT 172/2016 e ilustrado abaixo pela Figura 4-2. A curva obtida para a brita utilizada é apresentada na Figura 4-3.

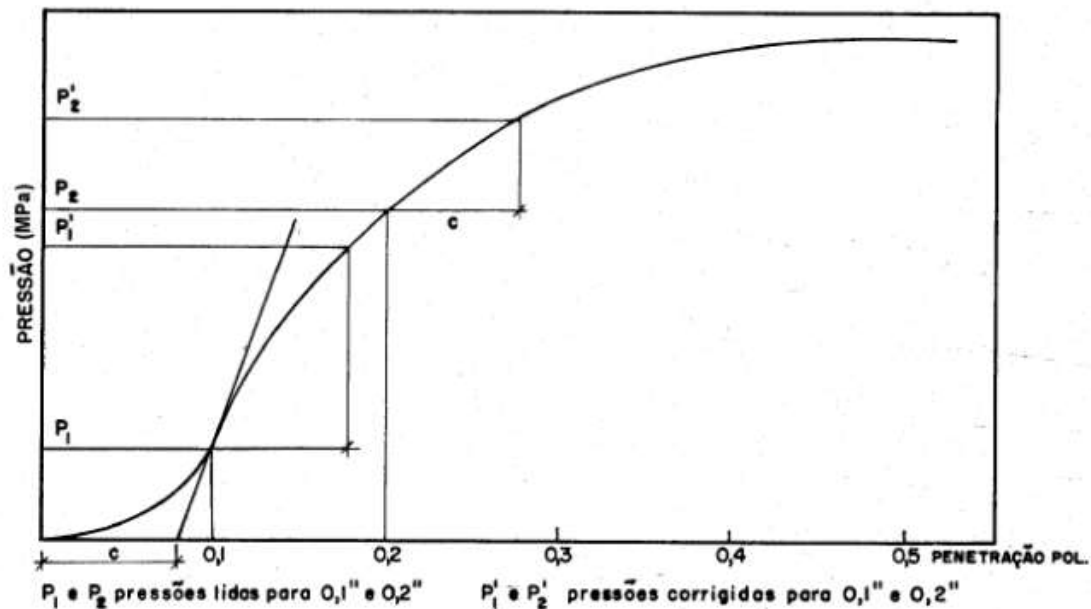


Figura 4-2 – Gráfico de correção (DNIT 172/2016 – ME)

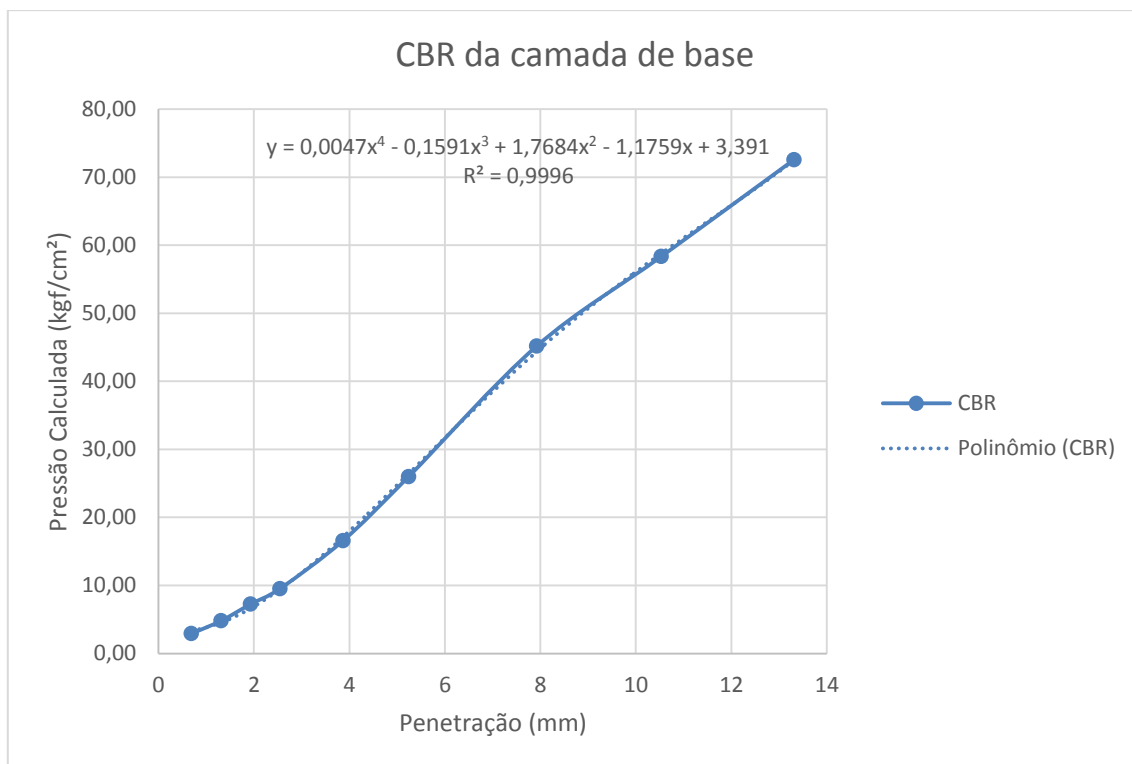


Figura 4-3 – Curva penetração x pressão aplicada no pistão

Conforme apresentado na Tabela 4-5, o ISC da mistura da camada de base é de 29,59%.

Tabela 4-5 – Resultados do ensaio CBR para mistura da camada de base

Tempo min	Penetração		Pressão Padrão kgf/cm ²	Leitura no Extensômetro mm	Molde nº		ISC %
	mm	pol			Pressão		
					Calculada kgf/cm ²	Corrigida kgf/cm ²	
0,5	0,63	0,025	-	0,687	2,90	4,72	-
1	1,27	0,050	-	1,312	4,81	6,91	-
1,5	1,90	0,075	-	1,928	7,25	9,78	-
2	2,54	0,100	70,31	2,543	9,52	13,19	18,76
3	3,81	0,150	-	3,863	16,56	21,68	-
4	5,08	0,200	105,46	5,239	25,98	31,21	29,59
6	7,62	0,300	131,58	7,925	45,18	48,65	36,98
8	10,16	0,400	161,71	10,531	58,33	62,57	38,69
10	12,70	0,500	182,80	13,312	72,56	77,51	42,40

Conforme apresentado na Tabela 4-5, o ISC da mistura da camada de base é de 29,59%, valor inferior ao mínimo de 80% recomendado pela norma ABNT NBR 16416, conforme apresentado na Tabela 3-8. A utilização da mistura para a energia de compactação escolhida, eventualmente ocasionará problemas estruturais no pavimento.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA DE ASSENTAMENTO

4.3.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica do material a ser utilizado na camada de assentamento foi realizada pelo engenheiro Igor Amorim Beja em sua tese de doutorado em andamento: “Projeto de Mistura Asfáltica a Quente (MAQ) Binder” Faixa 4 – SPV 25,0”. Os agregados graúdos utilizados em seus ensaios foram obtidos da pedra Sarkis, e seu código é PES-SARKIS-SPV 25-INFRA-2-2017.

Conforme exposto na Tabela 3-5, a norma ABNT NBR 16416 recomenda uma distribuição granulométrica apropriada para a camada de assentamento. Para tanto, a mistura final obtida foi de 100% pedrisco. A Tabela 4-6 apresenta a relação da mistura final obtida.

Tabela 4-6 – Curva da mistura da camada de assentamento

Definição da curva da mistura Camada de Assentamento												
Peneira N°		Brita 2	Brita 1	Pedrisco	Pó grosso	Pó fino	Cal hidratada	Mistura Final Obtida	Erro (%)	Faixa Especificada		
ASTM	mm	CERTIFICADO N° 109/2016 (%) Pass	CERTIFICADO N° 110/2016 (%) Pass	CERTIFICADO N° 111/2016 (%) Pass	CERTIFICADO N° 112/2016 (%) Pass	CERTIFICADO N° 113/2016 (%) Pass	CERTIFICADO N° 423/2015 (%) Pass			Lim. Inferior	Lim. Superior	Ideal
2"	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	0,0	100	100	100
1 1/2"	37,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	0,0	100	100	100
1"	25	38,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	0,0	100	100	100
3/4"	19	4,10	89,20	100,00	100,00	100,00	100,00	100	0,0	100	100	100
1/2"	12,5	0,20	18,20	100,00	100,00	100,00	100,00	100	0,0	100	100	100
3/8"	9,5	0,20	1,00	89,50	100,00	100,00	100,00	90	2,5	85	100	92,5
N° 4	4,75	0,20	0,30	32,90	99,80	99,90	100,00	33	13,0	10	30	20
N° 10	2	0,20	0,30	6,40	53,10	71,10	100,00	6	1,0	0	10	5
N° 40	0,42	0,10	0,30	5,10	16,20	38,40	94,00	5	2,5	0	5	2,5
N° 80	0,18	0,10	0,30	5,00	9,50	24,30	88,00	5	2,5	0	5	2,5
N° 200	0,075	0,10	0,30	4,90	7,90	13,90	84,00	5	2,5	0	5	2,5
Percentual dos materiais		0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,0%	24			

A Figura 4-4 apresenta o gráfico com os resultados obtidos no ensaio, sendo as curvas em azul os limites superiores e inferiores obtidos em norma e a curva em preto a distribuição granulométrica final da mistura.

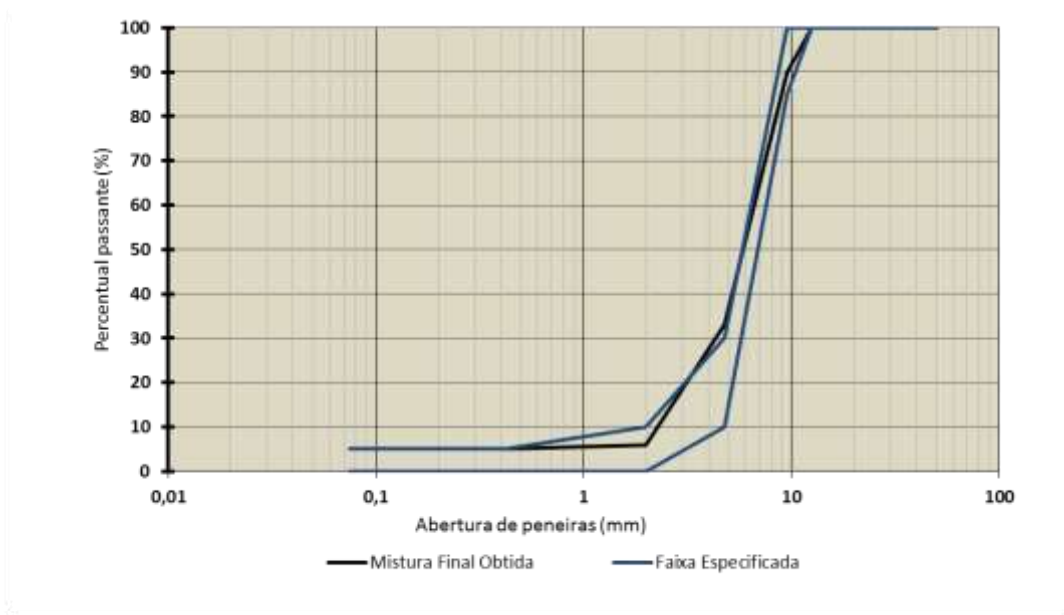


Figura 4-4 – Curva do material da camada de assentamento

Para a camada de assentamento em estudo, temos que a distribuição granulométrica do material (100% pedrisco) ultrapassa o limite superior da faixa especificada pela norma ABNT NBR 16416. No entanto, adotou-se este material para os demais ensaios a serem realizados na camada em questão.

4.3.2. ABRASÃO “LOS ANGELES”

A abrasão “Los Angeles” do material a ser utilizado na camada de base foi realizada pelo engenheiro Igor Amorim Beja em sua tese de doutorado em andamento: “Projeto de Mistura Asfáltica a Quente (MAQ)”Binder” Faixa 4 – SPV 25,0”. O resultado obtido para a abrasão “Los Angeles” do material é de 18%.

Conforme apresentado na Tabela 3-6, o material deve possuir uma abrasão menor ou igual a 40%. Nos ensaios realizados, encontrou-se o valor de 18%, valor este em conformidade com a norma.

4.3.3. ÍNDICE DE VAZIOS

O peso específico do agregado a ser utilizado na camada de assentamento foi obtido pelo engenheiro Igor Amorim Beja em sua tese de doutorado em andamento: “Projeto de

Mistura Asfáltica a Quente (MAQ) "Binder" Faixa 4 – SPV 25,0". Para o presente trabalho, tem-se que:

$$\gamma_{sp} = 2,726 \text{ g/cm}^3$$

Determinada curva de compactação da mistura da camada de base, procedeu-se ao cálculo do índice de vazios, conforme a Equação 3-3. Os resultados encontrados para a camada de base se encontram na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 – Índice de vazios para a mistura da camada de assentamento

Ensaio	w	γ_n	γ_d	γ_s	e
1	0,92%	1,596	1,581	2,726	72,41%
2	1,83%	1,628	1,599		70,48%
3	2,34%	1,614	1,577		72,82%
4	2,89%	1,634	1,588		71,65%

Com relação ao índice de vazios, a mistura deve possuir valor superior a 32%, conforme norma, e recomenda-se valor superior ao índice de vazios da camada de base de modo a evitar que a camada de assentamento funcione como reservatório, sendo esta função da camada de base. Para a energia normal de compactação e umidade de 2%, obteve-se um índice de vazios de 71,65%, valor superior ao normatizado.

4.3.4. DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO

Conforme apresentado na Tabela 4-8, a dimensão máxima característica do material a ser utilizado na camada de assentamento é 12,5 mm.

Tabela 4-8 – Dimensão máxima característica do material a ser utilizado na camada de assentamento

Peneira N°		Pedrisco	%retida acumulada
		CERTIFICADO N° 111/2016	
ASTM	mm	(%) Pass	
2"	50	100,00	0,00
1 1/2"	37,5	100,00	0,00
1"	25	100,00	0,00
3/4"	19	100,00	0,00
1/2"	12,5	100,00	0,00
3/8"	9,5	89,50	10,50
N° 4	4,75	32,90	67,10
N° 10	2	6,40	93,60
N° 40	0,42	5,10	94,90
N° 80	0,18	5,00	95,00
N° 200	0,075	4,90	95,10

A dimensão máxima característica do material deve ser de 9,5 mm. No entanto, o material em questão apresenta como resultado o valor de 12,5 mm. Para atender a esse requisito da norma, seria necessário compor uma mistura de pedrisco e pó de brita grosso. No entanto, ao se realizar essa mistura, seriam ultrapassados os limites da distribuição granulométrica recomendada, conforme figura 4-3.

A Figura 4-5 apresenta o gráfico com os resultados obtidos para uma mistura de 50% de pedrisco e 50% de pó de brita grosso, capaz de atender ao requisito da norma quanto à dimensão máxima característica, sendo as curvas em azul os limites superiores e inferiores obtidos em norma e a curva em preto a distribuição granulométrica final da mistura.

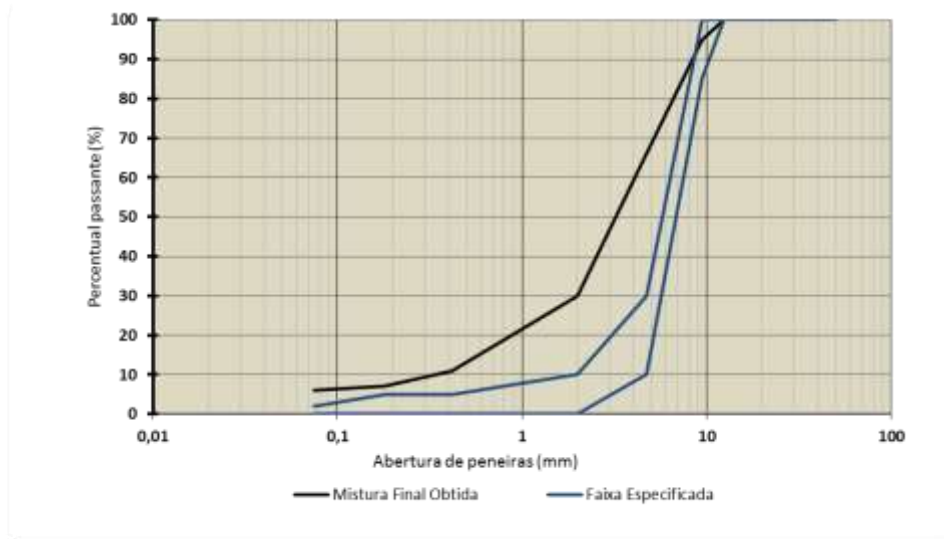


Figura 4-5 – Curva da mistura hipotética 1 da camada de assentamento

Nota-se que a curva é bastante discrepante quanto aos limites recomendados por norma, sendo, portanto, descartado para análise e mantido a utilização de uma camada de assentamento composta unicamente por pedrisco.

4.3.5. MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA #200

A porcentagem do material passante na peneira de abertura 0,075 mm (#200) do material a ser utilizado na camada de assentamento foi realizada pelo engenheiro Igor Amorim Beja em sua tese de doutorado em andamento: “Projeto de Mistura Asfáltica a Quente (MAQ)”Binder” Faixa 4 – SPV 25,0”.

Conforme apresentado na Tabela 3-6, a norma ABNT NBR 16416 recomenda que a porcentagem de material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 milímetros seja menor ou igual a 2% (dois por cento). Na Tabela 4-6 deste documento, tem-se que a porcentagem de material passante na peneira em questão é de 5% (cinco por cento), superior ao recomendado pela norma.

Com relação ao material passante na peneira #200, encontra-se outro problema. Conforme recomendado em norma, esse valor deve ser igual ou inferior a 2%, sendo encontrado para o material utilizado o valor de 5%. Fazendo uma análise similar ao efetuado para dimensão máxima característica, deveria ser montada uma mistura composta em 55% de

brita 1 e 45% de pedrisco, com a finalidade de obtermos 2% de material passante na peneira #200.

A Figura 4-6 apresenta o gráfico com os resultados obtidos para tal mistura, sendo as curvas em azul os limites superiores e inferiores obtidos em norma e a curva em preto a distribuição granulométrica final da mistura.

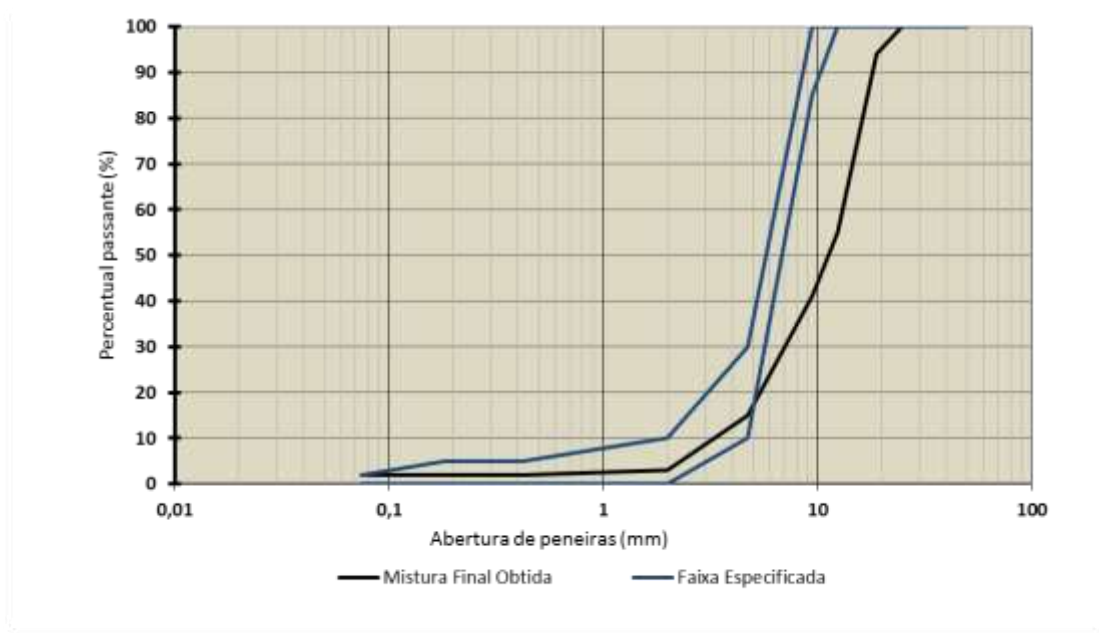


Figura 4-6 – Curva da mistura hipotética 2 da camada de assentamento

Nota-se que a curva também é bastante discrepante quanto aos limites recomendados por norma, sendo, portanto, descartado para análise e mantido a utilização de uma camada de assentamento composta unicamente por pedrisco. Vale ressaltar que a grande quantidade de material fino na camada de assentamento é prejudicial à permeabilidade do sistema, pois provoca a colmatção da camada de assentamento. Em razão do exposto, é necessário um trabalho junto à pedreira a fim de alcançar as especificações necessárias para esse material.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO SUBLEITO

4.4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Os resultados obtidos para o ensaio do limite de liquidez são apresentados na Tabela 4-9 e a curva relacionando a umidade e o número de golpes é apresentada na Figura 4-7.

Tabela 4-9 – Resultados limite de liquidez

Tara	M0	M1	h	Golpes
11,83	16,89	15,5	37,9%	30
12,33	22,26	19,41	40,3%	21
16,71	25,96	23,22	42,1%	18
16,34	29,49	25,52	43,2%	12

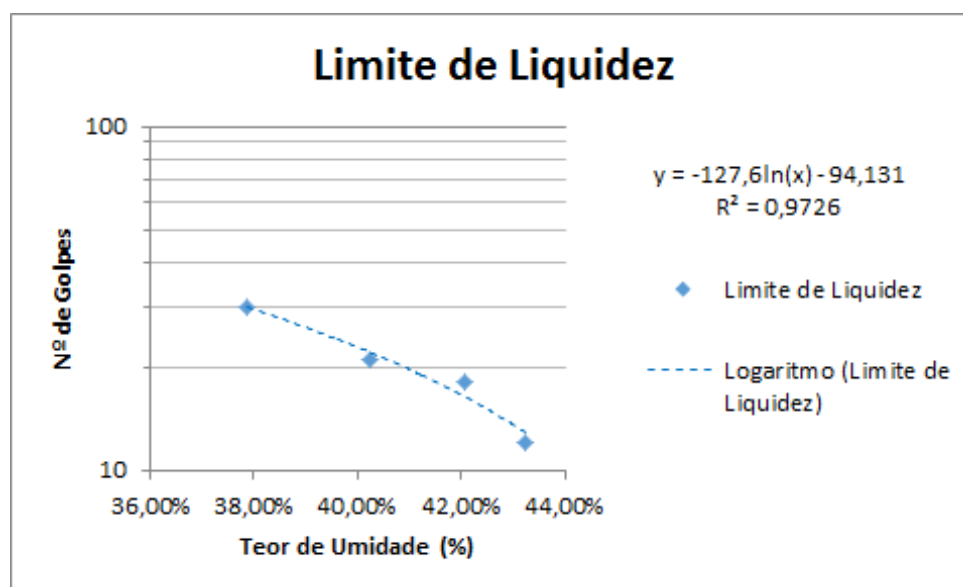


Figura 4-7 – Curva do Limite de liquidez do solo

Utilizando a equação da curva apresentada, conclui-se que o limite de liquidez do solo é de 39%.

Os resultados obtidos no ensaio para a obtenção do limite de plasticidade do solo são apresentados na Tabela 4-10. O valor do limite de plasticidade é a média dos valores obtidos.

Tabela 4-10 – Resultados limite de plasticidade

Cápsula	Tara	M0	M1	h
154	7,45	10,59	9,89	28,69%
155	7,95	10,08	9,61	28,31%
157	6,02	9,61	8,82	28,21%
178	8,84	12,71	11,85	28,57%
				Média= 28,41%
				Desvio = 0,20%

O índice de plasticidade do solo é dado pela diferença entre o valor do seu limite de liquidez e seu limite de plasticidade. Portanto, o índice de plasticidade do solo em questão é igual a 11%.

A partir dos resultados dos ensaios de granulometria, os quais são apresentados no Apêndice A, foi possível obter uma curva média granulométrica do solo, a partir da média dos valores de massa de material passante em cada peneira em cada um dos ensaios, com e sem defloculante. As Tabelas 4-11 e 4-12 apresentam as distribuições granulométricas médias obtidas, com e sem defloculante. A Figura 4-8 apresenta a representação gráfica dessas curvas.

Tabela 4-11 – Curva média sem defloculante

Peneira #	Diâmetro (mm)	% retida	% retida acumulada	% passante
3/8"	19,5	0%	0%	100%
4	4,8	0%	0%	99%
10	2	0%	0%	99%
16	1,18	6%	6%	93%
30	0,6	13%	19%	83%
40	0,425	11%	31%	73%
50	0,3	10%	40%	64%
100	0,15	20%	60%	45%
200	0,075	13%	73%	31%

Tabela 4-12 – Curva média com defloculante

Peneira #	Diâmetro (mm)	% retida	% retida acumulada	% passante
3/8"	19,5	0%	0%	100%
4	4,8	0%	0%	99%
10	2	0%	0%	99%
16	1,18	6%	6%	97%
30	0,6	13%	19%	92%
40	0,425	11%	31%	88%
50	0,3	10%	40%	82%
100	0,15	20%	60%	68%
200	0,075	13%	73%	56%

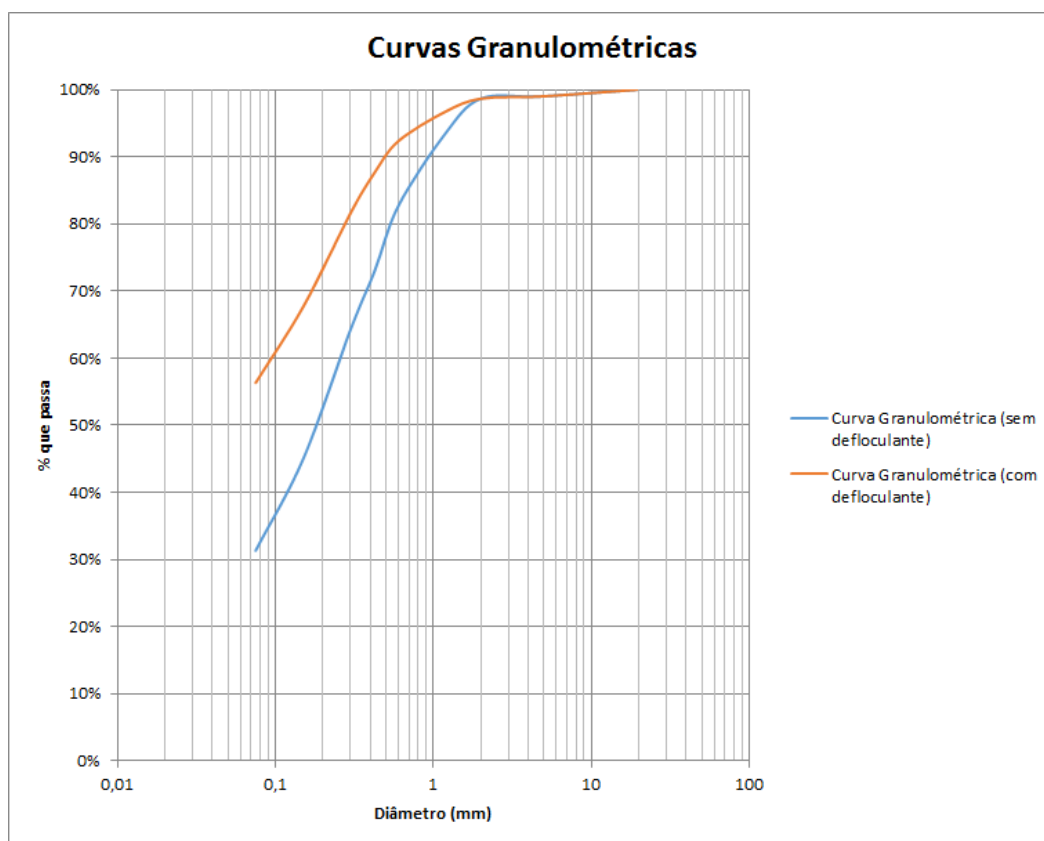


Figura 4-8 – Curvas granulométricas médias do solo, com e sem defloculante

O índice de grupo do solo é determinado de acordo com a seguinte equação, apresentada no Manual de Pavimentação do DNIT, de 2006. Esse valor retrata o duplo aspecto de plasticidade e graduação das partículas do solo.

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (4-2)$$

em que:

a = % de material que passa na peneira nº 200, menos 35. Se a % obtida nessa 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 nº 200, menos 15. Se a % obtida nessa 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).

Para a curva granulométrica sem defloculante, tem-se que $a = 0$, $b = 16\%$, $c = 0$ e $d = 18\%$. Aplicando esses valores na Equação 4-2, tem-se que o IG do solo sem defloculante é de 2,88. De posse do Índice de Grupo é possível estimar o Índice de Suporte Califórnia (CBR_{IG}) do subleito de acordo com a tabela 4-13, retirada do Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981). Para $IG = 3$, obtém-se $CBR_{IG} = 13\%$, de acordo a referida tabela.

Já para a curva granulométrica com defloculante, tem-se que $a = 21\%$, $b = 40\%$, $c = 0$, $d = 18\%$. Repetindo o processo acima, tem-se que o IG do solo com defloculante é de 11,4. Para $IG = 11,4$, obtém-se $CBR_{IG} = 5\%$, de acordo com a Tabela 4-13 do DNER(1981).

Tabela 4-13 – Correlação entre IG e CBR (DNER - Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis/1991)

Índice de Grupo (I.G.)	C.B.R. 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

Por meio dos ensaios de caracterização do solo, é possível classificá-lo de acordo com a TRB (Transportation Research Board), apresentada na Tabela 4-14. Nesta classificação, eles são reunidos em grupos e subgrupos de acordo com sua granulometria, limites de consistência e índice de grupo. O grupo do solo é definido por eliminação da esquerda para a direita, até que os valores do quadro coincidam com os do solo.

Tabela 4-14 – Classificação dos solos de acordo com a TRB (DNIT – Manual de Pavimentação/2006)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N° 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											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
N° 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 N° 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.

Portanto, analisando-se a curva granulométrica sem defloculante, o solo é classificado no grupo A-2, subgrupo A-2-6. Esta classificação indica que o solo se trata de uma areia argilosa, plástica. Já quando se analisa a curva granulométrica com defloculante, o solo é classificado no grupo A-6. Esta classificação indica que se trata de um solo argiloso, plástico.

Tendo em vista que a curva sem defloculante representa melhor o estado natural do solo em campo, os dados dessa curva serão utilizados para o dimensionamento do pavimento.

4.4.2. ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE (DCP)

A partir dos valores de penetração relativa, penetração absoluta e a média de penetração por golpe obtidos, foram traçadas curvas para cada um dos pontos de ensaio, relacionando a profundidade com a resistência do solo, representada pelo inverso da penetração relativa. Esses resultados individuais são apresentados no Apêndice B. A Figura 4-9 apresenta todas essas curvas em um mesmo gráfico, na tentativa de correlacioná-las. Os dados individuais para cada furo são apresentados no Apêndice B.

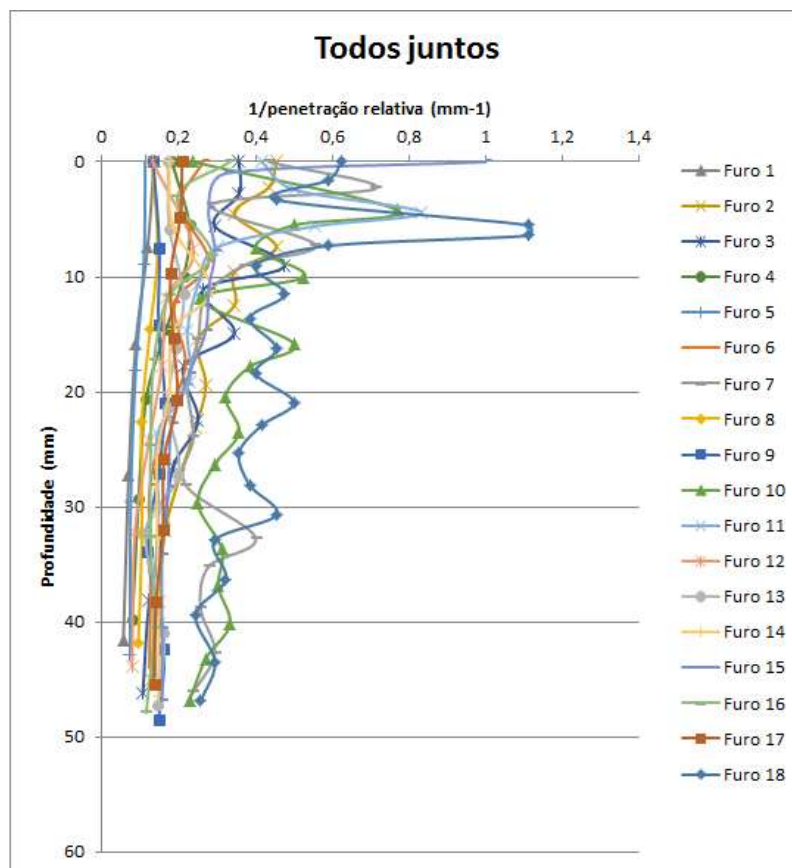


Figura 4-9 – Curvas profundidade x resistência de todos os furos

Pode-se observar na Figura 4-9 que não existe uma correlação clara entre os valores de DCP dos diversos pontos. Portanto, foi calculada a média aritmética entre a penetração média por golpe em cada um deles. Esses valores são apresentados na Tabela 4-15.

Tabela 4-15 – Penetração média do DCP

Furo	1	2	3	4	5	6
D (cm/golpe)	11,92	4,05	4,63	7,5	11,3	5,79
Furo	7	8	9	10	11	12
D (cm/golpe)	3,35	8,75	6,91	3,02	4,33	8,1
Furo	13	14	15	16	17	18
D (cm/golpe)	6,01	5,91	4,44	6,29	5,87	2,42
Média = 6,14 cm/golpe						
Desvio = 2,56 cm/golpe						

Então, foi realizada uma análise desses dados, a fim de eliminar os dados discrepantes. Para isso, foram calculados os valores do primeiro e do terceiro quartis dos dados. Em seguida, foi determinado o valor da variação interquartil, por meio da diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil. Por fim, foram determinados os limites aceitáveis superior, somando o valor do terceiro quartil com uma vez e meia o valor da variação interquartil, e inferior, subtraindo do valor do primeiro quartil uma vez e meia a variação interquartil. Ao final desses cálculos, foram eliminados os valores que se encontrassem fora do intervalo entre os limites inferior e superior. Dessa forma, o dado do Furo 1 foi eliminado.

Em seguida, calculou-se novamente os quartis sem o valor do Furo 1 e repetiu-se a análise para eliminação de dados muito destoantes. Dessa vez, foi eliminado o Furo 5. Após novo cálculo sem os dois Furos mencionados, não houve mais valores discrepantes.

Em seguida, foram aplicados os valores de penetração média nos furos na Equação 2-1, obtendo-se um valor de CBR para cada furo e um valor médio que será utilizado para o dimensionamento do pavimento. Esses resultados são apresentados na Tabela 4-16.

Tabela 4-16 – Valores de CBR obtidos a partir do DCP

	F2	F3	F4	F6	F7	F8	F9	F10
DCP (mm/golpe)	40,50	46,30	75,00	57,90	33,50	87,50	69,10	30,20
CBR (%)	9,93	8,73	5,49	7,04	11,91	4,74	5,94	13,16
	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
DCP (mm/golpe)	43,30	81,00	60,10	59,10	44,40	62,90	58,70	24,20
CBR (%)	9,31	5,10	6,80	6,91	9,09	6,51	6,95	16,28
CBR médio = 8,37 %								
Desvio = 3,08 %								

De acordo com o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER (1981), o Índice de Suporte do subleito é obtido por meio da média aritmética do CBR com o CBR_{IG} , desde que a média seja inferior ao valor medido de CBR. Como o valor do CBR_{IG} obtido no ensaio granulométrico sem defloculante, 13%, é maior que o valor do CBR encontrado por meio do ensaio de DCP, o valor da média seria maior que o valor medido do CBR. Portanto, o valor do Índice de Suporte do subleito é o encontrado por meio dos ensaio, de 8%.

Ademais, ainda segundo o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis, o valor do CBR a ser usado em projeto é minorado de acordo com a equação:

$$CBR_{mín} = CBR_{med} - \frac{1,29 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (4-3)$$

em que:

$CBR_{mín}$ = CBR minorado para utilização em projeto, expresso em %;

CBR_{med} = CBR medido nos ensaios, expresso em %;

σ = Desvio padrão da amostra, expresso em %;

N = Número de dados.

Dessa forma, aplicando a equação 4-3 aos dados obtidos, tem-se que o valor de CBR a ser usado em projeto é de 7%.

4.4.3. PERMEABILIDADE

A partir dos dados obtidos nos ensaios de capacidade de infiltração, é possível traçar curvas relacionando a taxa de infiltração e o tempo para cada um dos ensaios. Esses valores

são apresentados na Figura 4-10. Os valores individuais para cada ponto deste ensaio são apresentados no Apêndice C.

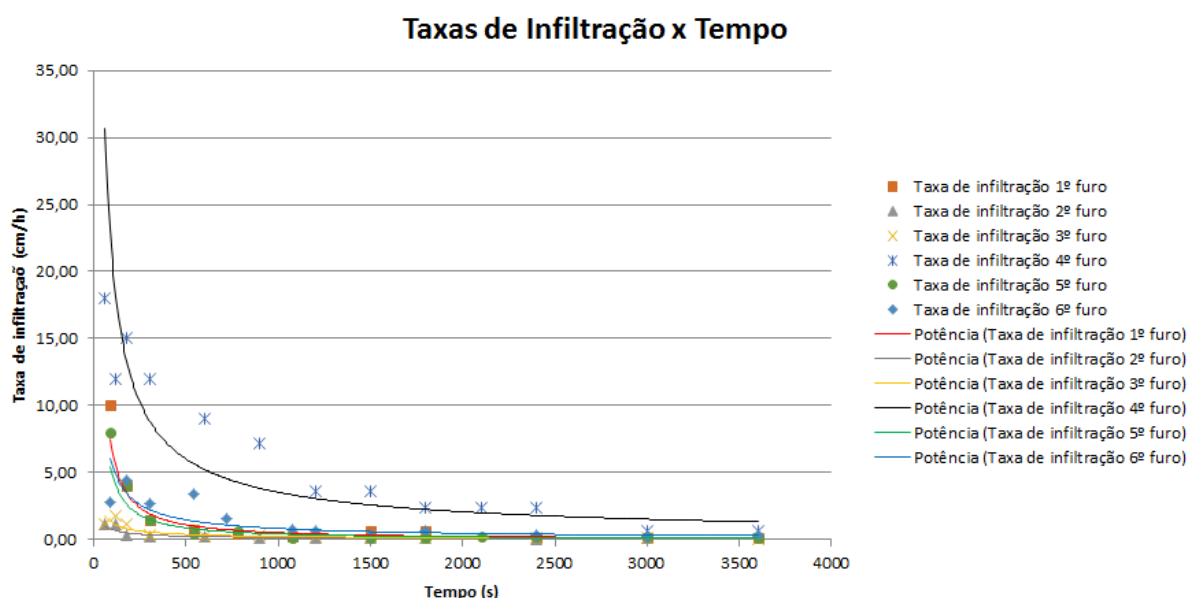


Figura 4-10 – Taxa de infiltração x tempo em todas áreas

Analisando os dados obtidos para o ensaio de capacidade de infiltração com infiltrômetros e o de permeabilidade, foi calculada a média aritmética das taxas de infiltração em cada um dos pontos analisados para cada um dos ensaios. Esses resultados são apresentados na Tabela 4-17. Vale ressaltar que os dados individuais de cada furo para o ensaio de Porchat são apresentados no Apêndice D.

Tabela 4-17 – Infiltração média

	Capacidade de infiltração (m/h)	Permeabilidade (m/h)
Área 1	0,0012	0,0785
Área 2	0,0012	0,1178
Área 3	0,0012	0,2963
Área 4	0,0060	0,2542
Área 5	0,0018	0,2270
Área 6	0,0024	0,2660
Média	0,0023	0,2066
Desvio	0,0017	0,0802

Para o dimensionamento do pavimento será utilizado apenas o valor da capacidade de infiltração do solo, determinada pelo ensaio dos cilindros concêntricos. Isso se deve ao fato de que o ensaio de permeabilidade permite o escoamento da água pelas laterais do furo, enquanto o ensaio da capacidade de infiltração garante o escoamento da água apenas na direção vertical, de forma mais semelhante a como o pavimento trabalhará.

Comparando o valor de permeabilidade obtido, de 0,2066 m/h, que é igual a $5,74 \times 10^{-5}$ m/s, com os valores de referência apresentados na Tabela 4-18, conclui-se que o solo em estudo apresenta permeabilidade de areia fina.

Tabela 4-18 – Valores de referência para a permeabilidade dos solos (adaptada de Souza Pinto, 2006)

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

Cabe ressaltar que, de acordo com a Tabela 4-19, para os resultados de permeabilidade obtidos, o tipo de infiltração do pavimento será infiltração parcial. Dessa forma, seria necessária a implantação de um tubo dreno sobre o subleito, visando escoar as águas provenientes do pavimento. Tendo em vista que o dimensionamento do tubo não é o escopo deste projeto, ele não foi dimensionado.

Tabela 4-19 – Tipo de infiltração do pavimento em função das condições locais (ABNT NBR 16416/2015)

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	✓

5 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

5.1 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

O dimensionamento da altura de base refere-se, exclusivamente à função de reservatório de água do pavimento permeável, não excluindo a necessidade do dimensionamento mecânico conforme o tipo de pavimento escolhido, devendo-se adotar o maior valor que atenda, simultaneamente, aos requisitos hidráulico e mecânico.

O dimensionamento hidráulico é, portanto, definido de acordo com a equação:

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{\Delta Q_c * R + P - f * T_e}{V_r} \quad (5-1)$$

em que:

$H_{m\acute{a}x}$ = Espessura total da camada reservatório, expressa em m;

ΔQ_c = Precipitação excedente da área de contribuição para uma dada chuva de projeto, expressa em m;

R = Relação entre a área de contribuição e a área do pavimento permeável;

P = Precipitação de projeto, expressa em m;

f = Taxa de infiltração do solo, expressa em m/h;

T_e = Tempo efetivo de enchimento da camada reservatório, geralmente igual a 2 horas, expresso em h;

V_r = índice de vazios da camada.

Para determinação da precipitação de projeto, utilizou-se a equação de intensidade/duração/frequência (IDF) de Brasília para gerar a chuva de projeto. Adotou-se o período de retorno de dez anos, período mínimo a ser empregando, conforme Anexo B da norma ABNT NBR 16416. Considerou-se o tempo de duração de 1 hora, também valor mínimo a ser empregado na determinação da chuva de projeto. A equação a seguir apresenta a equação IDF de Brasília, apresentada no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (2009).

$$I = \frac{1574,70 * T^{0,207}}{(t+11)^{0,884}} \quad (5-2)$$

em que:

I = intensidade da chuva, expressa em mm/h;

T = tempo de retorno, expresso em anos;

t = tempo de duração da chuva, expresso em minutos

A partir da equação IDF, obteve-se que a intensidade máxima média da chuva com período de retorno de dez anos e duração de 1 hora em Brasília é de 58,57 mm/h.

Determinada a intensidade máxima média da chuva, determinou-se a precipitação de projeto com a seguinte equação:

$$P = i_{m\acute{a}x} * t \quad (5-3)$$

em que:

P = Precipitação de projeto, expressa em mm;

$i_{m\acute{a}x}$ = Intensidade máxima média da chuva, expressa em mm/h;

t = Tempo de duração da chuva, em horas.

Desta maneira, a precipitação de projeto a ser empregado no dimensionamento é de 58,57 milímetros ou 0,05857 metros.

A precipitação excedente da área de contribuição será adota como nula para o presente trabalho, sendo dimensionado o pavimento apenas para a precipitação incidente na área de estudo. Assim, a relação entre a área de contribuição e a área do pavimento permeável é unitária.

A taxa de infiltração do solo, determinada neste presente trabalho, a ser utilizada no dimensionamento é de 0,0023 metros/hora.

Procede-se a determinação da altura da camada de base do pavimento conforme apresentado na Equação 5-1. Para o presente trabalho, obteve-se uma altura da camada de base de 8,04 centímetros. Entretanto, como apresentado no Método de projeto de pavimentos flexíveis do DNER (1981), a espessura mínima para camadas granulares é de 10 cm.

Desta forma, a espessura total do pavimento é de 20 centímetros, sendo esta composta por 10 centímetros de base, 2 centímetros de camada de assentamento e 8 centímetros da placa de concreto.

5.2 DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

Para o dimensionamento mecânico da camada de base, adotou-se o método de dimensionamento da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), apresentado em Senço (2007). Para atender o plano de pavimentação de baixo custo, para vias de baixa solicitação, onde veículos comerciais são apenas os veículos de serviços públicos ou similares, utilizou-se a faixa de variação de tráfego muito leve, correspondente a até três veículos comerciais por dia.

O solo do subleito é representado pelo seu C.B.R. As camadas do pavimento são consideradas em função de um coeficiente de equivalência estrutural nos mesmos moldes do método do DNER. São apresentados na Tabela 5-1 os valores dos coeficientes de equivalência estrutural admitidos no método.

Tabela 5-1 – valores dos coeficientes de equivalência estrutural - K (SENÇO, 2007)

Tipo de material	Símbolo	K
Revestimento de concreto asfáltico	CA	2,0
Base de concreto magro	CM	2,0
"Binder"	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	P	1,0
Areia	A	1,0

Observação: Pavimentos antigos de paralelepípedos. Quando recapeados 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

Para o C.B.R. do subleito, adota-se o valor calculado no item 4.2.5 deste trabalho, 7%. Utilizando o ábaco apresentado na figura 5-1, calcula-se a espessura básica do pavimento. Desta forma, obteve-se uma espessura do pavimento de 37 cm.

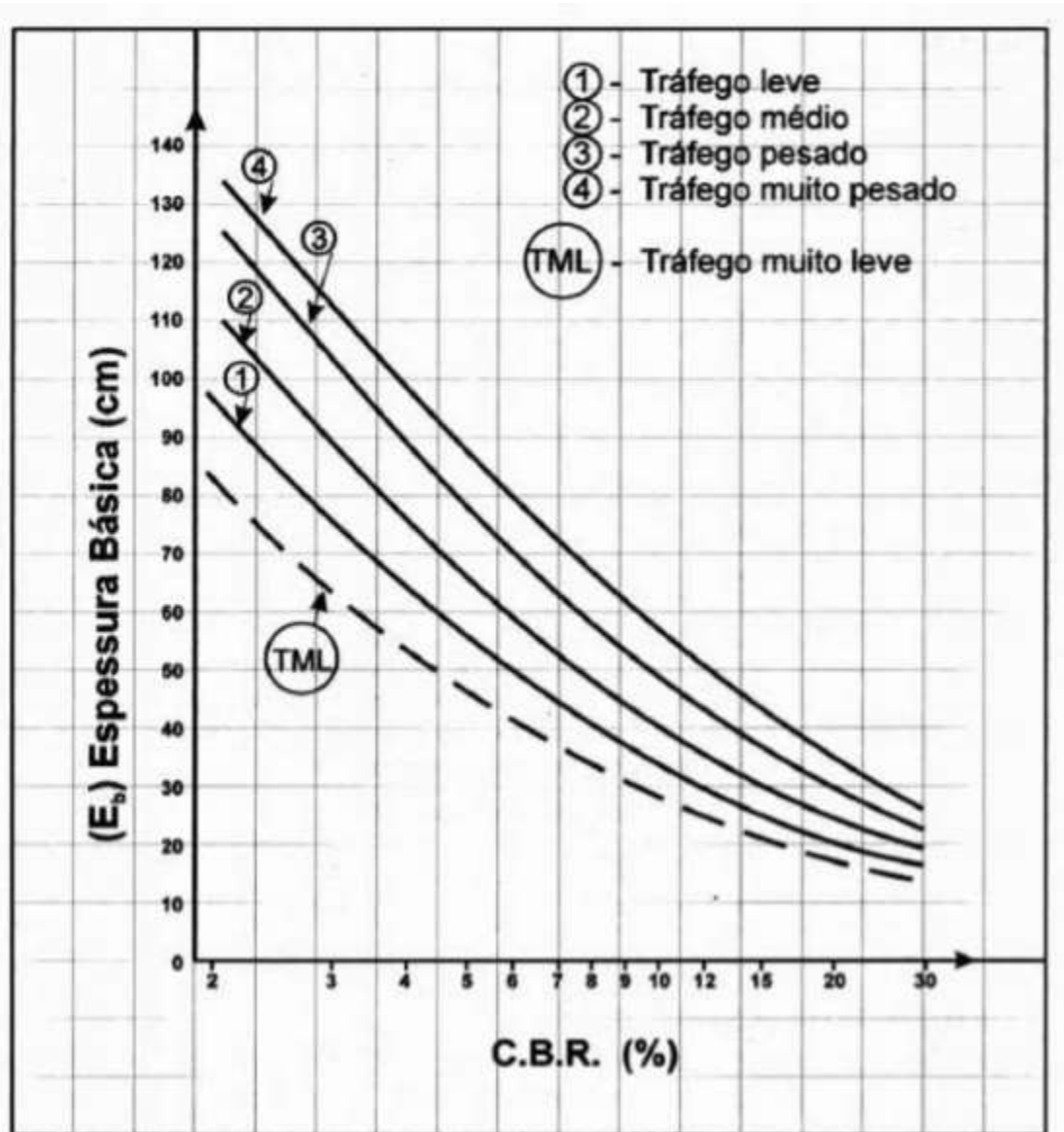


Figura 5-1 – Ábaco para o dimensionamento (SENÇO, 2007)

Para determinação da camada de base, deve-se subtrair da espessura do pavimento a espessura da placa de concreto multiplicada pelo coeficiente de equivalência estrutural. Para o presente trabalho, considerou-se a placa de concreto como pavimento articulado de concreto, cujo valor do coeficiente é 1,2. Desta forma, a placa de concreto equivale a uma camada de 9,6 cm de base granular, sendo esta considerada a camada de coeficiente estrutural 1.

A partir disso, a espessura total do pavimento é de 35 cm, sendo esta composta por 25 centímetros de base, 2 centímetros da camada de assentamento e 8 centímetros da placa de concreto.

Em 1991, a Prefeitura Municipal de São Paulo apresentou alterações no método de dimensionamento, visando maior economia nas estruturas destinadas a vias de tráfego leve e muito leve. Utilizando o ábaco apresentado na figura 5-2, calcula-se a espessura básica do pavimento. Desta forma, obteve-se uma espessura do pavimento de 26 cm.

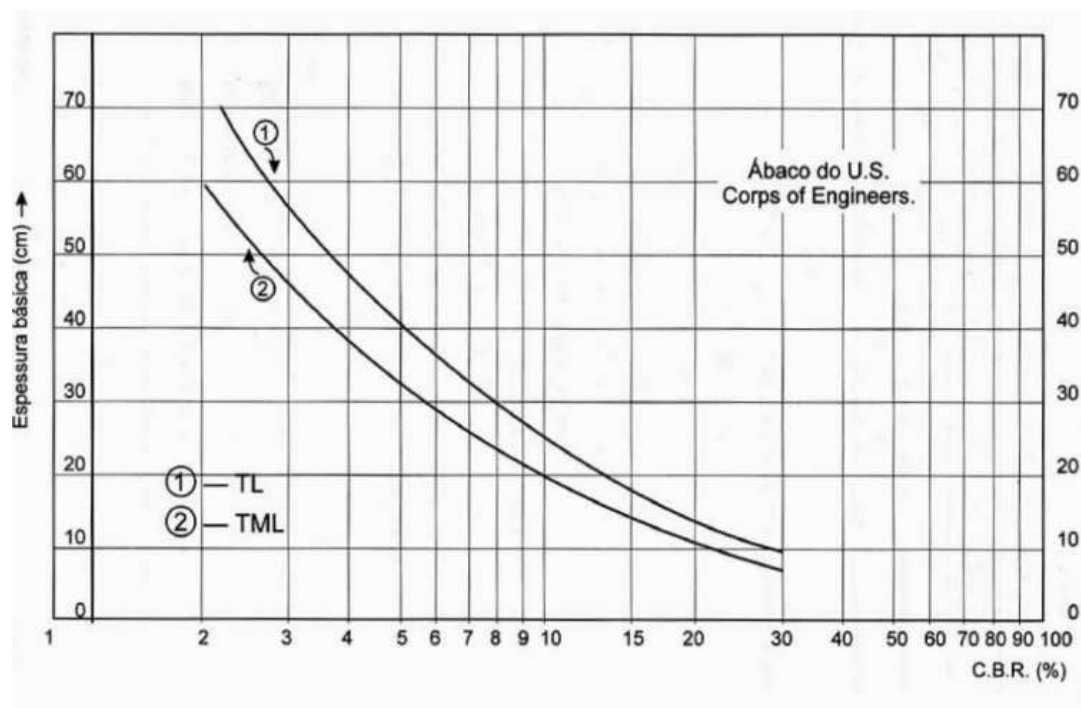


Figura 5-2 – Ábaco para o dimensionamento 1991 (SENÇO, 2007)

Por este método, a espessura total do pavimento é de 25 cm, sendo esta composta por 15 centímetros de base, 2 centímetros da camada de assentamento e 8 centímetros da placa de concreto.

Vale ressaltar que o método utilizado é uma aproximação inicial, pois não é específico para pavimentos de estacionamentos, sendo adaptado de um método de dimensionamento para pavimentos urbanos com tráfego muito leve, que corresponde ao de ruas essencialmente residenciais, para as quais não é absolutamente previsto tráfego de ônibus, podendo existir, ocasionalmente, passagens de caminhões em número não superior a três por dia, por faixa de tráfego, caracterizado por um número de 10.000 solicitações do eixo simples padrão para o período de projeto de 10 anos.

6 CONCLUSÃO

A realização desse estudo de caso permite uma melhor compreensão da dinâmica de funcionamento de um pavimento permeável e do dimensionamento responsável pela integridade da estrutura e pelo correto desempenho de sua função.

A urbanização é a principal responsável pelo aumento significativo de áreas cobertas que impermeabilizam os solos, resultando no aumento do volume de águas pluviais escoando superficialmente. O pavimento permeável é, portanto, uma solução que entra em conformidade com os ideais do desenvolvimento sustentável, destinados a administrar os riscos ambientais, controlando de maneira efetiva o escoamento superficial, e minimizando a necessidade de estruturas para contenção de grandes inundações.

Buscando o desenvolvimento de uma metodologia adequada de projeto e controle de construção, surge o estudo de caso, que, tomando como referência a norma ABNT NBR 16416:2015, institui-se como documento de suporte teórico e tecnológico para aplicação desse tipo de pavimento em Brasília.

No que tange a placa de concreto utilizada neste trabalho, os requisitos exigidos em norma quanto ao material foram atendidos, sendo apresentados valores satisfatórios para atender a demanda mecânica e hidráulica. O material britado utilizado nas camadas de base e de assentamento também se mostrou um material satisfatório a se trabalhar para obtenção de uma boa resistência mecânica com um índice de vazios adequado ao pavimento permeável. Entretanto, pode-se encontrar dificuldade na obtenção de uma granulometria que atenda às exigências quanto a dimensão máxima do agregado e a quantidade de material passante na peneira de número 200.

Em relação à compactação do material de base, de forma a atender os requisitos mecânicos exigidos em norma e, ao mesmo tempo, obter-se um material que possua um índice de vazios dentro das exigências, se faz necessário um estudo mais aprofundado quanto a energia de compactação. Findadas as atividades deste trabalho, pode-se concluir que a energia normal de compactação se mostra eficiente na obtenção de um volume de vazios ótimo aos requisitos, no entanto insuficiente quanto à sollicitação mecânica.

O método utilizado para o dimensionamento mecânico do pavimento não é específico para pavimentos de estacionamentos, sendo adaptado de um método de dimensionamento para pavimentos urbanos com tráfego muito leve.

Em relação ao uso de dreno sob a base, seria possível realizar uma análise relativa ao tempo de enchimento da camada de reservatório ser maior que 2 horas, uma vez que o dimensionamento mecânico se sobrepôs ao hidráulico. Dessa forma, a água percolada até a camada de base teria mais tempo para infiltrar no subleito.

6.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Uma correlação entre o ensaio DCP e o CBR do solo é fundamental para o sucesso do ensaio. Desta maneira, faz-se necessário um estudo mais aprofundado para determinar essa correlação no solo da universidade ou um estudo em vários pontos no Distrito Federal que seja capaz de produzir uma relação representativa para a região.

O estudo da energia de compactação da camada de brita a ser utilizada como base do pavimento permeável é outro ponto de destaque, uma vez que o material que compõe deve ser capaz de resistir as solicitações mecânicas do tráfego e garantir o armazenamento de água durante as chuvas. Desta forma, a determinação nível de compactação do material é essencial no dimensionamento de um pavimento permeável.

Realizar ensaios de módulo de resiliência na brita de base com o objetivo de subsidiar futuras análises mecanísticas, uma vez que a rigidez deste material é altamente dependente das condições de confinamento.

Na etapa do dimensionamento do estacionamento, há uma lacuna a ser preenchida na literatura e nas normas quanto a esse tipo de estrutura, uma vez que a falta de referência ao assunto limita o projetista a utilizar ábacos referenciados a faixas de rolamento e adaptá-los, de maneira subjetiva à questão.

Com relação as placas de concreto, há a necessidade de um estudo, utilizando método de elementos finitos, para analisar o comportamento da placa frente a solicitação submetida e a verificação das possibilidades de ruptura, a fim de entender melhor o comportamento do material e suas restrições.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-REFEAI, T.; AL-SUHAIBANI, A. *Prediction of CBR Using Dynamic Cone Penetrometer*. Riyadh, Arábia Saudita: King Saud University, 1996.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457: Amostras de solo – preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterizações*. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7212: Execução de concreto dosado em central – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9895: Solo - Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto – Determinação de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro, 2000.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15805: Pisos elevados de placas de concreto – Requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro, 2015.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem*. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro, 2001.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos*. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARVALHO, R. G. *Correlações entre os ensaios DCP e CBR para solos saprolíticos de textura fina*. São José dos Campos: Tese de Mestrado em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – Área de Infra-Estrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER-ME 041: Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER-ME 051: Solos –Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER-ME 082: Solos –determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER-ME 122: Solos –determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito*. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro, 1981.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Norma DNIT 172/2016 – ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2016.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, 2006.

DPLG - DEPARTMENT OF PLANNING AND LOCAL GOVERNMENT. *Water Sensitive Urban Design Technical Manual for the Greater Adelaide Region*. Adelaide, Austrália: Government of South Australia, 2010.

DYLLA, H. L.; HANSEN, K. R. *Technical Brief: Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs*. Washington D.C., EUA: U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration - FHWA, 2015.

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

DISTRITO FEDERAL – SECRETARIA DE ESTADO DE OBRAS. *Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal*. Brasília, 2009.

KAYHANIAN, M. *et al. The Application of Permeable Pavement with Emphasis on Successful Design, Water Quality Benefits, and Identification of Knowledge and Data Gaps*. Davis: National Center for Sustainable Transportation, 2015.

MATTOS, A.; VILLELA, S. M. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill, 1974.

MINVU – MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. *Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias em Sectores Urbanos. Guía de Diseño*. Santiago, Chile, 1996.

PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SENÇO, W. *Manual de Técnicas de Pavimentação*. São Paulo: PINI, 2007.

WAPA – WISCONSIN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Technical Bulletin: Porous Asphalt Pavements*. Wisconsin, EUA, 2015.

WOODS-BALLARD, B. *et al. The SuDS Manual*. Londres, Inglaterra: CIRION, 2007.

APÊNDICE A
RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO

Tabela A-1 – Resultados ensaio 1 – sem defloculante

Peneira #	Diâmetro (mm)	Massa retida	Massa total	% retida	% retida acumulada	% passante
3/8"	19,5	0,00	1467,49	0%	0%	100%
4	4,8	39,98		3%	3%	97%
10	2	19,18		1%	4%	96%
16	1,18	1,37	70	2%	6%	94%
30	0,6	3,48		5%	11%	89%
40	0,425	3,57		5%	16%	84%
50	0,3	5,82		8%	24%	76%
100	0,15	13,17		19%	43%	57%
200	0,075	11,14		16%	59%	41%

Tabela A-2 – Resultados ensaio 1 – com defloculante

Peneira #	Diâmetro (mm)	Massa retida	Massa total	% retida	% retida acumulada	% passante
3/8"	19,5	0,00	1467,49	0%	0%	100%
4	4,8	39,98		3%	3%	97%
10	2	19,18		1%	4%	96%
16	1,18	0,45	70	1%	5%	95%
30	0,6	2,85		4%	9%	91%
40	0,425	2,72		4%	13%	87%
50	0,3	4,16		6%	19%	81%
100	0,15	9,83		14%	33%	67%
200	0,075	8,71		12%	45%	55%

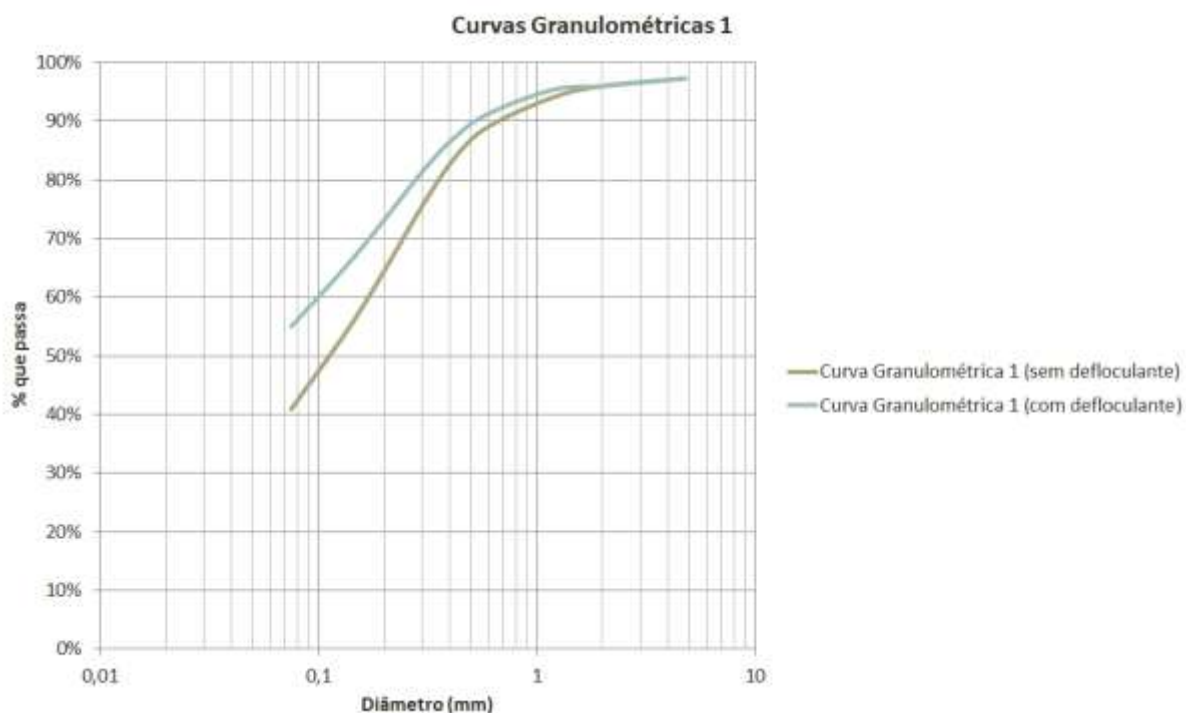


Figura A-1 – Curvas granulométricas com e sem deflocu

lante obtidas no Ensaio 1

Tabela A-3 – Resultados ensaio 2 – sem defloculante

Peneira #	Diâmetro (mm)	Massa retida	Massa total	% retida	% retida acumulada	% passante
3/8"	19,5	0,00	1512,00	0%	0%	100%
4	4,8	0,42		0%	0%	100%
10	2	1,01		0%	0%	100%
16	1,18	5,41	70	8%	8%	92%
30	0,6	10,15		15%	22%	78%
40	0,425	7,99		11%	34%	66%
50	0,3	6,72		10%	43%	57%
100	0,15	13,14		19%	62%	38%
200	0,075	8,65		12%	74%	26%

Tabela A-4 – Resultados ensaio 2 – com defloculante

Peneira #	Diâmetro (mm)	Massa retida	Massa total	% retida	% retida acumulada	% passante
3/8"	19,5	0,00	1512,00	0%	0%	100%
4	4,8	0,42		0%	0%	100%
10	2	1,01		0%	0%	100%
16	1,18	1,31	70	2%	2%	98%
30	0,6	2,97		4%	6%	94%
40	0,425	3,14		4%	11%	89%
50	0,3	3,92		6%	16%	84%
100	0,15	9,75		14%	30%	70%
200	0,075	7,75		11%	41%	59%

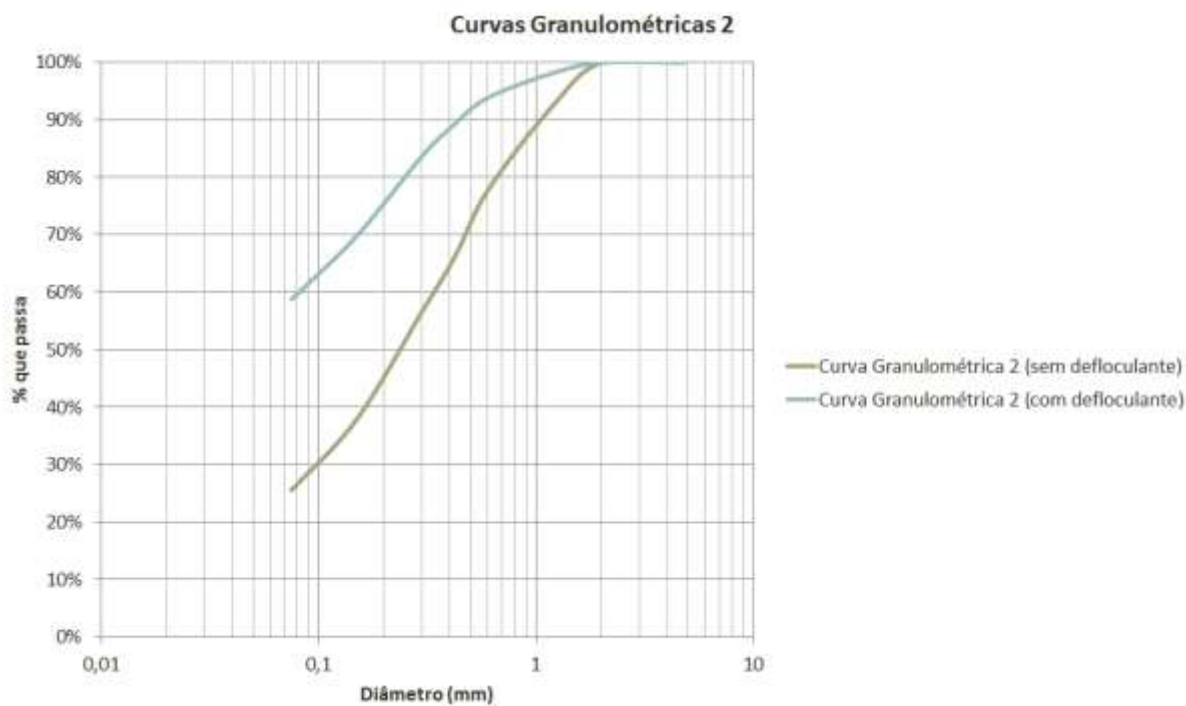


Figura A-2 – Curvas granulométricas com e sem defloculante obtidas no Ensaio 2

Tabela A-5 – Resultados ensaio 3 – sem defloculante

Peneira #	Diâmetro (mm)	Massa retida	Massa total	% retida	% retida acumulada	% passante
3/8"	19,5	0,00	1503	0%	0%	100%
4	4,8	0,33		0%	0%	100%
10	2	0,78		0%	0%	100%
16	1,18	3,97	70	6%	6%	94%
30	0,6	9,42		13%	19%	81%
40	0,425	7,97		11%	31%	69%
50	0,3	6,79		10%	40%	60%
100	0,15	13,91		20%	60%	40%
200	0,075	9,31		13%	73%	27%

Tabela A-6 – Resultados ensaio 3 – com defloculante

Peneira #	Diâmetro (mm)	Massa retida	Massa total	% retida	% retida acumulada	% passante
3/8"	19,5	0,00	1503	0%	0%	100%
4	4,8	0,33		0%	0%	100%
10	2	0,78		0%	0%	100%
16	1,18	2,28	70	3%	3%	97%
30	0,6	3,39		5%	8%	92%
40	0,425	3,56		5%	13%	87%
50	0,3	4,43		6%	20%	80%
100	0,15	10,06		14%	34%	66%
200	0,075	7,83		11%	45%	55%

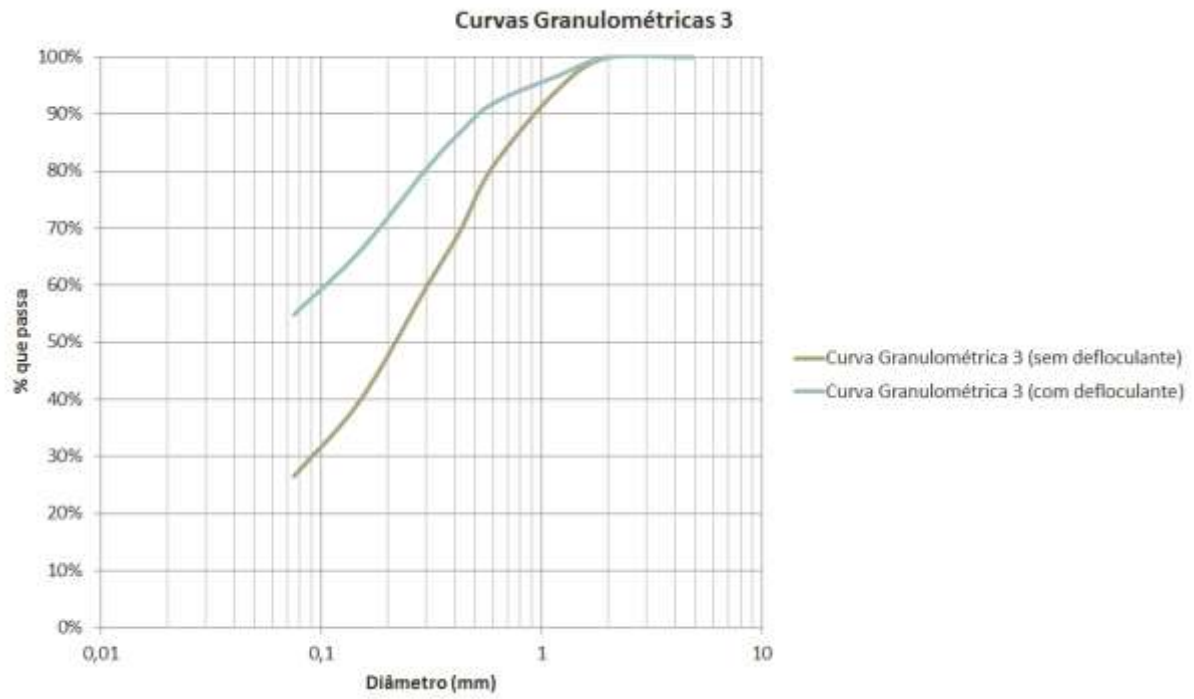


Figura A-3 – Curvas granulométricas com e sem defloculante obtidas no Ensaio 3

APÊNDICE B
RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE

Tabela B-1 – Dados obtidos no furo 1

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	7,4	7,4
2	15,8	8,4
3	27,2	11,4
4	41,6	14,4
5	59,6	18
Média = 11,92 mm/golpe		

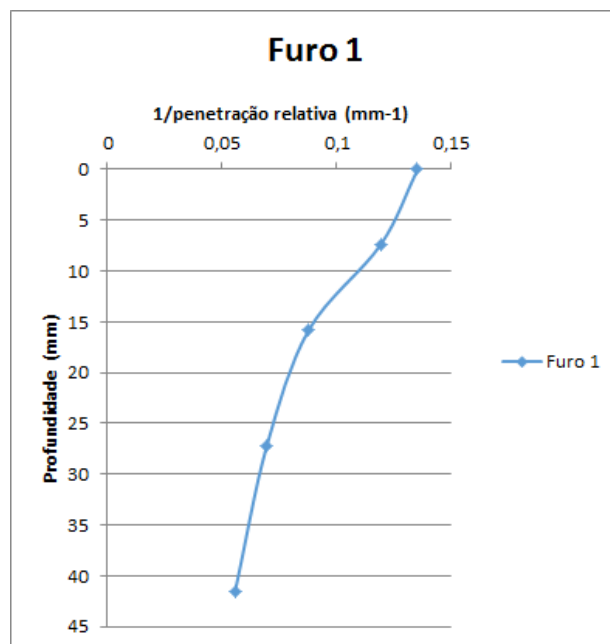


Figura B-1 – Curva profundidade x resistência em F1

Tabela B-2 – Dados obtidos no furo 2

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	2,2	2,2
2	4,5	2,3
3	7,4	2,9
4	9,6	2,2
5	12,5	2,9
6	15,4	2,9
7	19,4	4
8	23,1	3,7
9	27,2	4,1
10	32,1	4,9
11	38,2	6,1
12	45	6,8
13	52,7	7,7
Média = 4,05 mm/golpe		

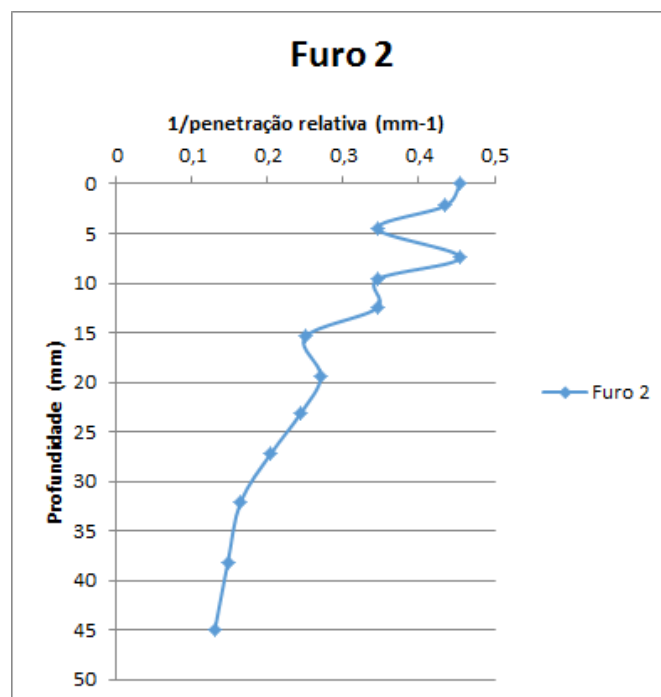


Figura B-2 – Curva profundidade x resistência em F2

Tabela B-3 – Dados obtidos no furo 3

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	2,8	2,8
2	5,6	2,8
3	9	3,4
4	11,1	2,1
5	14,9	3,8
6	17,8	2,9
7	22,5	4,7
8	26,5	4
9	31,9	5,4
10	38,1	6,2
11	46,2	8,1
12	55,6	9,4
		Média = 4,63 mm/golpe

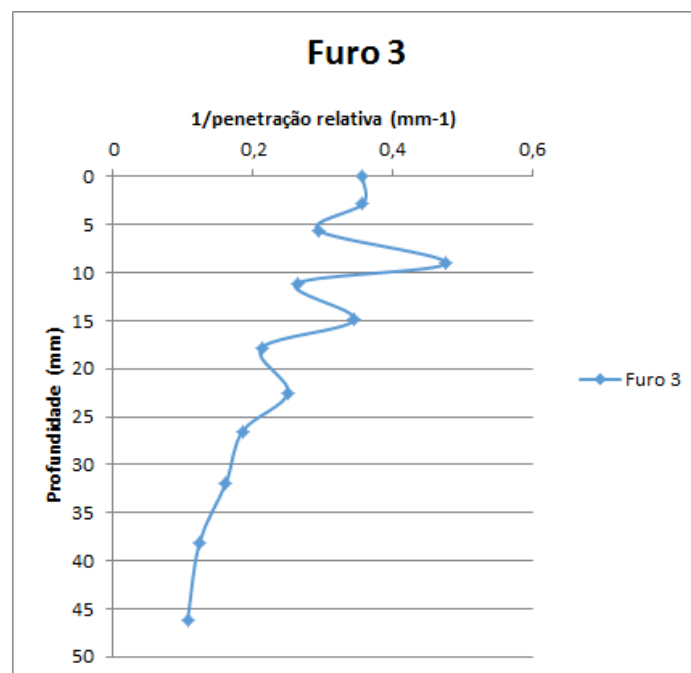


Figura B-3 – Curva profundidade x resistência em F3

Tabela B-4 – Dados obtidos no furo 4

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	5,5	5,5
2	9,9	4,4
3	14,6	4,7
4	20,6	6
5	29,3	8,7
6	39,8	10,5
7	52,5	12,7
		Média = 7,50 mm/golpe

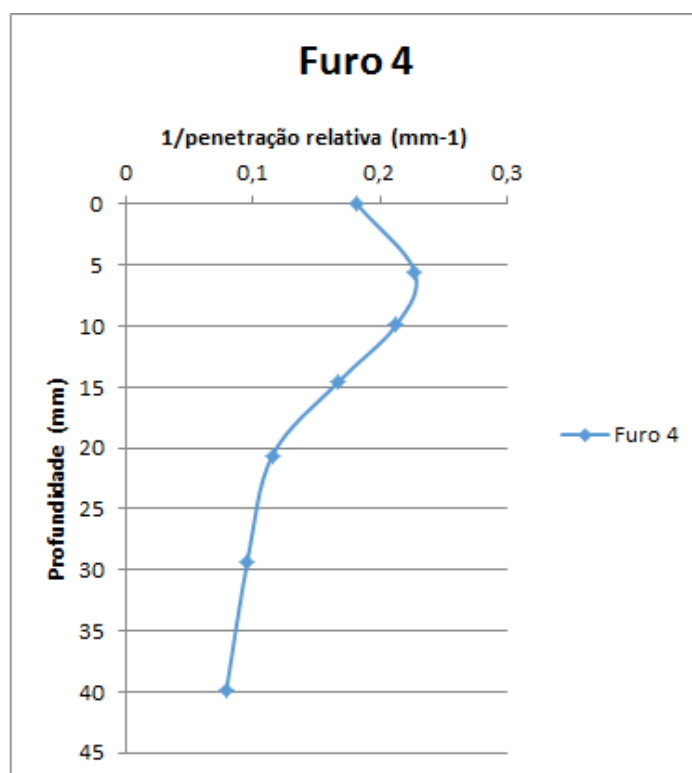


Figura B-4 – Curva profundidade x resistência em F4

Tabela B-5 – Dados obtidos no furo 5

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	8,9	8,9
2	18,1	9,2
3	29,5	11,4
4	42,9	13,4
5	56,5	13,6
Média = 11,30 mm/golpe		

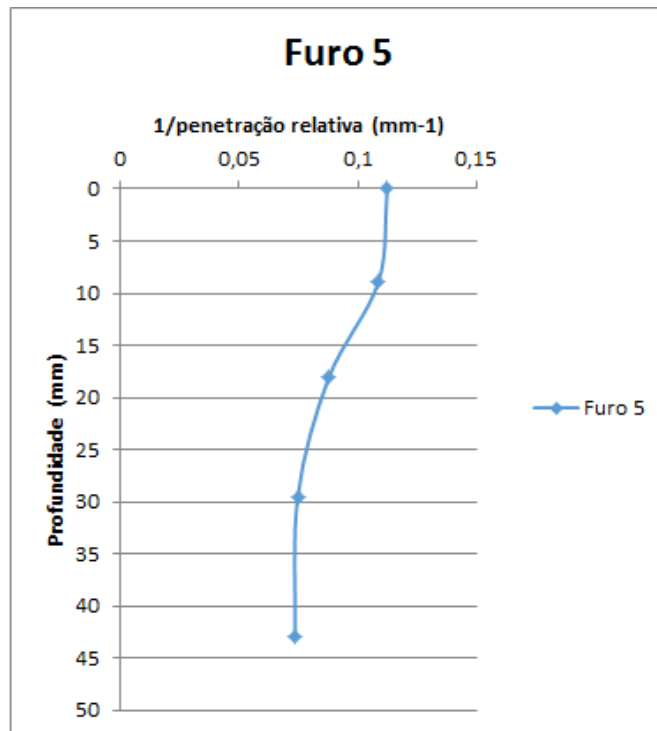


Figura B-5 – Curva profundidade x resistência em F5

Tabela B-6 – Dados obtidos no furo 6

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	3,8	3,8
2	8,7	4,9
3	12,3	3,6
4	17,6	5,3
5	22,2	4,6
6	28,1	5,9
7	36,1	8
8	44	7,9
9	52,1	8,1
Média = 5,79 mm/golpe		

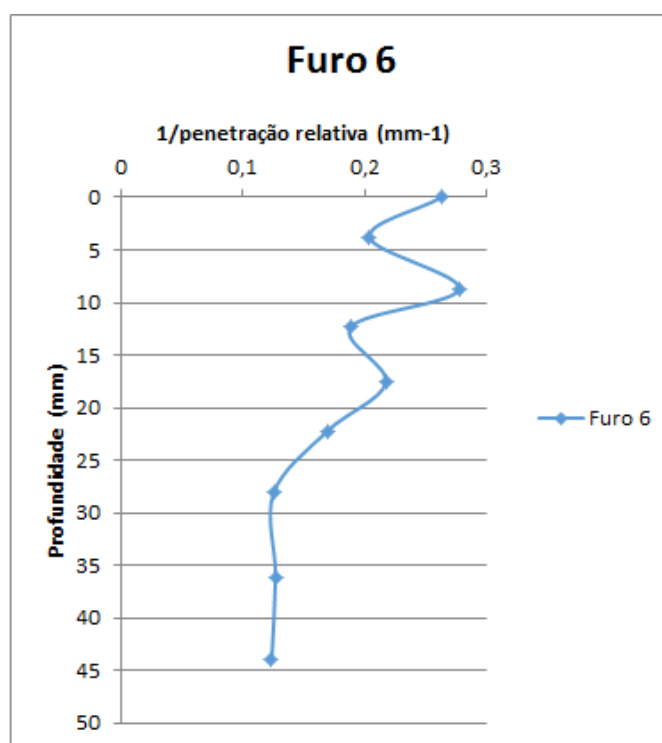


Figura B-6 – Curva profundidade x resistência em F6

Tabela B-7 – Dados obtidos no furo 7

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	2,3	2,3
2	3,7	1,4
3	7,2	3,5
4	9	1,8
5	11,7	2,7
6	15,4	3,7
7	19,4	4
8	23,9	4,5
9	28,1	4,2
10	32,7	4,6
11	35,2	2,5
12	38,8	3,6
13	42,7	3,9
14	46,1	3,4
15	50,3	4,2
	Média = 3,35 mm/golpe	

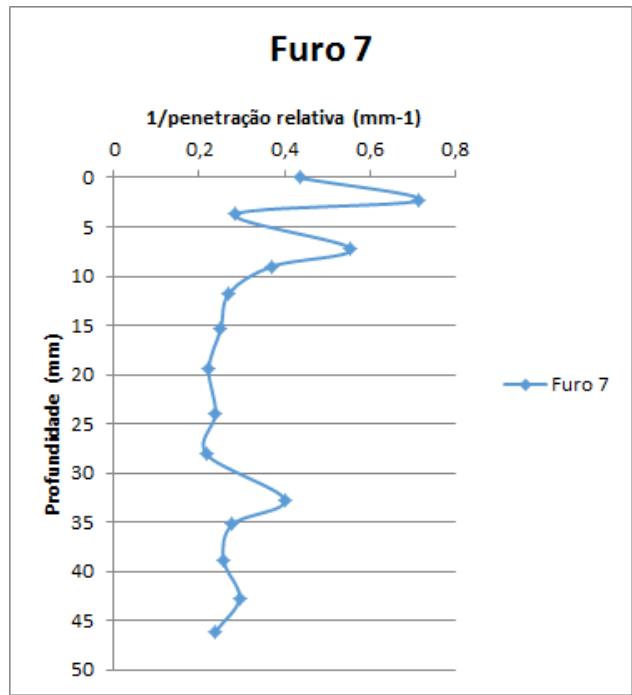


Figura B-7 – Curva profundidade x resistência em F7

Tabela B-8 – Dados obtidos no furo 8

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	7,7	7,7
2	14,6	6,9
3	22,6	8
4	32,3	9,7
5	41,9	9,6
6	52,5	10,6
		Média = 8,75 mm/golpe

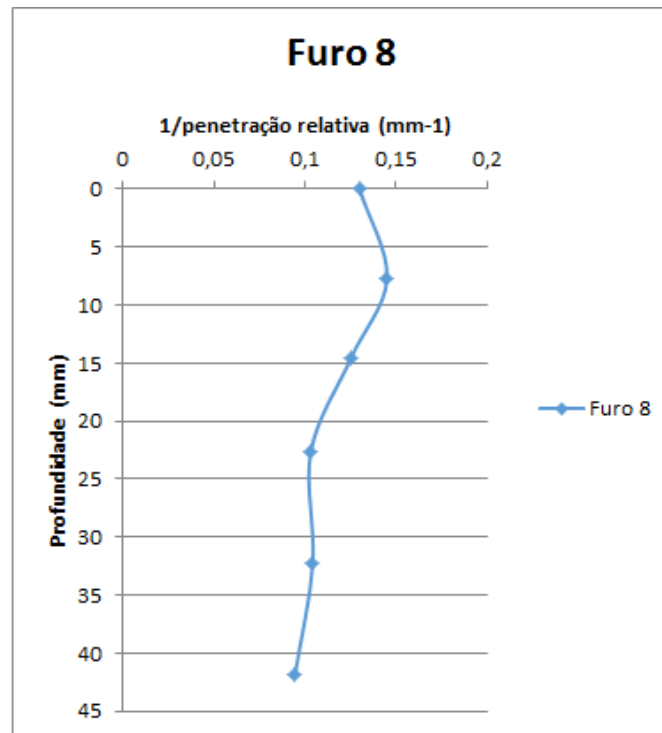


Figura B-8 – Curva profundidade x resistência em F8

Tabela B-9 – Dados obtidos no furo 9

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	7,5	7,5
2	14,2	6,7
3	21	6,8
4	27,1	6,1
5	33,9	6,8
6	42,3	8,4
7	48,5	6,2
8	55,3	6,8
		Média = 6,91 mm/golpe

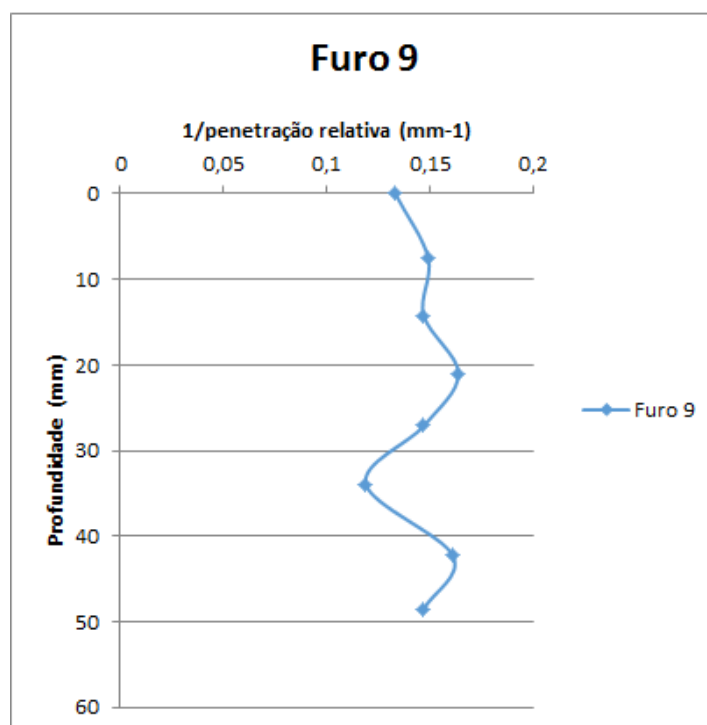


Figura B-9– Curva profundidade x resistência em F9

Tabela B-10 – Dados obtidos no furo 10

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	4,2	4,2
2	5,5	1,3
3	7,5	2
4	10	2,5
5	11,9	1,9
6	15,8	3,9
7	17,8	2
8	20,4	2,6
9	23,5	3,1
10	26,3	2,8
11	29,7	3,4
12	33,7	4
13	36,9	3,2
14	40,2	3,3
15	43,2	3
16	46,9	3,7
17	51,3	4,4
	Média = 3,02 mm/golpe	

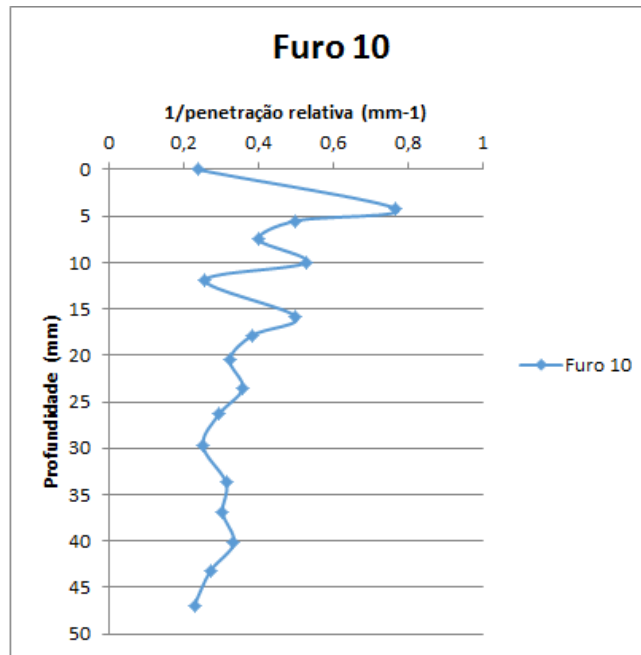


Figura B-10 – Curva profundidade x resistência em F10

Tabela B-11 – Dados obtidos no furo 11

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	2,4	2,4
2	4,4	2
3	5,6	1,2
4	7,4	1,8
5	10,7	3,3
6	14,7	4
7	19,2	4,5
8	23,6	4,4
9	30,5	6,9
10	37,3	6,8
11	44,7	7,4
12	51,9	7,2
		Média = 4,33 mm/golpe

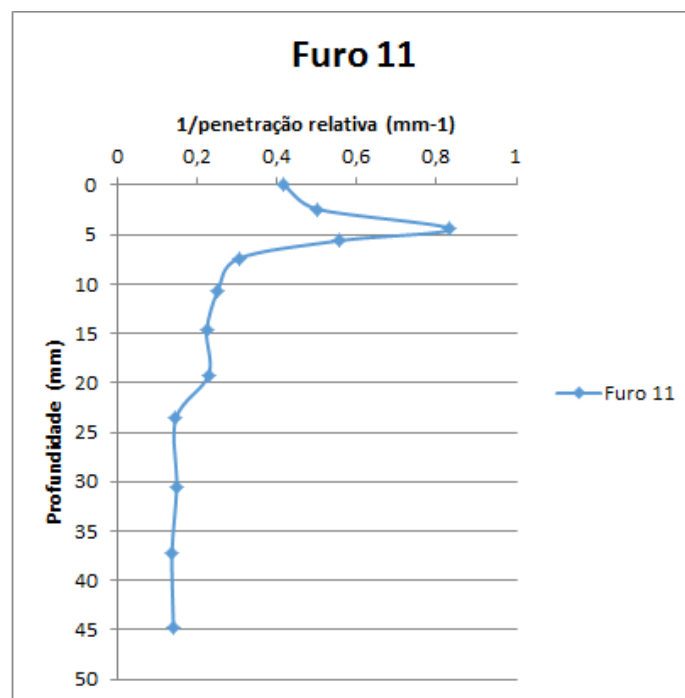


Figura B-11 – Curva profundidade x resistência em F11

Tabela B-12 – Dados obtidos no furo 12

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	7,6	7,6
2	11,8	4,2
3	17,7	5,9
4	24,1	6,4
5	32,2	8,1
6	43,9	11,7
7	56,7	12,8
		Média = 8,10 mm/golpe

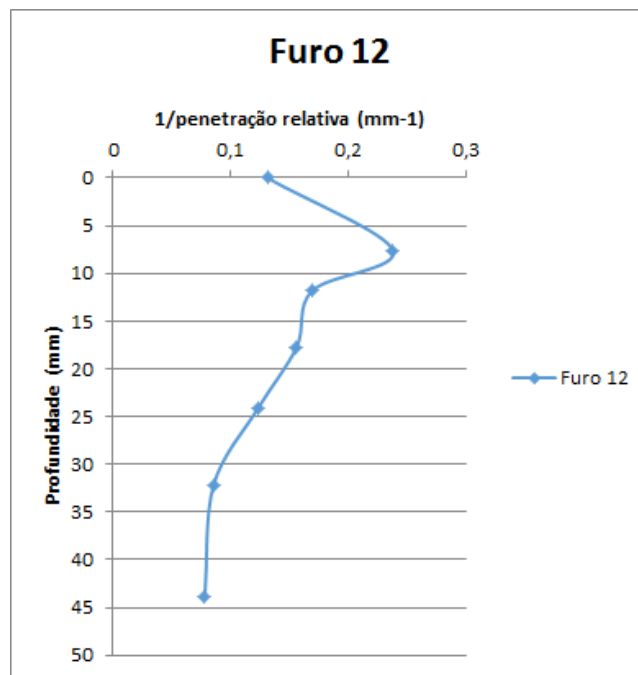


Figura B-12 – Curva profundidade x resistência em F12

Tabela B-13 – Dados obtidos no furo 13

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	5,8	5,8
2	11,5	5,7
3	16,2	4,7
4	21,4	5,2
5	27,2	5,8
6	32,2	5
7	41	8,8
8	47,2	6,2
9	54,1	6,9
		Média = 6,01 mm/golpe

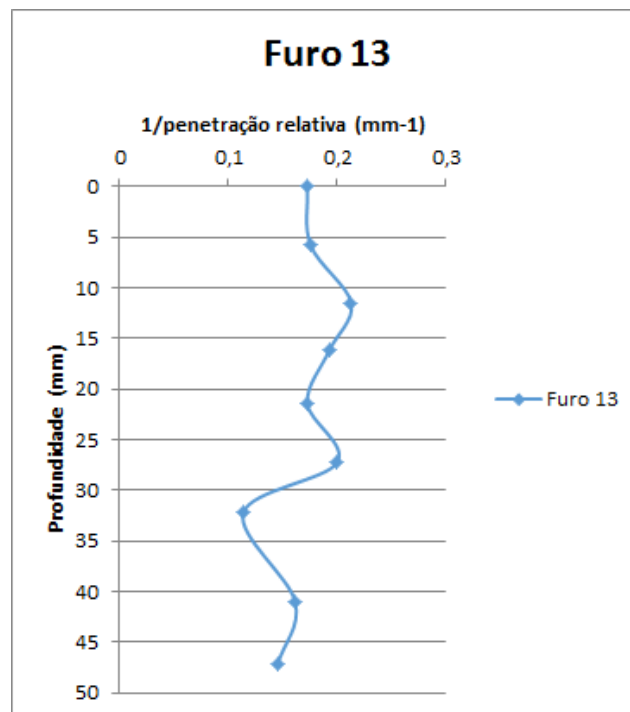


Figura B-13 – Curva profundidade x resistência em F13

Tabela B-14 – Dados obtidos no furo 14

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	5,7	5,7
2	11,1	5,4
3	14,6	3,5
4	20	5,4
5	25,7	5,7
6	32,7	7
7	39,6	6,9
8	46,4	6,8
9	53,2	6,8
		Média = 5,91 mm/golpe

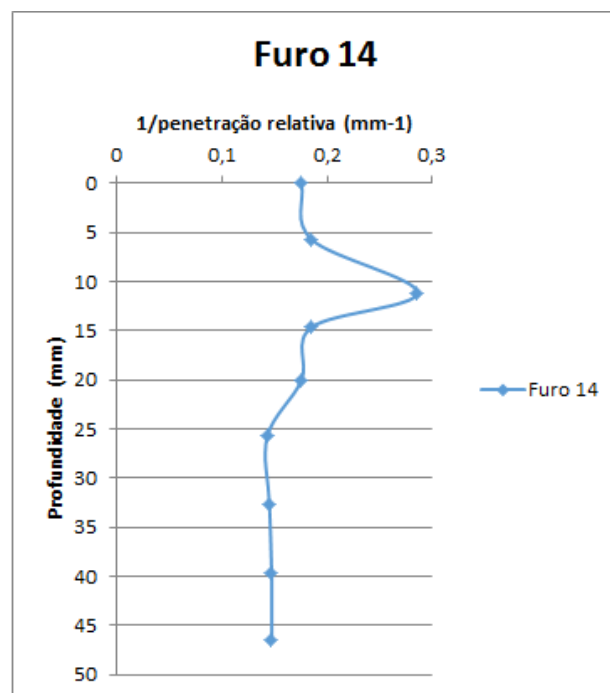


Figura B-14 – Curva profundidade x resistência em F14

Tabela B-15 – Dados obtidos no furo 15

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	1	1
2	4,1	3,1
3	7,7	3,6
4	11,1	3,4
5	14,7	3,6
6	18,4	3,7
7	22,8	4,4
8	28,3	5,5
9	34,1	5,8
10	40,5	6,4
11	46,9	6,4
12	53,3	6,4
		Média = 4,44 mm/golpe

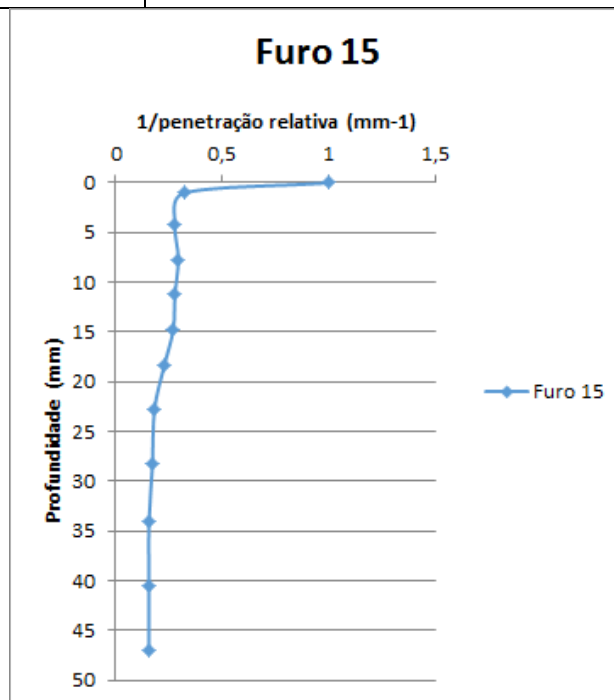


Figura B-15 – Curva profundidade x resistência em F15

Tabela B-16 – Dados obtidos no furo 16

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	3	3
2	8,1	5,1
3	11,6	3,5
4	17,3	5,7
5	24,7	7,4
6	32,6	7,9
7	40,5	7,9
8	47,9	7,4
9	56,6	8,7
Média = 6,29 mm/golpe		

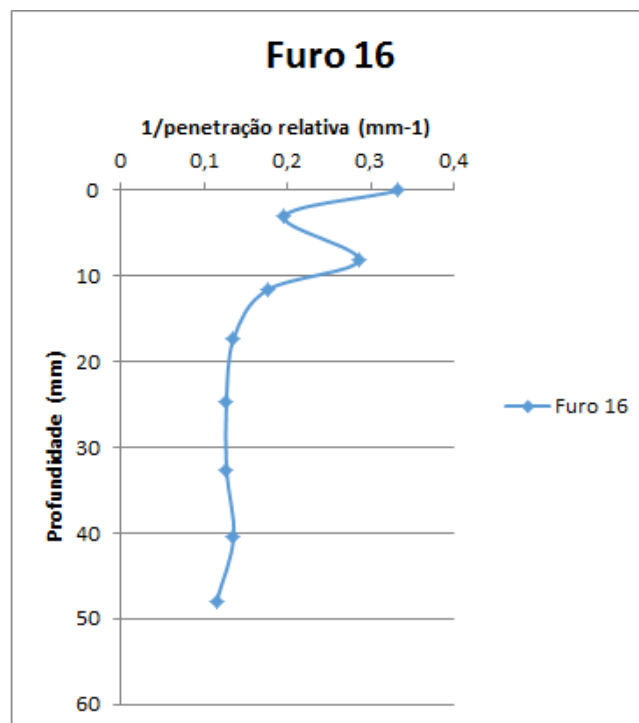


Figura B-16 – Curva profundidade x resistência em F16

Tabela B-17 – Dados obtidos no furo 17

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	4,8	4,8
2	9,7	4,9
3	15,3	5,6
4	20,7	5,4
5	25,8	5,1
6	32	6,2
7	38,3	6,3
8	45,4	7,1
9	52,8	7,4
		Média = 5,87 mm/golpe

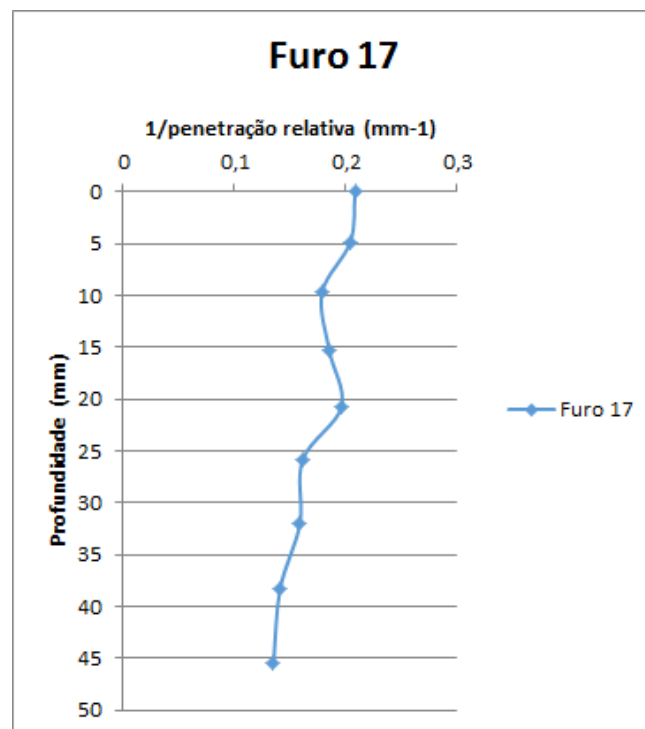


Figura B-17 – Curva profundidade x resistência em F17

Tabela B-18 – Dados obtidos no furo 18

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração relativa (mm)
0	0	0
1	1,6	1,6
2	3,3	1,7
3	5,5	2,2
4	6,4	0,9
5	7,3	0,9
6	9	1,7
7	11,5	2,5
8	13,6	2,1
9	16,2	2,6
10	18,4	2,2
11	20,9	2,5
12	22,9	2
13	25,3	2,4
14	28,1	2,8
15	30,7	2,6
16	32,9	2,2
17	36,3	3,4
18	39,4	3,1
19	43,5	4,1
20	46,9	3,4
21	50,8	3,9
	Média=	2,42 mm/golpe

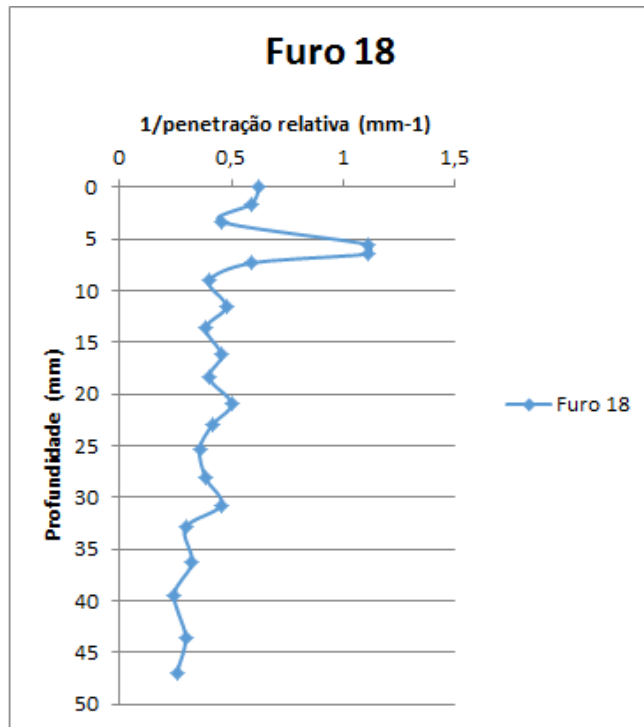


Figura B-18 – Curva profundidade x resistência em F18

APÊNDICE C
RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE INFILTRAÇÃO DO SUBLEITO

Tabela C-1 – Resultados capacidade de infiltração obtidos na área 1

Tempo (s)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de infiltração instantânea (cm/h)
0	68	-	-
90	67,75	0,25	10,00
180	67,65	0,1	4,00
300	67,6	0,05	1,50
540	67,55	0,05	0,75
780	67,52	0,03	0,45
1080	67,5	0,02	0,24
1500	67,43	0,07	0,60
1800	67,38	0,05	0,60
2400	67,35	0,03	0,18
3000	67,33	0,02	0,12
3600	67,31	0,02	0,12

Taxa de infiltração 1º furo

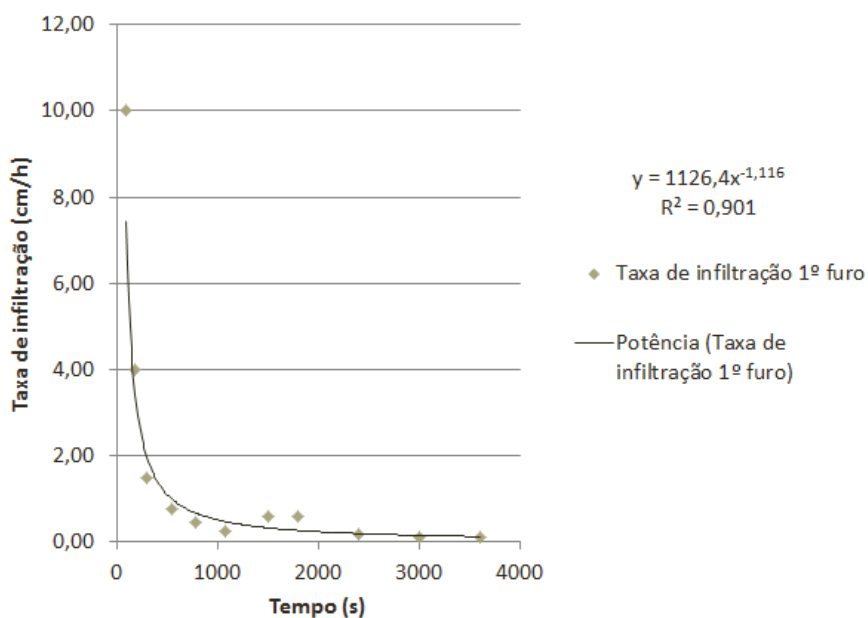


Figura C-1 – Taxa de infiltração x tempo na área 1

Tabela C-2 – Resultados capacidade de infiltração obtidos na área 2

Tempo (s)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de infiltração instantânea (cm/h)
0	62	-	-
60	61,95	0,05	3
120	61,93	0,02	1,2
180	61,91	0,02	1,2
300	61,9	0,01	0,3
600	61,88	0,02	0,24
900	61,86	0,02	0,24
1200	61,85	0,01	0,12
1500	61,84	0,01	0,12
1800	61,83	0,01	0,12
2400	61,81	0,02	0,12
3000	61,8	0,01	0,06
3600	61,78	0,02	0,12

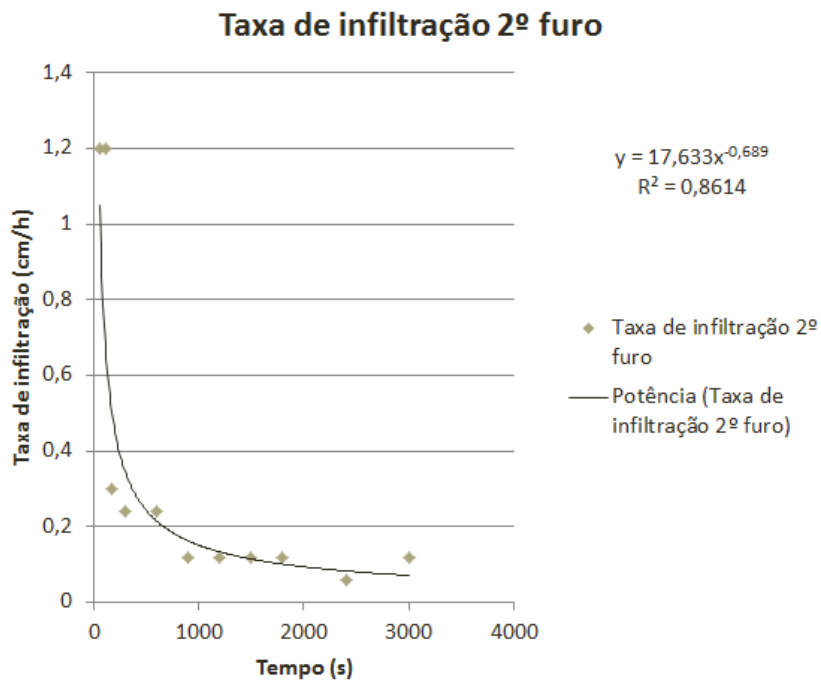


Figura C-2 – Taxa de infiltração x tempo na área 2

Tabela C-3 – Resultados capacidade de infiltração obtidos na área 3

Tempo (s)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de infiltração instantânea (cm/h)
0	65,2	-	-
60	65,18	0,02	1,2
120	65,15	0,03	1,8
180	65,13	0,02	1,2
300	65,12	0,01	0,3
600	65,1	0,02	0,24
900	65,07	0,03	0,36
1200	65,05	0,02	0,24
1500	65,03	0,02	0,24
1800	65,02	0,01	0,12
2400	65	0,02	0,12
3000	64,98	0,02	0,12
3600	64,97	0,01	0,06

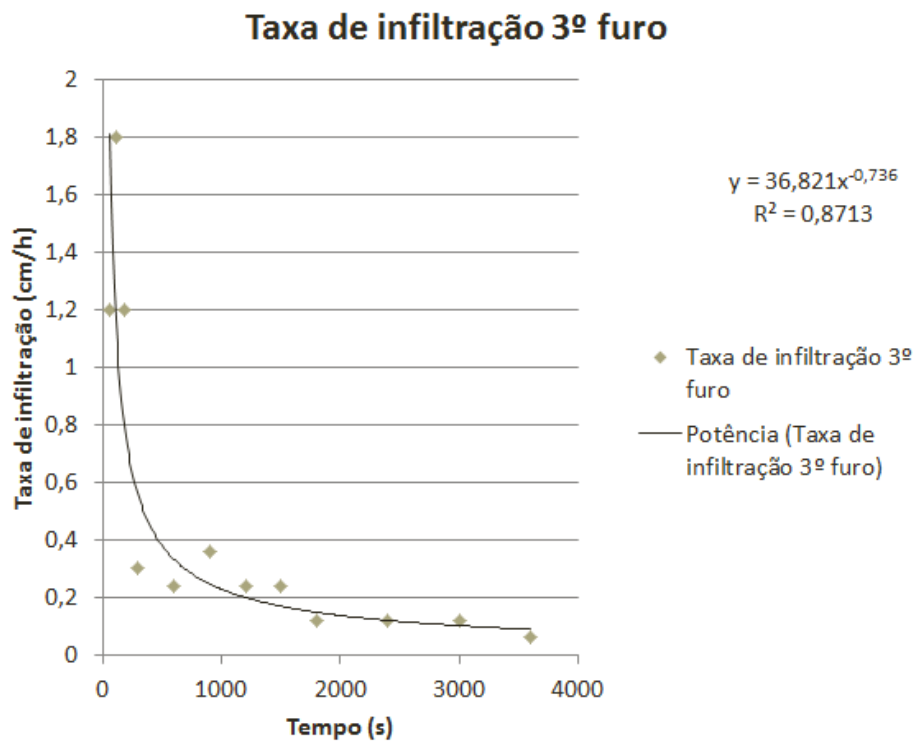


Figura C-3 – Taxa de infiltração x tempo na área 3

Tabela C-4– resultados capacidade de infiltração obtidos na área 4

Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de infiltração instantânea (cm/h)
0	65	-	-
60	64,7	0,3	18
120	64,5	0,2	12
180	64,25	0,25	15
300	63,85	0,4	12
600	63,1	0,75	9
900	62,5	0,6	7,2
1200	62,2	0,3	3,6
1500	61,9	0,3	3,6
1800	61,7	0,2	2,4
2100	61,5	0,2	2,4
2400	61,3	0,2	2,4
3000	61,2	0,1	0,6
3600	61,1	0,1	0,6

Taxa de infiltração 4º furo

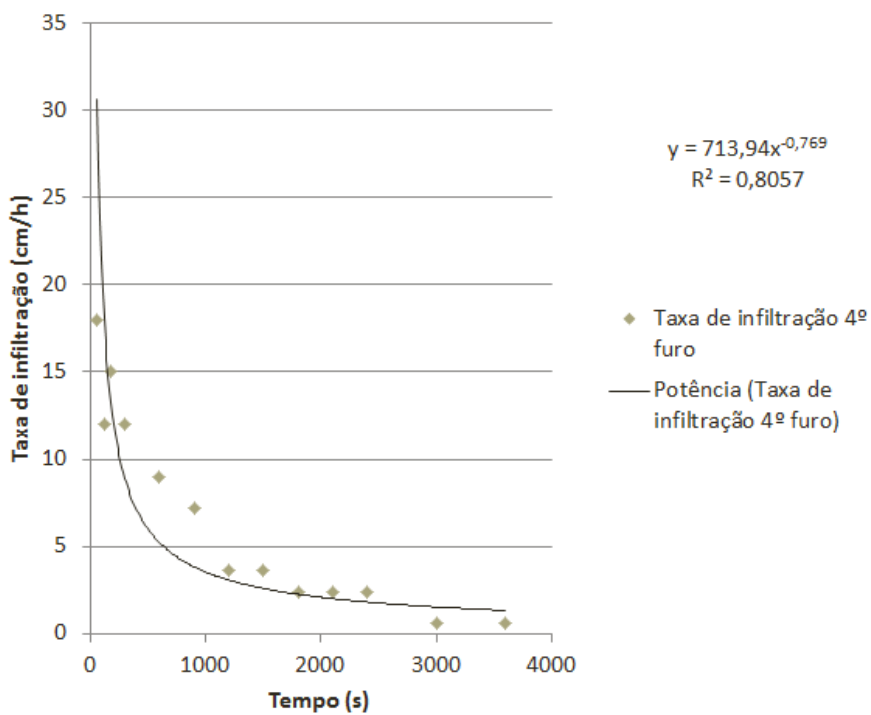


Figura C-4 – Taxa de infiltração x tempo na área 4

Tabela C-5 – Resultados capacidade de infiltração obtidos na área 5

Tempo (s)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de infiltração instantânea (cm/h)
0	64,5	-	
90	64,3	0,2	8
180	64,2	0,1	4
300	64,15	0,05	1,5
540	64,12	0,03	0,45
780	64,08	0,04	0,6
1080	64,07	0,01	0,12
1500	64,05	0,02	0,17
1800	64,04	0,01	0,12
2100	64,02	0,02	0,24
2400	64	0,02	0,24
3000	63,96	0,04	0,24
3600	63,93	0,03	0,18

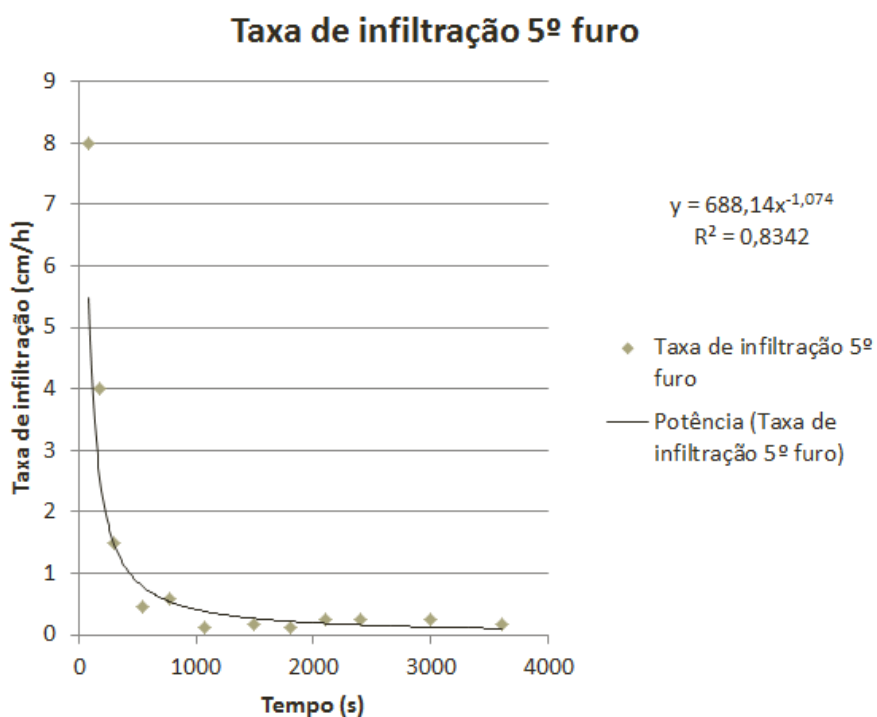


Figura C-5 – Taxa de infiltração x tempo na área 5

Tabela C-6– Resultados capacidade de infiltração obtidos na área 6

Tempo (s)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de infiltração instantânea (cm/h)
0	66,5	-	-
90	66,43	0,07	2,8
180	66,32	0,11	4,4
300	66,23	0,09	2,7
540	66	0,23	3,45
720	65,92	0,08	1,6
1080	65,85	0,07	0,7
1200	65,83	0,02	0,60
1500	65,8	0,03	0,36
1800	65,75	0,05	0,60
2400	65,69	0,06	0,36
3000	65,65	0,04	0,24
3600	65,6	0,05	0,30

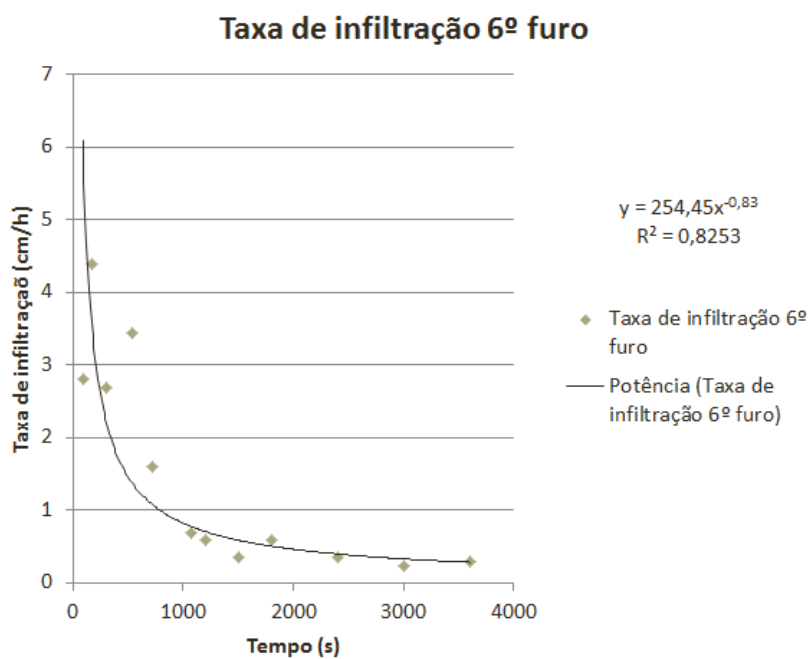


Figura C-6– Taxa de infiltração x tempo na área 6

APÊNDICE D
RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE PERMEABILIDADE DO SUBLEITO

Tabela D-1 – Resultados permeabilidade obtidos na área 1

Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	70
h2 (cm)	50
Tempo (s)	1027
f (cm/s)	0,00218
f (cm/h)	7,84743

Tabela D-2 – Resultados permeabilidade obtidos na área 2

Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	70
h2 (cm)	50
Tempo (s)	684
f (cm/s)	0,003273
f (cm/h)	11,78262

Tabela D-3 – Resultados permeabilidade obtidos na área 3

Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	70
h2 (cm)	50
Tempo (s)	272
f (cm/s)	0,008231
f (cm/h)	29,62982

Tabela D-4 – Resultados permeabilidade obtidos na área 4

Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	70
h2 (cm)	50
Tempo (s)	317
f (cm/s)	0,007062
f (cm/h)	25,42369

Tabela D-5 – Resultados permeabilidade obtidos na área 5

Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	70
h2 (cm)	50
Tempo (s)	355
f (cm/s)	0,006306
f (cm/h)	22,70228

Tabela D-6 – Resultados permeabilidade obtidos na área 6

Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	70
h2 (cm)	50
Tempo (s)	303
f (cm/s)	0,007388
f (cm/h)	26,59839