



FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

LUÍSA DE ALMEIDA FARIAS

Matricula: 2165338/6

**Estudo de Solos de Uma Área em Sobradinho II com Vistas à
Utilização em Pavimento Rodoviário.**

Brasília

2017



LUÍSA DE ALMEIDA FARIAS

Matricula: 2165338/6

**Estudo de Solos de Uma Área em Sobradinho II com Vistas à
Utilização em Pavimento Rodoviário.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como um dos requisitos para
a conclusão do curso de Engenharia Civil
do UniCEUB – Centro Universitário de
Brasília.

Orientador: Professor Rideci Farias, D. Sc.

Brasília

2017

LUÍSA DE ALMEIDA FARIAS

Matricula: 2165338/6

**Estudo de Solos de Uma Área em Sobradinho II com Vistas à
Utilização em Pavimento Rodoviário.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como um dos requisitos para
a conclusão do curso de Engenharia Civil
do UniCEUB– Centro Universitário de
Brasília.

Orientador: Professor Rideci Farias, D. Sc.

Brasília, 06 de julho de 2017.

Banca Examinadora

Professor Rideci de Jesus da Costa Farias, D. Sc., Orientador.

Professor Jairo Furtado Nogueira, M. Sc., Examinador Interno.

Professor Areosvaldo Oliveira Castro, M. Sc., Examinador Externo.



Aos meus pais.
Sem eles eu não chegaria tão longe.

AGRADECIMENTOS

A todos os colegas e professores que tive durante os anos de curso, que me incentivaram e me ajudam a trilhar este caminho.

Aos meus amigos e colegas do Tribunal de Contas da União pelo aprendizado durante os anos de estágio. Vocês foram essenciais no meu crescimento intelectual, profissional e pessoal.

À toda equipe do Labocien do Campus II de Taguatinga pela organização, dedicação e trabalho exemplar que todos exercem.

Aos técnicos e estagiários do Labocien, Francisco Ricardo, Regis Marcelo Melo, Gabriel Seabra e Leonardo Nunes por toda ajuda, paciência, cuidado e carinho que tiveram comigo e com meu trabalho, desde o início e em todos os detalhes finais. Sem vocês eu jamais teria obtido tanto sucesso nos resultados e não teria aprendido tanto como aprendi. Vocês são grandes profissionais e pessoas incríveis.

A minha amiga e companheira de laboratório Thamires Rezende que, apesar de ter desistido do seu trabalho, foi de muita ajuda para a execução de todos os ensaios.

Ao meu Professor Orientador Rideci Farias, por toda ajuda e por todos os conselhos dados durante a execução do trabalho.

Aos meus Tios Fábio e Dilma por mais uma vez abrirem as portas de sua casa e tornarem este último período o mais confortável possível.

Ao meu namorado Bruno Petrucci por toda paciência e compreensão nos meus momentos de ausência e de crise.

Aos meus pais, Roberto Farias e Tatiana Farias, e a minha irmã Gabriela Farias por todo apoio emocional e psicológico. Por todos os conselhos dados em excesso, por toda pressão e cobrança e por não me deixarem desistir, mesmo nos piores momentos. Sem eles eu não teria chegado até aqui.

A todos que não foram citados no texto, mas torceram e acreditaram em mim. Tenham certeza que estão nos meus pensamentos e têm minha gratidão.

RESUMO

Esta monografia apresenta a caracterização, classificação e comportamento mecânico de solos oriundos de uma área da região administrativa de Sobradinho II no Distrito Federal. Para o desenvolvimento dos estudos foram coletadas 10 (dez) amostras de solos nas profundidades de 0,5 m a 1,5 m. Amostras essas que foram levadas ao laboratório com vistas aos ensaios de granulometria, limites de liquidez e plasticidade, massa específica dos grãos, compactação, índice de suporte Califórnia e expansão. Em termos táteis-visuais, de forma geral, trata-se de argila arenosa a pouco arenosa / siltosa a pouco siltosa. Após a obtenção dos resultados de laboratório os solos foram classificados de acordo com as metodologias do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e Highway Research Board (HBR). Esse procedimento foi adotado em função da possível implantação de um condomínio residencial na área de coleta das amostras de solos. Em seguida, de posse dos resultados, partiu-se para o dimensionamento das vias internas do condomínio. Para isso utilizou-se dois métodos de dimensionamento para pavimento flexível. O primeiro método do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER, hoje DNIT) – DNER 66/72, e o método da Prefeitura Municipal de São Paulo - PMSP. De posse dos estudos, utilizou-se no dimensionamento o solo estudado como camada de subleito.

Palavras-chave: Classificação dos solos. Dimensionamento. Pavimento Flexível. Método DNER.

ABSTRACT

This monograph presents the characterization, classification and mechanical behavior of soils from an area of Sobradinho II administrative region in the Federal District. For the development of the studies, 10 (ten) soil samples were collected at depths of 0.5 m to 1.5 m. These samples were taken to the laboratory for granulometry tests, liquidity and plasticity limits, grain specific gravity, compaction, California support index and expansion. In tactile-visual terms, in general, it is sandy clay to a little sandy / silty to silty. After obtaining the laboratory results the soils were classified according to the methodologies of the Unified Soil Classification System (SUCS) and Highway Research Board (HBR). This procedure was adopted in function of the possible implantation of a residential condominium in the area of soil samples collection. Then, with the results in hand, we started to design the interior of the condominium. Two sizing methods were used for flexible pavement. The first method of the National Department of Roads and Roadways (DNER, now DNIT) - DNER 66/72, and the method of the Municipality of São Paulo - PMSP. After the studies, the studied soil was used as a subgrade layer.

Keywords: Soils classification. Sizing. Flexible pavement. DNER Method.

Sumário

1. Introdução	12
2. Objetivos	14
2.1. Objetivos Gerais	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. Revisão Bibliográfica.....	15
3.1. O Solo	15
3.1.1. Tipos de Solo	15
3.1.2. Classificação do Solos.....	16
3.2. O Pavimento Rodoviário	19
3.2.1. Classificação dos Pavimentos.....	19
3.2.2. Camadas de Um Pavimento Rodoviário.....	21
3.3. Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.....	24
3.3.1. Métodos Mecanísticos	25
3.3.2. Métodos Empíricos.....	25
4. Metodologia	39
4.1. Seleção dos Materiais	39
4.2. Análise Granulométrica	42
4.2.1. Peneiramento Grosso	42
4.2.2. Sedimentação	42
4.2.3. Peneiramento Fino	43
4.3. Limites de Atterberg.....	44
4.3.1. Limite de Liquidez.....	44
4.3.2. Limite de Plasticidade	46
4.5. Ensaio de Compactação.....	48
4.5.1. Determinação da Massa de Água a Ser Adicionada em Cada Ponto	48
4.5.2. Execução do Ensaio	50
5. Apresentação e Análises dos Resultados	54
5.1. Resumo dos Resultados.....	54
5.1.1. Comentários / Análises dos Resultados Obtidos	56
5.2. Dimensionamento.....	57
5.2.1. Classificação das Vias.....	57
5.2.2. Cálculo do CBR de Projeto	58
5.2.4. Fator Climático Regional	60
5.2.5. Coeficiente de Equivalência Estrutural	60

5.2.6.....	61
5.2.7. Determinação das Espessuras das Camadas do Pavimento	61
6. Conclusões	65
6.1. Sugestões Para Pesquisas Futuras	66
7. Referências	68

Índice de Figuras

Figura 1: Seção Tipo de Pavimento Rígido	20
Figura 2: Pavimento Semirrígido com Sub-Base de Solo-Cimento	20
Figura 3: Seção Tipo Pavimento Flexível	21
Figura 4: Camadas do Pavimento	22
Figura 5 - Camadas do Pavimento Flexível	23
Figura 6 - Localização da Área Estudada	39
Figura 7 - Furos de Sondagem.....	40
Figura 8 - Sondagem a Trado	41
Figura 9 - Secagem de Amostras.....	41
Figura 10 - Sequência de Procedimentos do Ensaio de Sedimentação.....	43
Figura 11 - Peneiras Posicionadas no Agitador Mecânico	44
Figura 12 - Amostra Retida Pós Peneiramento Fino	44
Figura 13 - Aspecto da Ranhura Antes do Ensaio	45
Figura 14 - Dispersão das Amostras de Solo	46
Figura 15 - Amostras na Bomba de Vácuo	47
Figura 16 - Amostras em Banho Maria.....	48
Figura 17 - Compactador Mecânico	50
Figura 18 - Cilindro com Solo Compactado.....	51
Figura 19 - Corpos de Prova Submersos	52
Figura 20 – Prensa.....	53
Figura 21 - Execução do Ensaio	53
Figura 22 - Esquema de Dimensionamento	62
Figura 23 - Determinação da Espessura das Camadas do Pavimento.	62

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Terminologia do Sistema Unificado.....	16
Tabela 2 - Esquema de classificação pelo Sistema Unificado	17
Tabela 3 - Classificação dos Solos Pelo Sistema Rodoviário.	18
Tabela 4 - Faixa Granulométrica	27
Tabela 5 - Coeficiente de Equivalência (k).....	30
Tabela 6 - Espessura Mínima do Revestimento Betuminoso	31
Tabela 7 - Classificação dos Solos Finos Quanto à Resiliência.....	35
Tabela 8 - Valor Estrutural do Revestimento Betuminoso	37
Tabela 9 - Resumo dos Ensaios	55
Tabela 10 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego.....	58
Tabela 11 - Distribuição de Student	59
Tabela 12 - Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso	60
Tabela 13 - Coeficiente de Equivalência Estrutural.....	61

1. Introdução

O processo de urbanização no Brasil surgiu durante as décadas de 1930 e 1940, logo após a Revolução Industrial (século XVIII e XIX), quando ainda algumas regiões se povoavam de forma acelerada e desorganizada, não levando em consideração a importância devida com as consequências futuras no Brasil.

Atualmente, com o acelerado crescimento dos centros urbanos, há necessidade de construir novos empreendimentos residenciais com vistas a se acomodar a população crescente. Dentro desse contexto, na região central do Brasil a situação não é muito diferente, requerendo o estudo de novas áreas para esse propósito.

Assim, neste trabalho procura-se a caracterização, classificação e comportamento mecânico de solos oriundos de uma área da região administrativa de Sobradinho II no Distrito Federal, para o desenvolvimento dos estudos do subleito desta área onde, futuramente, haverá um condomínio residencial e conseqüentemente será necessária a implantação de vias locais para o tráfego de veículos.

Assim sendo, descreve-se a estrutura organizacional dos 7 Capítulos desta Monografia.

No Capítulo 1 faz-se a contextualização do trabalho justificando o a necessidade deste.

O Capítulo 2 apresenta os objetivos gerais e específicos propostos com vistas ao desenvolvimento desta Monografia.

O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica com breve resumo de conceitos de solos e suas classificações, mas também sobre pavimento e seu dimensionamento.

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e as metodologias utilizadas para os principais estudos/ensaios executados neste trabalho.

No capítulo 5 são apresentadas as análises dos resultados obtidos nos ensaios executados. Com os resultados obtidos, apresenta-se também um dimensionamento típico para as vias internas ao condomínio a ser implantado na área estudada.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais desta Monografia, mas também sugestões para pesquisas futuras.

No Capítulo 7 são apresentadas as principais referências bibliográficas que subsidiaram o desenvolvimento desta monografia.

2. Objetivos

2.1. Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo desenvolver os estudos geotécnicos necessários para a elaboração de um Projeto de Pavimentação além de dimensionar um pavimento flexível de acordo com o método estabelecido pelo DNIT.

2.2. Objetivos Específicos

- I. Inspeccionar a área estuda e coletar amostras;
- II. Realizar ensaios de caracterização (Granulometria; Massa Específica; Limites de Liquidez e Plasticidade) e resistência (Compactação; Expansão; CBR) necessários para dimensionar um pavimento rodoviário;
- III. Caracterizar o solo pela metodologia SUCS e HRB;
- IV. Interpretar os resultados obtidos nos ensaios e determinar se os mesmos atendem os requisitos necessários para utilização do material como subleito de um pavimento flexível.
- V. Dimensionar as camadas de um pavimento flexível pelo método estabelecido pelo DNIT.

3. Revisão Bibliográfica

A seguir apresenta-se um breve resumo de conceitos sobre solos e suas classificações, mas também sobre pavimento rodoviário e seu dimensionamento.

3.1. O Solo

Segundo o Dicionário da Língua Portuguesa – Aurélio – solo é uma porção sólida da superfície terrestre, onde se anda e se constrói. Entretanto sua definição muda de acordo com o contexto em que é usado ou por quem é usado. Na engenharia civil solo é definido como material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica (NBR 6502/95).

A decomposição das rochas é derivada de agentes físicos, químicos, tais como as variações de temperatura e a presença da água, e de agentes biológicos como as ações da fauna e flora, que provocam reações como a hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, entre outros (PINTO, 2006).

O solo é o mais antigo e, possivelmente, o material mais utilizado em obras de engenharia, onde participa como principal material de construção ou como elemento de suporte (EMMERT, 2010). O conhecimento de suas características e comportamento é de grande importância para qualquer tipo de construção, assim é possível prever e evitar acidentes causados por sua movimentação, já este é responsável por toda a sustentação da estrutura.

3.1.1. Tipos de Solo

Os solos são divididos em residual e sedimentar. A distinção dos tipos de solo é feita em função do seu mecanismo de formação.

Solo Residual: São solos formados através da degradação da rocha original cujas propriedades são semelhantes à rocha de origem, encontrando até mesmo blocos isolados de rochas semi-alteradas (AZEVEDO, 2010). Os solos serão residuais se produtos da rocha alterada permanecerem ainda no local. A profundidade dos solos residuais depende principalmente das condições climáticas e do tempo de exposição (TERZAGHI, 1962 apud EMMERT, 2010).

Solo Transportado: Nos solos transportados, os produtos da rocha alterada não premassem no local em que se deu a transformação (TERZAGHI, 1962 apud

EMMERT, 2010). Este tipo de solo sofreu ação de agentes transportadores como chuva e vento.

3.1.2. Classificação do Solos

A principal característica que diferencia um solo do outro é o tamanho de suas partículas. Ao ter contato com qualquer tipo de solo é possível identificar a olho nu algumas de suas características como coloração, consistência e espessura, entretanto não é possível visualizar suas partículas individualmente devido a diversidade do tamanho dos grãos (PINTO, 2006).

A classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) foi inicialmente proposto pelo professor da Universidade de Harvard, nos Estados Unidos, Arthur Casagrande, entre os anos de 1942 e 1944. Este visava a aplicação do sistema na seleção de materiais para projetos de pavimentos de aeroportos. (DAS, 2007).

Esta classificação, publicada pela *American Society for Testing and Materials – ASTM*, em 1990, fundamenta-se na identificação dos solos conforme as suas propriedades de textura e plasticidade, e reúne-os de acordo com o seu comportamento. Esse sistema leva em conta a porcentagem de pedregulhos, areias e finos; a forma da curva granulométrica; a plasticidade e a compressibilidade (SOUSA, 2013). Atualmente é o sistema mais utilizado na geotecnia em geral.

Neste sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, como mostra a Tabela 1. As cinco primeiras letras indicam o tipo principal do solo e as quatro restantes correspondem a dados complementares dos solos.

Tabela 1 - Terminologia do Sistema Unificado

G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

(Fonte: PINTO, 2006)

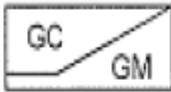
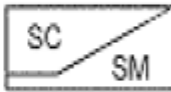
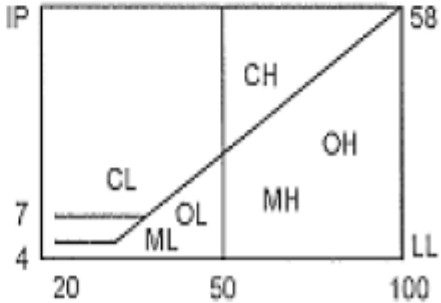
O Sistema Unificado de Classificação dos Solos agrupa os solos em duas categorias:

Solos Grossos – mais de 50% em peso dos grãos são retidos na peneira #200. As iniciais do grupo são G ou S, sendo que a letra G representa solo pedregulhoso ou pedregulho e a letra S um solo arenoso ou areia (DAS, 2007).

Solos Finos – mais de 50% em peso dos grãos passam na peneira #200. Os prefixos que indicam este grupo são as letras M (que representa silte inorgânico) e C (que indica argila inorgânica). Neste grupo também há a presença de siltes e argilas orgânicas que é identificado pela letra O. Para designar a turfa, terra preta (muck) e outros solos altamente orgânicos é empregado o símbolo Pt (DAS, 2007).

Na Tabela 2 é apresentado um esquema para a classificação pelo Sistema Unificado.

Tabela 2 - Esquema de classificação pelo Sistema Unificado

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW	CNU > 4 e 1 < CC < 3
			GP	CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	GC	
			GM	
	5 < #200 < 12		GW-GC, GP-GM, etc.	
	S > G : S	% P #200 < 5	SW	CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP	CNU < 6 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	SC	
SM				
5 < #200 < 12		SW-SC, SP-SC, etc.		
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

(Fonte: PINTO, 2006)

Outro sistema de classificação dos solos é o Sistema da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) também conhecido como Sistema Rodoviário (DAS, 2007).

Sobre o Sistema Rodoviário Pinto (2006) afirma:

Neste sistema, também se inicia a classificação pela constatação da porcentagem de material que passa na peneira nº 200, só que são considerados solos de granulação grosseira os que têm menos de 35% passando nesta peneira, e não 50% como na Classificação Unificada. Estes são os solos dos grupos A-1, A-2, e A-3. Os solos com mais de 35% passando na peneira nº 200 formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

Na Tabela 3 é apresentado um quadro de classificação dos solos segundo o Sistema Rodoviário.

Tabela 3 - Classificação dos Solos Pelo Sistema Rodoviário.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
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.

Fonte: (DNIT,2006)

3.2. O Pavimento Rodoviário

O pavimento rodoviário é a superestrutura composta por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre a infraestrutura ou terreno de fundação, denominada de subleito (DNIT, 2006).

Construído sobre a superfície de terraplenagem, o pavimento é dimensionado para resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e de ações do clima, e oferecer aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com comodidade, economia e segurança. (BERNUCCI et al, 2010).

O comportamento estrutural do pavimento depende da espessura de cada uma de suas camadas, da rigidez destas e do subleito, assim como da interação entre as diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI et al, 2010).

Estas camadas podem possuir uma ou mais funções específicas e devem oferecer aos veículos melhores condições de suporte e rolamento em qualquer circunstância climática (BALBO, 2007).

O conjunto de camadas do pavimento deve ter como objetivo, do ponto de vista funcional e econômico, resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto a comodidade e segurança do usuário além de resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento (ABNT NBR 7207, 1982).

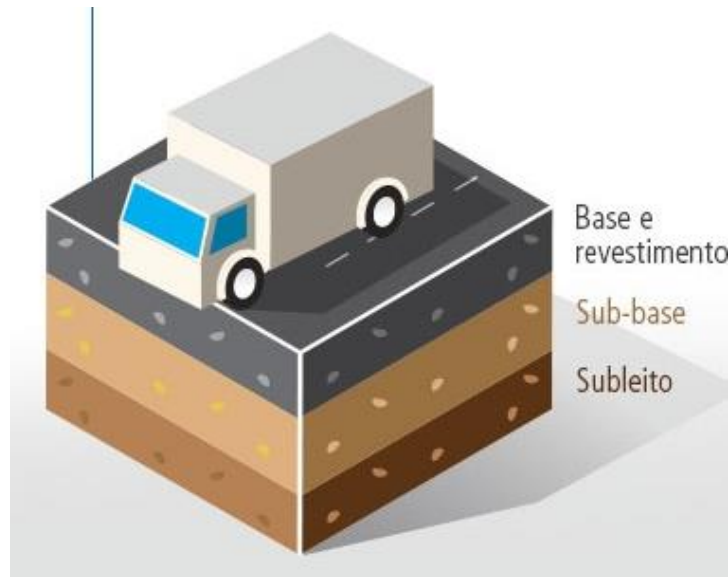
3.2.1. Classificação dos Pavimentos

Os pavimentos podem ser divididos em três grupos: rígidos, semirrígidos e flexíveis.

Rígido: aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (DNIT,2006).

Pavimentos rígidos possuem revestimento de cimento Portland. Segundo Quirino (2013), os pavimentos rígidos são constituídos basicamente por três camadas “revestimento”, “base” e “subleito”. Devido a existência de placas de concreto, o revestimento praticamente absorve a solicitação, e ao chegar ao terreno de fundação a carga encontra-se amortecida. A figura 1 ilustra a seção típica de um pavimento rígido.

Figura 1: Seção Tipo de Pavimento Rígido

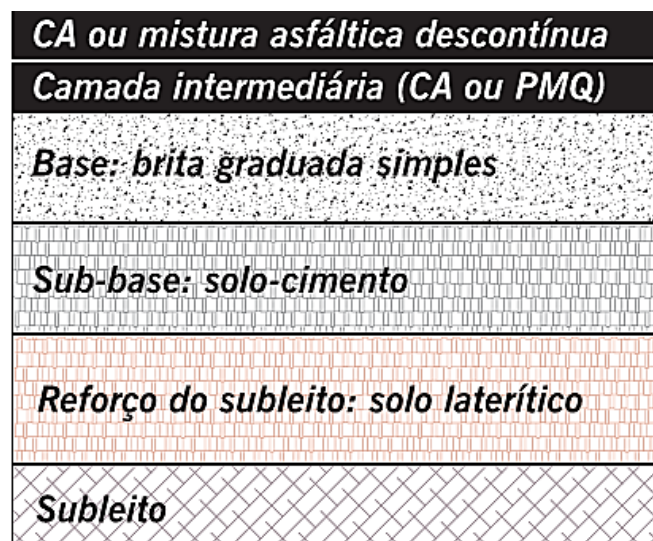


Fonte: (www.mapadaobra.com.br)

Semirrígido: caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias (DNIT,2006).

Sua definição é semelhante a do pavimento flexível, entretanto a base do pavimento é constituída de material estabilizado quimicamente, como: solo-cimento, solo-cal e brita graduada tratado com cimento (SENÇO,1997). Na Figura 2 é apresentada a seção tipo de um pavimento semirrígido.

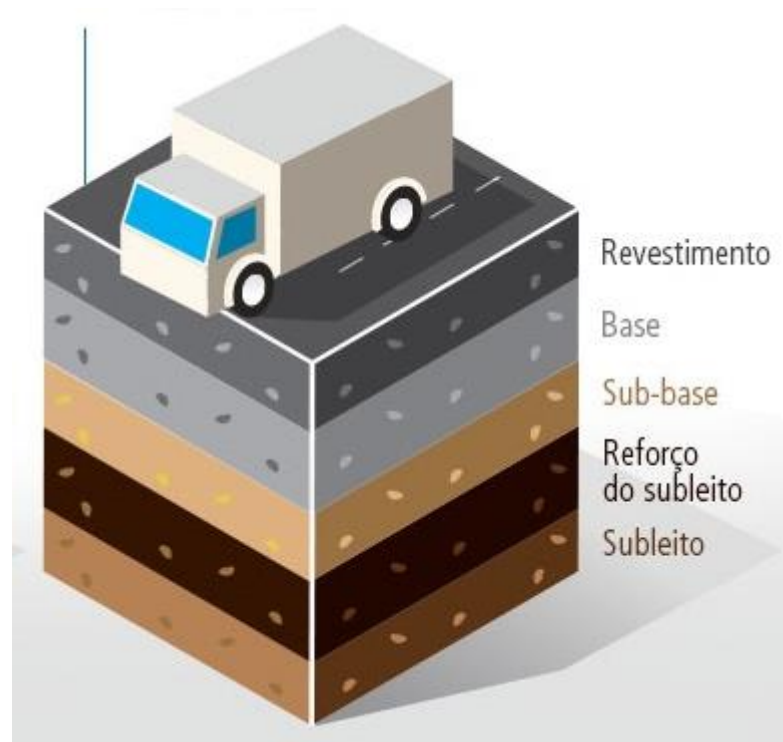
Figura 2: Pavimento Semirrígido com Sub-Base de Solo-Cimento



Fonte: (BERNUCCI, 2010)

Flexível: aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (DNIT,2006). O revestimento de um pavimento flexível é composto de uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. É composto por camadas de revestimento, base, sub-base, reforço de subleito (quando necessário e subleito, como mostrado na Figura 3.

Figura 3: Seção Tipo Pavimento Flexível

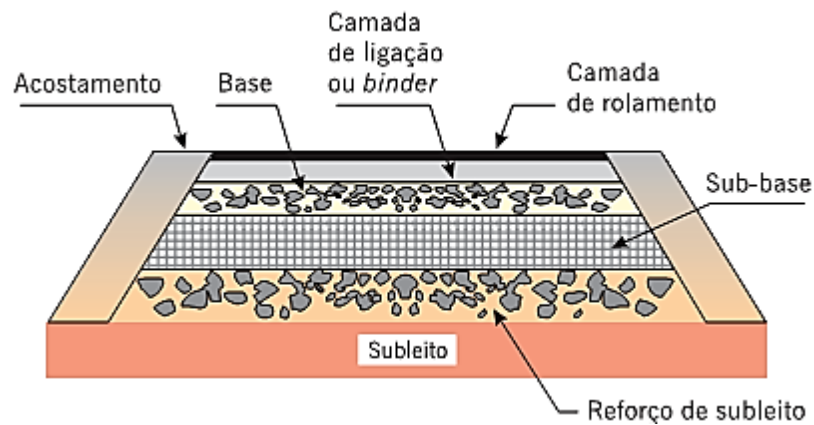


(Fonte: www.mapadaobra.com.br).

3.2.2. Camadas de Um Pavimento Rodoviário

O pavimento é constituído por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 4). Dependendo do volume de tráfego e dos materiais disponíveis pode haver ausência de algumas camadas (BERNUCCI et al, 2010).

Figura 4: Camadas do Pavimento



(Fonte: BERNUCCI,2010)

3.3.2.1. Subleito

O subleito é a camada mais interna do pavimento, sendo considerada a fundação do pavimento, ou seja, é o material natural da região onde se pretende inserir o pavimento (BALBO,2007).

Para Marques (2012) subleito é o terreno de fundação onde será apoiado todo o pavimento. Deve ser feito estudo das características do solo até a profundidade de 1,5m, profundidade em que atuam significativamente as cargas impostas pelo tráfego.

Caso o material do subleito obtiver $CBR < 2\%$, ele deve ser substituído por outro de melhor resistência ($CBR > 2\%$) até pelo menos 1,00 metro, podendo ser utilizado como material de sub-base quando o CBR do subleito for $\geq 20\%$ (MARQUES, 2012).

3.3.2.2. Reforço do Subleito

Segundo Balbo (2007) o reforço do subleito melhora a capacidade de suporte de carga do subleito. Possui espessura variável, característica técnica inferior a da sub-base e inferior à do material do subleito. A utilização de reforço é na maior parte dos casos quando a capacidade de carga do material do subleito for muito baixa.

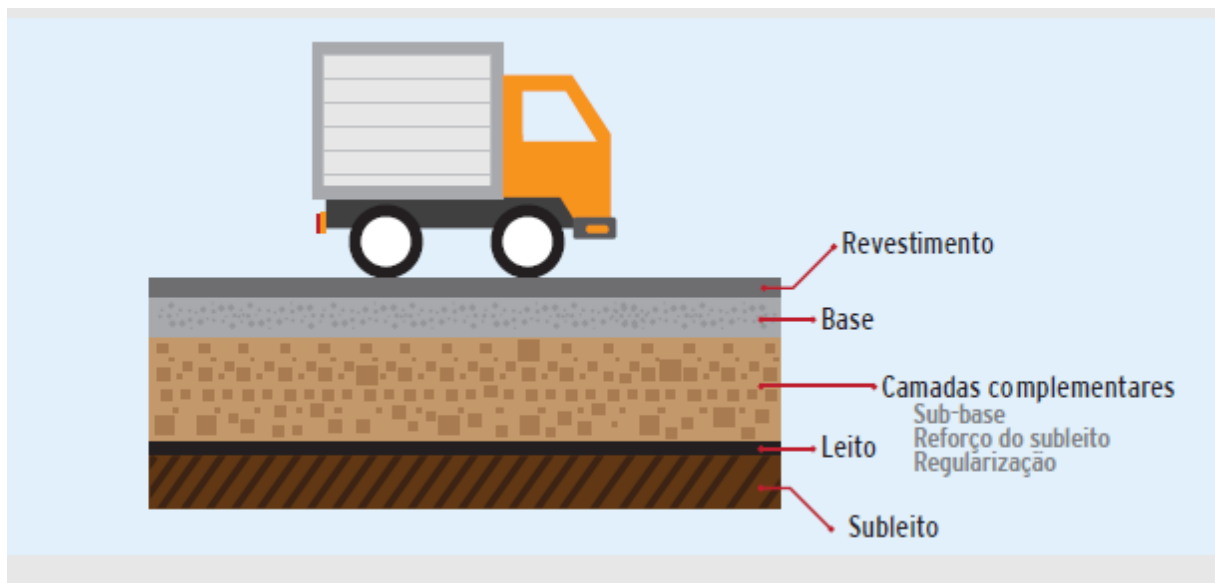
Os materiais adequados para o reforço do subleito são aqueles que apresentam CBR superior ao do subleito e expansão $\leq 1\%$ (medida com uma sobrecarga de 10 lb) (DNIT,2006).

3.3.2.3. Sub-Base

É a camada complementar da base, possui as mesmas funções desta. Visando a diminuição de custos, quando a espessura necessária para que a base transmita adequadamente os esforços às camadas inferiores for elevada, a base é dividida em duas camadas, uma delas chamada de sub-base. Desta maneira, tornando mais simples a execução do pavimento. Pode ser executada sobre o subleito ou reforço do subleito (BALBO,2007).

Materiais usados na composição da sub-base devem possuir $CBR \geq 20\%$, índice de grupo nulo e expansão $\leq 1\%$ (DNIT,2006).

Figura 5 - Camadas do Pavimento Flexível



(Fonte: CNT,2014)

3.3.2.4. Base

É a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre o qual será executado o revestimento asfáltico (BALBO,2007).

O solo utilizado para executar a base do pavimento deve possuir Limite de liquidez $\leq 25\%$, Índice de Plasticidade $\leq 6\%$, $CBR \geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$ (DNIT, 2007).

3.3.2.5. Revestimento

É camada que recebe diretamente cargas verticais e horizontais oriundas do tráfego, deve ser impermeável tanto quanto possível e oferecer a melhor superfície de

rolamento para os veículos, boas condições de conforto de segurança aos usuários e ser resistente aos desgastes (BALBO,2007).

Segundo Bernucci (2010), “os revestimentos das estruturas de pavimento em geral são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão”.

3.3. Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

Senço (1997, p. 409), faz a seguinte afirmação quanto ao dimensionamento de um pavimento:

O dimensionamento de um pavimento consiste na determinação das espessuras das camadas de reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, de forma que essas camadas sejam suficientes para resistir, transmitir e distribuir as pressões resultantes da passagem dos veículos ao subleito, sem que o conjunto sofra ruptura, deformações apreciáveis ou desgaste superficial excessivo.

No dimensionamento, considera-se que as cargas aplicadas são estáticas, porém a estrutura é submetida a cargas repetidas o que acarreta em deformações permanentes e elásticas com intensidade de acordo com o número de destas repetições (SENÇO, 1997).

O dimensionamento de um pavimento compreende as seguintes etapas principais (PINTO; PREUSSLER, 2002):

- Determinação dos materiais que constituirão cada camada;
- Especificação dos sistemas de drenagem subterrânea a subsuperficial necessários de acordo com as características do subleito;
- Comparativo econômico entre as várias soluções no que diz respeito a materiais disponíveis e ao transporte necessário;
- Investigações geotécnicas dos solos e materiais disponíveis o que afeta diretamente no custo de construção;
- Conhecimento das características climáticas da região onde será implantado o projeto, visto que o pavimento sofre diretamente a ação climática o que acarreta na intemperização de suas camadas superficiais;

- Pleno conhecimento da natureza das cargas decorrentes do tráfego, e que levam a fadiga dos materiais. Esse é um importante aspecto que deve ser levado em consideração no dimensionamento do pavimento.

Os métodos de dimensionamento podem ser classificados basicamente em: métodos mecânicos, métodos empíricos e os métodos técnico-experimentais.

3.3.1. Métodos Mecânicos

Estes métodos são baseados na teoria da elasticidade, onde a partir da utilização de softwares pode-se prever o funcionamento da estrutura solicitada, podendo assim alterar os materiais ou a espessura das camadas de forma que a solicitação do conjunto seja equilibrada, sem sobrecarregar nenhuma camada, evitando assim a ruptura do pavimento (PINTO; PREUSSLER, 2002).

São teoricamente embasados nos seguintes métodos:

- Teoria de Boussinesq (FRANÇA, 1885) – Meios homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos;
- Teoria de Burmister (EUA, 1943) – Cálculo de tensões e deslocamentos em sistemas de camadas elásticas;
- Método de Odemark (SUÉCIA, 1949) – Método das espessuras equivalentes.

3.3.2. Métodos Empíricos

Os métodos empíricos são aqueles que se baseiam em coeficientes e correlações obtidas através de experiências e verificações repetidas inúmeras vezes, visando à determinação de espessuras para cada camada de modo que essa determinação obedeça ao critério de ruptura por deformações permanentes (PINTO; PREUSSLER, 2002).

3.3.2.1. Método do DNIT

O método foi desenvolvido pelo engenheiro Murilo de Souza Lopes, e tem como base as características de suporte do subleito, o número de repetições de um eixo de carga padrão de 8,2t e a vida útil esperada para a estrutura (BAPTISTA, 1978).

O método tem como base o trabalho “Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume”, de autoria de W. J. Tumbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 160).

A capacidade de suporte é determinada pelo ensaio de ISC ou CBR, desenvolvido com corpos-de-prova moldados em laboratório, para as condições de massa específica aparente e umidade de campo.

Com relação aos materiais empregados na estrutura do pavimento, o método define coeficientes de equivalência estrutural, sendo estes embasados nos resultados obtidos na Pista Experimental da AASHTO, com algumas alterações (PINTO; PREUSSLER, 2002).

O método do DNIT dimensiona a estrutura do pavimento para que a mesma não sofra ruptura por cisalhamento ou pelo acúmulo de deformações permanentes.

O subleito e as demais camadas do pavimento devem ser devidamente compactados e de acordo com as “especificações gerais” o grau de compactação em nenhuma das camadas deve ser inferior a 100%.

Para evitar a ruptura precoce do pavimento, de acordo com Brasil (2006a, p. 142), o método recomenda ainda as seguintes características mínimas para os materiais a serem empregados:

- Os materiais de subleito devem apresentar $CBR \geq 2\%$ e expansão $\leq 2\%$;
- Os materiais para reforço de subleito devem apresentar CBR maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$. Recomenda-se utilizar $CBR \geq 10\%$;
- Os materiais de sub-base devem apresentar $CBR \geq 20\%$, expansão $\leq 1\%$ e $IG=0$;
- Os materiais empregados como base devem apresentar $CBR \geq 80\%$, expansão $\leq 0,5\%$, limite de liquidez $\leq 25\%$ e índice de plasticidade $\leq 6\%$. Caso os valores

de LL e LP forem superiores aos permitidos, o material só poderá ser utilizado como base se apresentar um equivalente de areia > 30%.

Os materiais utilizados como base granular devem estar enquadrados numa das faixas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Faixa Granulométrica

Tipos Peneiras	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
N° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: (DNIT, 2006)

Para um número de repetições de eixo padrão $N \leq 5 \times 10^6$, podem ser empregados como base materiais com CBR $\geq 60\%$ e enquadrados nas faixas E e F de acordo com a Tabela 3.

No caso de repetições de eixo padrão $N > 5 \times 10^6$ podem ser usados materiais enquadrados nas faixas A, B ou C, de acordo com a Tabela 6, mostrado no tópico "d".

Para dimensionar um pavimento utilizando o método em pauta os seguintes fatores devem ser levados em consideração.

a. Estudo de Tráfego

Os estudos de tráfego obtêm através de métodos sistemáticos de coleta relativo ao inter-relacionamento dos cinco elementos fundamentais do tráfego: motorista, pedestre, veículo, via e meio ambiente. Com base nos resultados obtidos nas etapas que compreendem o estudo de tráfego é possível determinar a quantidade de veículos que circulam em uma via em certo período de tempo, assim como prever o aumento

do fluxo com o passar dos anos de forma que o projeto continue atendendo as necessidades da via. (DNIT, 2006)

De acordo com Pinto e Preussler (2002), “na determinação do número “N” são considerados fatores relacionados com a composição do tráfego e referidos a cada categoria de veículos, definida em função da carga transportada e do número de eixos dos veículos”.

Segundo Senço (1997), o número de operações de um eixo padrão “N” é determinado pela seguinte equação:

$$N = 365 \times P \times Vm \times FC \times FE \times FR$$

Sendo:

N= número equivalente de repetições do eixo de 8,2tf;

365= número de dias no ano;

Vm= volume médio diário do tráfego no sentido mais solicitado, no ano médio do período de projeto;

P= período do projeto em anos;

FE= fator de eixos;

FC= fator de equivalência de carga para o eixo padrão de 8,2tf;

FR= fator climático regional, adotado FR=1,0.

O fator de eixos (FE) é o coeficiente que tem a função de converter o tráfego em número de veículos padrão no sentido do fluxo do tráfego, em número de passagens de eixos equivalentes, devendo-se calcular o número de eixos dos inúmeros tipos de veículos que irão trafegar na via (SENÇO, 1997). O fator de eixos é definido pela equação abaixo:

$$FE = \left(\frac{P2}{100}\right) \times 2 + \left(\frac{P3}{100}\right) \times 3 + \dots + \left(\frac{PN}{100}\right) \times n$$

Sendo:

FE = fator de eixos;

P_2 = porcentagem de veículos de 2 eixos;

P_3 = porcentagem de veículos de 3 eixos;

P_n = porcentagem de veículos de n eixos.

Observação: No caso de ausência de dados, é indicado adotar-se $FE=2,07$.

O fator de carga (FC) é o coeficiente que multiplicado pelo número de eixos ao qual o pavimento estará solicitado, fornece o número equivalente de operações de eixo padrão. É o efeito da passagem de um veículo qualquer, com o efeito provocado pela passagem de um veículo tido como padrão, considerando ESRD de 8,2tf (SENÇO, 1997).

Para a determinação de FE e FC, é necessária a execução de uma contagem de tráfego no trecho em estudo a fim de se obter a composição do tráfego e determinar o seu volume total (DNIT, 2006).

Segundo Souza (1976), classifica-se os veículos comerciais nas seguintes categorias:

- a) Carros de passeio;
- b) Ônibus;
- c) Caminhões leves;
- d) Caminhões médios;
- e) Caminhões pesados;
- f) Reboques e semi-reboques.

A metodologia de cálculo adotada pelo DNIT considera no cálculo do número "N" apenas os caminhões e ônibus, sendo que os automóveis e caminhões leves são desprezados (DNIT, 2006).

b. Fator Climático Regional (FR)

Para que possam ser levadas em consideração as condições de temperatura e umidade durante todas as estações do ano, o número de repetições do eixo padrão

“N” deve ser multiplicado por um coeficiente de fator climático (DNIT, 2006). O valor desse coeficiente, na pista experimental da AASHTO, ficou compreendido entre 0,2 (baixo teor de umidade) e 5,0 (materiais praticamente saturados) (PINTO; PREUSSLER, 2002).

O método considera mais apropriado a adoção de um coeficiente, quando se toma, para projeto, um valor de CBR compreendido entre o que se obtém antes e o que se obtém após da saturação, isto é, um que representa a umidade de equilíbrio. O valor de FR adotado é 1,0, de acordo com os resultados de pesquisas desenvolvidas pelo IPR/DNER (PINTO; PREUSSLER, 2002).

c. Coeficiente de Equivalência Estrutural

O coeficiente estrutural é determinado em função de uma espessura granular para uma unidade de espessura de um determinado material considerado como padrão (DNIT,2006).

De acordo com Pinto e Preussler (2002, p. 170), “na falta de correlações experimentais no Brasil, são adotados valores adaptados da experiência rodoviária norte-americana e decorrentes, principalmente, das pistas experimentais da AASHTO. ” Os valores de coeficientes estruturais utilizados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficiente de Equivalência (k)

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: (DNIT, 2006)

Os coeficientes para as diversas camadas do pavimento respeitam a seguinte nomenclatura:

- Reforço: K_{Ref}
- Sub-base: K_{SB}
- Base: K_B
- Revestimento: K_R

d. Espessura Mínima da Camada de Revestimento

O DNIT determina as espessuras mínimas para a camada de revestimento, em função esforços impostos pelo tráfego.

Para Pinto e Preussler (2002, p.171), “A espessura e a qualidade do revestimento influem no comportamento conjunto da estrutura do pavimento, principalmente quanto aos esforços de tração sob repetição de cargas nas camadas superiores.”

As espessuras adotadas estão apresentadas na Tabela 6 e são de uso exclusivo em revestimentos apoiados em bases de característica puramente granular. Esses valores foram determinados através de inúmeras observações.

Tabela 6 - Espessura Mínima do Revestimento Betuminoso

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: (DNIT, 2006)

e. Dimensionamento do Pavimento

As espessuras de base (B), sub-base (h_{20}) e reforço de subleito (h_n), são obtidas através da solução sucessiva das seguintes inequações:

$$(R \times K_R) + (B \times K_B) \geq H_{20}$$

$$(R \times K_R) + (B \times K_B) + (h_{20} \times K_S) \geq H_n$$

$$(R \times K_R) + (B \times K_B) + (h_{20} \times K_S) + (h_n \times K_{Ref}) \geq H_m$$

Sendo:

K_R : coeficiente de equivalência estrutural do pavimento;

R: espessura do revestimento;

K_B : coeficiente de equivalência estrutural da base;

B: espessura da base;

H_{20} : espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;

K_S : coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

h_{20} : espessura da sub-base;

H_n : espessura de revestimento necessária para proteger o reforço de subleito;

K_{Ref} : coeficiente de equivalência estrutural do reforço de subleito;

h_n : espessura do reforço de subleito;

H_m : espessura total de pavimento necessária para proteger o material com CBR igual em %.

A utilização das inequações acima deve respeitar as seguintes considerações:

- Caso o CBR da sub-base seja superior a 20%, deve-se utilizar o valor máximo de 20%;

- A espessura total mínima para as camadas granulares é de 15 cm;
- Se o CBR da sub-base for maior ou igual a 40% e o $N \leq 10^6$, substitui-se na inequação, $(R \times K_R) + (B \times K_B) \geq H_{20}$, H_{20} por $0,8 \times H_{20}$;
- Para $N > 10^7$, recomenda-se substituir na inequação $(R \times K_R) + (B \times K_B) \geq H_{20}$, H_{20} por $1,2 \times H_{20}$.

As espessuras H_m , H_n e H_{20} , são determinadas pela equação a seguir, em função do número N e do CBR.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598}$$

Devem ser levadas em consideração as seguintes observações (DNIT, 2006):

- Supõe-se que exista uma drenagem superficial adequada e que garanta que o lençol freático fique rebaixado a pelo menos 1,5 m em relação ao greide de terraplenagem;
- No caso da existência de materiais de subleito cujo CBR seja $< 2\%$, é sempre recomendável que seja feita a substituição deste material a uma espessura de pelo menos 1m por um material cujo CBR seja $< 2\%$ (Recomenda-se CBR $\geq 10\%$);
- As espessuras máximas e mínimas para compactação das camadas granulares são 20 cm e 10 cm, respectivamente.

No que diz respeito ao dimensionamento de acostamentos, pode-se dizer que basicamente a estrutura definida é a mesma adotada para a pista de rolamento, variando-se apenas a espessura e a categoria o material da camada de revestimento (DNIT, 2006).

Para Pinto e Preussler (2002, p. 173), “a adoção nos acostamentos da mesma estrutura da pista de rolamento, tem efeitos benéficos no comportamento desta última e simplifica os problemas de drenagem. ”

3.3.2.2. Método da Resiliência

Devido a necessidade de considerar o estudo da resiliência dos solos na avaliação estrutural de pavimentos bem como o no dimensionamento de esforços, no ano de 1978, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de

Estradas e Rodagem (IPR/DNER) em conjunto com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) iniciaram uma pesquisa denominada DINAPAV (Dinâmica dos Pavimentos) (PINTO; PREUSSLER, 1994).

A partir dos resultados alcançados pela pesquisa foi possível classificar os solos brasileiros quanto à resiliência. Correlacionando os resultados alcançados do módulo de resiliência com seus respectivos valores de CBR, pôde-se determinar o módulo resiliente para misturas betuminosas, além dos valores de deflexão admissíveis baseados em modelos de fadiga para concretos asfálticos (PINTO; PREUSSLER, 1994).

O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT (2005) faz a seguinte afirmação quanto as considerações do método:

[...] o procedimento leva, portanto, em consideração os indicadores mais importantes na definição de uma estrutura de pavimento: deflexão da superfície, diferença entre as tensões horizontal de tração e vertical de compressão na fibra inferior do revestimento, tensão vertical no subleito.

Utiliza-se o termo “resiliência” e não “elasticidade” para tornar clara a ideia de que os solos e os materiais de pavimentação apresentam comportamento elástico apenas quando submetidos a cargas de curta duração, como ocorre com a passagem de veículos.

A determinação do módulo de deformação resiliente e do coeficiente de Poisson dos solos é feita através de ensaios dinâmicos, em laboratório como o ensaio triaxial de carga repetida (PINTO; PREUSSLER, 1994).

a. Classificação dos Solos Finos Quanto à Resiliência

Segundo o DNER (1996) os solos finos coesivos que frequentemente encontram-se em subleitos, são classificados, de acordo com os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais dinâmicos, nos seguintes tipos:

Solos Tipo I: baixo grau de resiliência – apresentam com comportamento como subleito e reforço, com possibilidade ainda de utilização como camada de sub-base.

Solos Tipo II: grau de resiliência intermediário – apresenta comportamento regular como subleito. Seu reforço requer estudos e ensaios especiais.

Solos Tipo III: grau de resiliência elevado – não aconselhável seu emprego em camadas do pavimento. Como subleito, requer cuidados e estudos especiais.

Essa classificação é obtida em função do valor de CBR correspondente e da percentagem de silte da fração fina (S), como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação dos Solos Finos Quanto à Resiliência

CBR (%)	S (%)		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Fonte: (DNIT, 1996)

A percentagem de silte (S) é obtida através da seguinte equação:

$$S = 100 - \frac{P_1}{P_2} \times 100$$

Sendo:

S = percentagem de silte da fração fina que passa na peneira 0,074 mm;

P₁ = percentagem em peso de material cujas partículas tenham diâmetro inferior a 0,005 mm, determinado na curva granulométrica;

P₂ = percentagem em peso de material cujas partículas tenham diâmetro inferior a 0,074 mm, determinado na curva granulométrica.

b. Determinação da Estrutura Total do Pavimento

A espessura total do pavimento (H_t), em termos de material granular cujo equivalente estrutural K =1,00, em função do valor do CBR e do número de repetições do eixo padrão para o tráfego N, é obtida pela seguinte equação:

$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598}$$

c. Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso

Para determinação da espessura mínima de revestimento betuminoso, são definidas as constantes relacionadas à resiliência do subleito, obtidas a partir da classificação do mesmo quanto à resiliência da seguinte forma:

- Solos Tipo I: $I_1 = 0$ e $I_2 = 0$
- Solos Tipo II: $I_1 = 1$ e $I_2 = 0$
- Solos Tipo III: $I_1 = 0$ e $I_2 = 1$

A espessura mínima de revestimento é determinada pela equação abaixo:

$$H_{CB} = - 5,737 + \frac{806,961}{D_p} + 0,972 I_1 + 4,101 I_2$$

Sendo:

D_p = Deflexão de projeto, 0,01mm;

H_{CB} = espessura mínima da camada betuminosa.

d. Critério de Deflexão Admissível

A partir dos estudos de PREUSSLER, PINTO & MEDINA, foi possível determinar uma equação que determina o número acumulado de repetições N da deflexão D , que leva a ruptura por fadiga do revestimento betuminoso. A equação é a apresentada a baixo:

$$\log D_p = 3,148 - 0,188 \log N$$

Desse modo, a deflexão D_p deve ser menor ou igual à deflexão admissível D_{adm} .

e. Valor Estrutural do Revestimento Betuminoso

O valor estrutural (VE) do revestimento betuminoso é obtido pela Tabela 8:

Tabela 8 - Valor Estrutural do Revestimento Betuminoso

Tipo de Subleito	N				
	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
I	4,0	4,0	3,4	2,8	2,8
II	3,0	3,0	3,0	2,8	2,8
III	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Fonte: (DNER, 1996)

O valor estrutural é determinado em função da classificação do solo quanto à resiliência e do número projetado de repetições do eixo padrão (N) determinado em projeto.

f. Espessura da Camada Granular

A espessura da camada granular é determinada a partir da equação abaixo:

$$H_{CB} \times V_E \times H_{CG} = H_t \therefore H_{CG} \leq 35 \text{ cm}$$

Sendo:

H_{CB} = espessura mínima da camada betuminosa;

V_E = valor estrutural do revestimento betuminoso;

H_{CG} = espessura máxima da camada granular;

H_t = espessura total do pavimento.

São considerados como camada granular, as bases, sub-bases ou reforços constituídos por materiais de característica granular, desde que apresentem menos de 35% em peso passado da peneira 0,074 mm.

g. Sub-base e/ou Reforço do Subleito

A aplicação de sub-base ou reforço mostra-se vantajosa no caso de subleito com solo Tipo III. A espessura de sub-base ou reforço H_R é determinada a partir a seguinte expressão:

$$H_R = \frac{H_{t1} - H_{t2}}{0,70}$$

Sendo:

$H_R \geq 30$ cm;

H_{t1} = espessura equivalente correspondente ao CBR do subleito;

H_{t2} = espessura equivalente correspondente ao CBR da sub-base ou reforço de subleito.

h. Revestimento Betuminoso em Camadas Integradas

A utilização de um revestimento em camadas integradas de concreto asfáltico e pré-misturado torna-se uma alternativa que pode ser abordada a partir das características de deformabilidade das misturas utilizadas. O procedimento analítico aplicado leva em consideração o critério de igualdade de deflexões. Para isso empregam-se as seguintes equações:

$$H_{PM} = \frac{H_{cb} - H_{ca}}{\mu^{1/3}}$$

Sendo:

H_{PM} = espessura de pré-misturado (cm);

H_{CB} = espessura total do revestimento em concreto asfáltico (cm);

H_{CA} = espessura de concreto asfáltico (cm);

M_{PM} = módulo de resiliência do pré-misturado (kgf/cm²);

M_{CA} = módulo de resiliência do concreto asfáltico (kgf/cm²).

Essa combinação deve satisfazer as seguintes condições:

$$H_{CM} \geq H_{CA}$$

$$H_{PM} = 1,4 \text{ a } 1,6 H_{CA}$$

$$H_{PM} + H_{CA} = H_{BC}$$

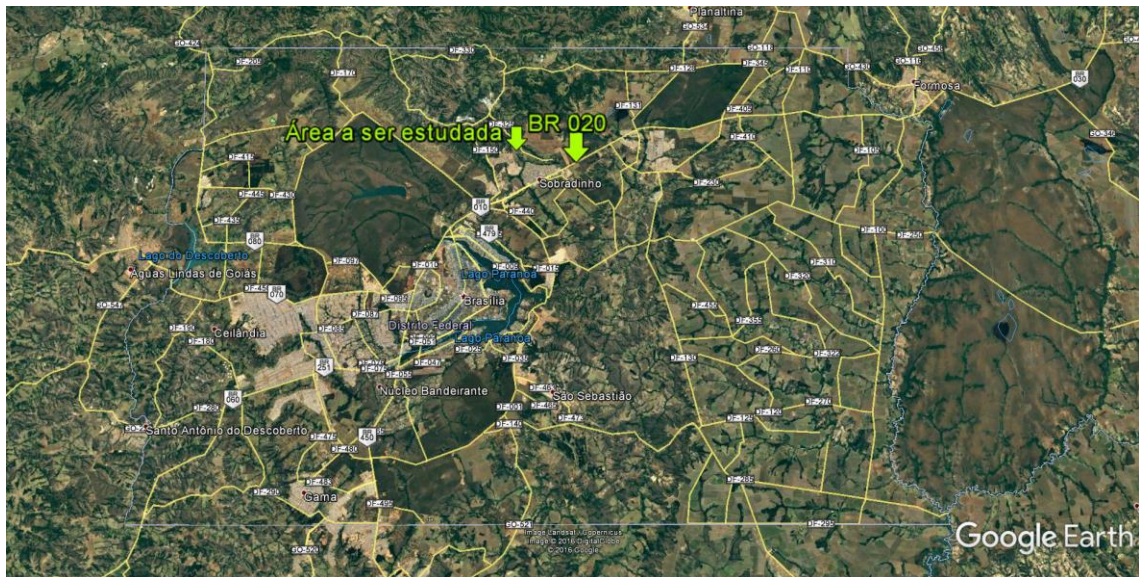
$$H_{PM} = 0,60 H_{CB}$$

4. Metodologia

4.1. Seleção dos Materiais

Devido a necessidade de estudar o comportamento dos solos, foram retiradas dez amostras do solo para ensaios de caracterização e resistência da área. A figura abaixo mostra a localização da área de retirada das amostras.

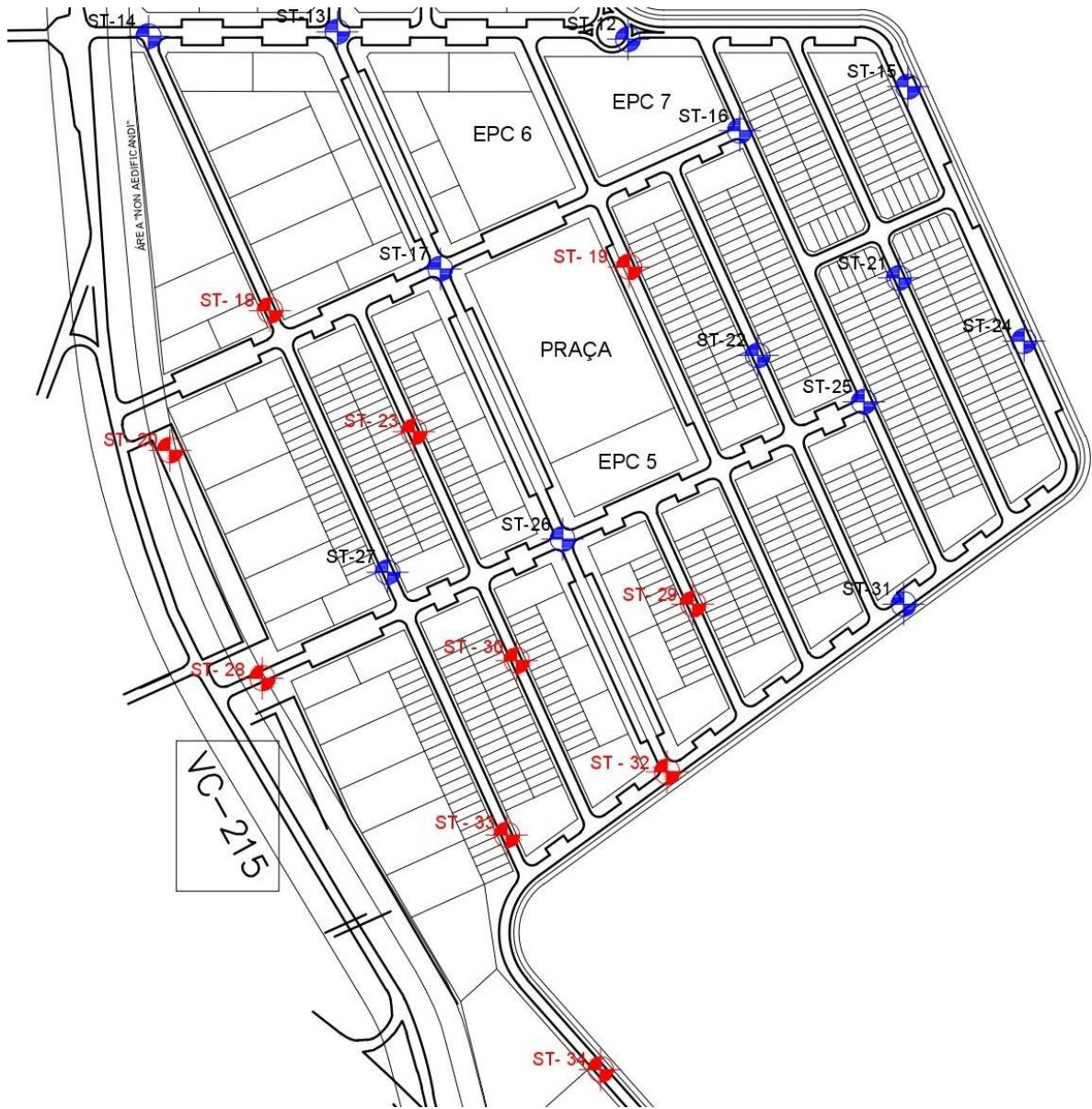
Figura 6 - Localização da Área Estudada



(Fonte: Google Earth)

O Manual de Pavimentação do DNIT determina que o espaçamento máximo entre dois furos, no sentido longitudinal, seja entre 100 e 200 metros. Devido a extensão da área estudada seriam necessários a realização de 41 furos de sondagem, com profundidade entre 0,5 e 1,5 metros. Entretanto, para viabilidade deste trabalho, foram coletadas amostras de 10 pontos, os quais estão destacados em vermelho na Figura 7, para realizar ensaios e caracterização e resistência dos solos.

Figura 7 - Furos de Sondagem



(Fonte: TERRACAP)

Foram coletados aproximadamente 13 kg de solo de cada um dos pontos estudados, pelo método de sondagem a trado (Figura 8). Para dar continuidade ao trabalho, as amostras foram levadas ao laboratório de geotecnia, situado no Uniceub, campus Taguatinga II, onde as amostras foram colocadas para secar até sua umidade higroscópica (Figura 9) e preparadas de acordo a norma NBR 6457/86 Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Figura 8 - Sondagem a Trado



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

Figura 9 - Secagem de Amostras



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

4.2. Análise Granulométrica

4.2.1. Peneiramento Grosso

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7181/84 Solo – Análise Granulométrica. Foram separados 2,00 kg de cada amostra e colocadas para secar na estufa. A amostra seca foi passada pela peneira de 2mm e destorroada com auxílio do almofariz. Foi obtido aproximadamente 1,5 kg de solo de cada ponto de amostra para realização da análise granulométrica e dos demais ensaio de caracterização.

Realizou-se o peneiramento grosso de acordo com a NBR 7181/84, passando a amostra na peneira 2,00 mm para a retirada da fração grossa do solo que, para desagregar as partículas finas de solo aderidas aos grãos de maior dimensão, é levada e o material retido na peneira deveria ser levado a estufa, entretanto, após feita a lavagem o a quantidade de material restante foi considerado irrelevante por apresentar pequena quantidade de amostra.

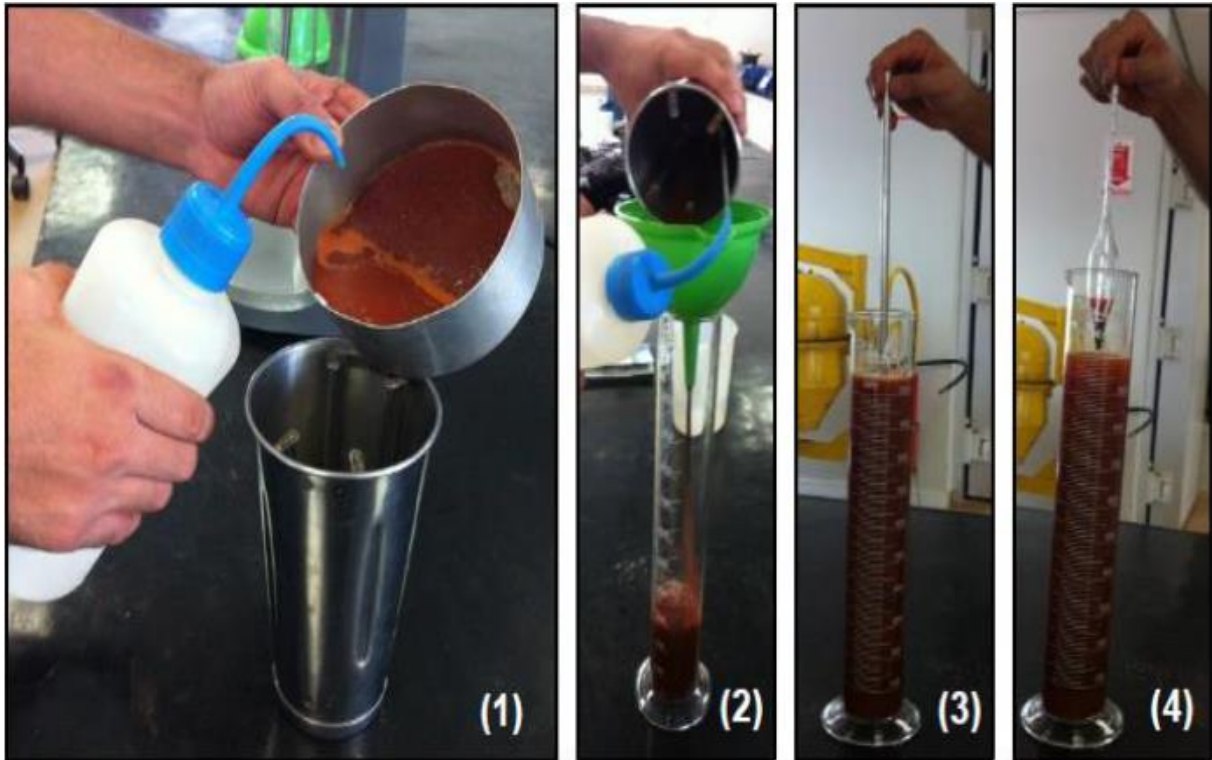
4.2.2. Sedimentação

O ensaio de sedimentação foi realizado de duas maneiras: com defloculante, utilizando o hexametáfosfato de sódio em uma solução de 125 cm³, com a concentração de 45,7 g de sal por 1000 ml de solução e sem defloculante, apenas com água destilada.

Duas amostras de 70g cada foram imersas, uma em defloculante e outra em água destilada, e deixadas em repouso por mais de 12 horas de acordo com o procedimento exigido pela NBR 7181/84.

Após o período de repouso a amostra com defloculante foi levada a ação do aparelho dispersor durante 15 min (1) e em seguida transferido do copo dispersor para a proveta de 1000ml e então adicionada água destilada até a marca de 1000ml (2). A amostra sem defloculante foi transferida diretamente para a proveta, após o período de repouso, e esta foi completada com água destilada até a marca de 1000ml. A partir daí o procedimento seguido é o mesmo para as duas amostras.

Figura 10 - Sequência de Procedimentos do Ensaio de Sedimentação



(Fonte: SOUZA, 2013)

Antes de iniciar as leituras com o densímetro é feita a agitação do material durante um minuto para pôr as partículas de solo em suspensão (3). Imediatamente após o término da agitação, anotou-se o horário de início do ensaio e mergulhou-se cuidadosamente o densímetro na dispersão (4). Feitas as leituras correspondentes ao tempo de 30 segundos, 1 e 2 minutos, retirou-se o densímetro e mediu-se a temperatura da dispersão. Subsequentemente foram feitas leitura e medição de temperatura a 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas a contar do início do ensaio, como determinado pela NBR 7181/84.

4.2.3. Peneiramento Fino

Após a leitura de 24hrs após o início do ensaio o material foi despejado na peneira 0,075mm, lavado e levado para secagem na estufa. A amostra foi submetida ao peneiramento fino, passando pelas peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15; 0,075mm, utilizando o agitador mecânico (Figura 11) e foi anatado a massa do material retido em cada uma delas para fins de cálculo.

Figura 11 - Peneiras Posicionadas no Agitador Mecânico



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

Figura 12 - Amostra Retida Pós Peneiramento Fino



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

4.3. Limites de Atterberg

4.3.1. Limite de Liquidez

Inicialmente foi tomado 300g da amostra preparada de acordo com a NBR 64579/84 da qual 150g usada para determinação do limite de liquidez e 150g para o

limite de plasticidade. Em seguida procede-se a homogeneização da amostra adicionando água destilada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo continuamente com auxílio da espátula até se obter uma massa homogênea, com tal consistência que sejam necessários cerca de 35 golpes para fechar a ranhura.

Após homogeneizada, como prescreve a NBR 6459/84 – Determinação do Limite de Liquidez, a massa de solo é moldada na concha do aparelho Casagrande, de forma que não fiquem espaços vazios no interior da mistura. Em seguida, com ajuda de um cinzel foi aberta uma ranhura na parte central da concha, de modo que as duas partes da amostra possuíssem massas praticamente idênticas, como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Aspecto da Ranhura Antes do Ensaio



(Fonte: Elaborada Pela Autora)

Em seguida o aparelho Casagrande foi ligado e efetuou golpes regulares contra a base até que a base inferior da ranhura se unissem. Anotou-se o número de golpes aplicados e retirou-se uma pequena porção do solo contido na concha para determinação do teor de umidade. Antes de repetir o processo de homogeneização limpou-se a concha e o cinzel, e repetiu-se a operação descrita acima, acrescentando mais água destilada, a fim de obter pelo menos três pontos no intervalo de 35 a 15 golpes, como descrito na NBR 6459/84.

4.3.2. Limite de Plasticidade

Para determinação do limite de plasticidade a amostra de 150g foi homogeneizada da mesma forma descrita no tópico anterior e como prescreve a NBR 7280/84 – Determinação do Limite de Plasticidade. Tomou-se cerca de 10g da amostra preparada e formou-se uma pequena bola e foi rolada sobre a placa de vidro até chegar a forma de cilindro, se fragmentar e atingir aproximadamente ao diâmetro de 3mm.

Logo após o molde é colocado em capsulas para determinação do teor de umidade. O ensaio foi repetido cinco vezes de forma a obter o índice de plasticidade pela média aritmética do teor de umidade de cada ensaio.

4.4. Massa Específica dos Grãos

Para determinar a massa específica dos grãos foram tomadas três amostras de 50g, de cada um dos 10 pontos estudados, passados na peneira de 2mm como orienta a NBR 6508/84 – Determinação da massa específica. As amostras foram colocadas em capsulas e deixadas submersas em água destilada por 12 horas. Após passado o tempo de repouso a amostra foi transferida para o copo de dispersão, lavando-se a capsula com água destilada até a completa remoção do material, tomando-se o devido cuidado para evitar perda do mesmo. Colocou-se água destilada até a metade do volume do copo e colocou-se o mesmo no aparelho dispersor por 15min.

Figura 14 - Dispersão das Amostras de Solo



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

Com auxílio do funil, transferiu-se as amostras para o picnômetro lavando-se o copo dispersor com água destilada para completa remoção do material. Foi adicionado água destilada até cerca de metade do volume do picnômetro e em seguida foram colocados na bomba de vácuo durante 15 minutos, para extrair o ar contido na amostra.

Após serem retirados da bomba de vácuo, acrescentou-se água destilada até 1cm acima da marca de calibração e os colocou em banho-maria durante 30 min. Em seguida, deixou-se o picnômetro em repouso até a temperatura do mesmo se equilibrasse com a temperatura ambiente. Com a temperatura estabilizada, adicionou-se água destilada no picnômetro até que a base de menisco coincidisse com a marca de referência.

Para finalizar o ensaio, foi pesado o conjunto (picnômetro + solo + água) e mediu-se a temperatura de cada um deles. Com o auxílio da tabela de calibração dos picnômetros e com o valor da temperatura aferida pôde-se calcular a massa do conjunto (picnômetro + água).

Figura 15 - Amostras na Bomba de Vácuo



(Fonte: Elaborada Pela Autora)

Figura 16 - Amostras em Banho Maria



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

4.5. Ensaio de Compactação

4.5.1. Determinação da Massa de Água a Ser Adicionada em Cada Ponto

Devido à pouca quantidade de material disponível para a realização do ensaio de compactação, foi necessário realiza-lo com reuso de material seguindo as orientações da NBR 7182/86 – Solo – Ensaio de Compactação, que tem como objetivo determinar a relação entre a umidade ($w\%$) e o peso específico seco do solo (γ_d) quando compactado. Foram separados aproximadamente 11kg de material de cada ponto estudado, 5kg para determinação do ponto de umidade ótima da curva de compactação, sendo que neste ponto não foi feito reuso de material. Os 6kg restantes foram usados para determinação dos outros quatro pontos necessários para obter a curva de compactação completa.

Primeiramente foram retiradas três amostras de solo e em seguida levado a estufa para determinação de sua umidade natural. Feita a média das umidades e considerando 5kg de massa de solo é possível presumir a umidade do ponto de umidade ótima.

Determinou-se a massa de solo seco (m_s) a partir da equação (1), onde w é a média das umidades.

$$ms = \frac{ma}{(1 + w)}$$

A massa de água na amostra (ma), foi calculada pela equação (2), onde mA é a massa da amostra.

$$ma = mA - ms$$

A massa de água a ser adicionada na amostra para que esta seja o ponto ótimo é determinada pelas equações (3) e (4).

$$ma' = ms \times w$$

$$ma'' = ma - (mA - ms)$$

Finalmente, é possível calcular a umidade ótima presumível (W) pela equação (5).

$$W = \left(\frac{mA - ma}{ms} \right) \times 100$$

Para os demais pontos, a quantidade de água a ser adicionada em cada um deles, considerando que a massa de solo (mA) usada é de 6kg, pode ser calculada da seguinte forma.

$$ms = \frac{mA}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)}$$

$$ma = mA - ms$$

Levando em consideração que dois pontos devem estar no ramo seco e os dois pontos restantes no ramo úmido da curva, podemos presumir a umidade destes pela sua distância do ponto de ótima, ou seja, a diferença de porcentagem entre cada ponto e o ponto de ótima. Considerou-se que a distância entre cada ponto é de aproximadamente 2%, então, como os pontos do ramo seco tem umidade menor que a do ponto de ótima subtraiu-se 4% de umidade do ponto 1 e 2% do ponto do ponto 2. No caso do ramo úmido, os pontos têm umidade maior que a do ponto de ótima, logo, acrescenta-se 2% de umidade no ponto 4 e 4% no ponto 5.

$$ma' = ms \times W$$

A amostra já possui certa quantidade de água (ma), assim, para obter-se a massa de água a ser adicionada usou-se a equação (9).

$$ma'' = ma' - ma$$

Para encontrar a quantidade de água a ser adicionada em cada ponto, repetiu-se o procedimento de cálculo de (6) a (9).

4.5.2. Execução do Ensaio

Antes do início do ensaio foi necessário tirar as medidas do molde cilíndrico que será utilizado; diâmetro, altura do cilindro, altura do disco espaçador e o peso do cilindro metálico.

Depois, a amostra é colocada em uma bandeja metálica, homogeneizada, acrescenta-se a quantidade de água necessária para obter a umidade desejada do ponto, a amostra é homogeneizada novamente e inicia-se a compactação. Usou-se o cilindro grande e energia de compactação normal, 12 golpes por camada.

Figura 17 - Compactador Mecânico



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

Com o auxílio de um compactador automático proctor, aplicou-se 12 golpes por camada de solo, sendo que entre as camadas é feita uma escarificação da camada subjacente de forma a obter-se uma aderência entre elas.

Após a compactação da última camada é removido o colarinho posto para garantir a quantidade de camadas exigida pela NBR 7182/86 e faz-se uma regulação do molde com o auxílio de uma régua biselada. Do excesso de solo retiraram-se três amostras para encontrar o teor de umidade e pesou-se o conjunto cilindro + solo.

Figura 18 - Cilindro com Solo Compactado



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

Com auxílio do extrator, retirou-se o corpo-de-prova do molde e o destorroou com auxílio de desempenadeira e espátula. Após o material ser devidamente homogeneizado acrescentou-se uma nova quantidade de água e repetiu-se o procedimento descrito acima.

4.6. Expansão

Posteriormente a execução do ponto de umidade ótima de cada amostra efetuou-se o ensaio de expansão dos solos conforme a norma brasileira NBR 9895/87 - Solo - Índice de Suporte Califórnia.

Inicialmente tomou-se o cilindro com solo compactado, retirou-se o disco espaçador, inverteu-se o molde e este foi acoplado à seu prato-base. No espaço deixado pelo disco espaçador foi colocado um filtro de papel, a haste de expansão e sobre ele dois discos anelares.

Apoiou-se na haste de expansão o extensômetro, acoplado ao porta extensômetro para poder medir a expansão do solo. Feita a leitura inicial, o corpo-de-prova, foi imerso em água por um período de quatro dias e foram feitas leituras do extensômetro a cada período de 24 horas, como determina a NBR 9895/87.

Figura 19 - Corpos de Prova Submersos



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

4.7. Penetração

Feita a leitura 96 horas após o corpo-de-prova ser imerso em água, este foi retirado da imersão e colocado na prensa para proceder o ensaio de penetração como descrito na NBR 9895/87.

Manteve-se a sobrecarga dos discos anelares, colocou-se o corpo-de-prova com o molde na prensa e assentou-se o pistão de penetração no solo. A manivela da prensa foi ajustada para velocidade de 1,27 mm/min e para cada profundidade de

penetração definida pela norma foi realizada uma leitura de deformação do extensômetro do anel.

Figura 20 – Prensa



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

Figura 21 - Execução do Ensaio



(Fonte: Elaborado Pela Autora)

5. Apresentação e Análises dos Resultados

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios expostos na metodologia assim como a classificação dos solos pelas metodologias SUCS e HBR. Esta análise pretende observar os parâmetros do solo, verificar se este possui os requisitos técnicos exigidos para utilização do material no subleito de um pavimento flexível e dimensionar suas camadas de acordo com o método estabelecido pelo DNIT.

5.1. Resumo dos Resultados

Foram realizados ensaios geotécnicos de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação, índice de suporte Califórnia – I.S.C. e expansão para as 10 amostras estudadas. Os resultados desses ensaios constam no Apêndice deste trabalho. A seguir, na Tabela 9, é apresentado o resumo dos resultados dos ensaios para a área em estudo.

Tabela 9 - Resumo dos Ensaios

	NORMA / EQUAÇÃO	UNIDADE	AMOSTRA DE SOLO											
			ST 18	ST 19	ST 20	ST 23	ST 28	ST 29	ST 30	ST 32	ST 33	ST 34		
Profundidade	-	m	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50	0,50 a 1,50
Data	-	-	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017	24/03/2017
Massa esp. dos sólidos (γ_s)	NBR 6508/ 1984	g/cm ³	2,53	2,66	2,68	2,68	2,65	2,68	2,65	2,68	2,65	2,64	2,64	2,39
Limite de liquidez (w_l)	NBR 6459/ 1984	%	46,97	43,60	44,79	41,37	42,94	45,53	45,07	45,36	46,42	46,42	41,37	
Limite de plasticidade (w_p)	NBR 7180/ 1984	%	35,20	36,58	35,06	31,34	35,52	40,97	37,91	37,09	37,47	37,47	31,34	
Índice de plasticidade (I_p)	$I_p = w_l - w_p$	%	11,77	7,02	9,72	10,04	7,42	4,56	7,16	8,27	8,95	10,04		
Fração pedregulho que passa na peneira #4,8mm e #2,0mm		%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fração areia com defloculante que passa na peneira #0,42mm		%	17,50	9,90	20,20	15,30	14,40	13,90	14,40	27,50	14,80	14,80	8,90	
Fração silte com defloculante que passa na peneira #0,075mm		%	15,00	28,00	24,70	21,80	17,70	22,70	19,90	16,50	23,40	23,40	18,80	
Fração argila com defloculante que passa na peneira #0,075mm	NBR 7181/ 1984	%	67,40	62,10	55,10	62,90	67,90	63,50	65,70	56,00	61,80	61,80	72,30	
Fração areia sem defloculante que passa na peneira #0,42mm		%	77,80	86,50	76,60	70,10	73,60	81,20	80,80	76,00	83,80	83,80	75,70	
Fração silte sem defloculante que passa na peneira #0,075mm		%	21,07	11,70	10,80	28,70	13,30	15,40	18,20	26,50	15,80	15,80	23,90	
Fração argila sem defloculante que passa na peneira #0,075mm		%	0,60	1,80	12,60	1,10	13,10	3,50	1,10	0,50	0,40	0,40	0,40	
Peso Específico Seco Compactado (Energia Normal) - 12 Golpes por camada	NBR 9895/1987	kN/m ³	13,20	14,05	13,80	13,26	13,50	13,60	14,16	12,97	14,00	14,00	13,25	
Umidade Ótima de Compactação (Energia Normal) - 12 Golpes por camada	NBR 9895/1987	%	31,50	30,80	30,40	32,60	31,20	31,20	30,60	33,20	26,20	26,20	30,80	
Classificação do Solo (HRB) Gran. Com Defloculante		-	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	
Classificação do Solo (SUCS) Gran. Com Defloculante		-	A-7-5	A-5	A-5	A-7-5	A-5	A-5	A-5	A-5	A-5	A-5	A-7-5	
Classificação do Solo (SUCS) Gran. Sem Defloculante		-	ML	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	
Classificação do Solo (HRB) Gran. Sem Defloculante		-	A-7-5	A-2-5	A-2-5	A-2-7	A-2-5	A-1b	A-2-5	A-5	A-2-5	A-2-5	A-2-7	
Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) - 12 Golpes	NBR 9895/1987	-	6,33	1,57	3,09	6,77	3,38	7,43	6,62	8,02	1,18	1,18	2,45	
Expansão Medida no Molde para o ISC	NBR 9895/1987	-	0,00	0,44	0,21	0,09	0,22	0,17	0,11	0,18	0,33	0,33	0,41	

5.1.1. Comentários / Análises dos Resultados Obtidos

Dentre os dez ensaios executados, nove apresentaram certa uniformidade nos valores de massa específica dos sólidos com variação de 2,53 g/cm³ a 2,68 g/cm³. Uma amostra (Amostra 10) apresentou o valor de 2,39 g/cm³. Valor este bem abaixo dos demais. Esse fato pode indicar a presença de algum argilomineral com baixa massa específica que para comprovação há necessidade de ensaios próprios ou mesmo ensaios adicionais. As nove amostras que apresentaram certa uniformidade estão condizentes com valores apresentados para solos da região.

Para os ensaios de limites de liquidez foram encontrados valores de 41,37% a 46,97%, e para as plasticidades foram obtidos valores de 31,34% a 40,97%, mostrando valores de índice de plasticidade de 4,56% a 11,77%, indicando que se tratam de solos pouco plástico a solos com plasticidade média.

Em termos granulométricos observa-se que os solos não apresentaram a fração pedregulho. Ao se observar os ensaios sem a adição de defloculante, verifica-se que os solos têm comportamento de predominância arenosa, com variação de 70,10% a 86,50%. Já ao se observar os ensaios com adição de defloculante, tem-se solos com predominância argilosa com valores de 55,10% a 72,30%. Esse fato é de esperar porque o defloculante age diretamente na quebra da cimentação entre as partículas. Ressalte-se a coerência dos ensaios de granulometria sem defloculante com os ensaios de plasticidade, visto que a predominância da fração areia diminui a plasticidade dos solos.

Ao se classificar os solos verifica-se que pela classificação SUCS, os solos com defloculante, há predominância de solos “ML” que indicam solos siltosos com baixa compressibilidade. Em análises aos solos sem defloculante há predominância de solos “SM” que indicam areias siltosas.

Quando da classificação pela HRB os solos com defloculante há solos “A-7-5” e “A-5”, indicando se tratar de solos siltosos a solos argilosos com mau comportamento para utilização em subleito. Ao se analisar os ensaios sem defloculante, verifica-se solos “A-7-5”, “A-5”, “A-2-5”, “A-2-7” e “A-1-B”. Neste caso percebe-se solos com comportamento variado que vai desde solos com comportamento excelente a bom a solos sofrível a mau para emprego em subleito.

Nas análises aos ensaios de compactação, verifica-se que os valores de peso específico seco se comportaram de 12,97 kN/m³ e 14,16 kN/m³ e as umidades ótimas correspondentes com valores 26,20% a 33,20%, valores estes bastantes comuns para solos

argilosos, entretanto é possível que algum argilomineral tenha influenciado na elevação das umidades ótimas encontradas.

Os ensaios de CBR mostraram valores de 1,18% a 8,02% indicando que análises bem mais detalhadas devem ser realizadas ao se considerar que quando o material do subleito estiver com CBR < 2%, ele deve ser substituído por outro de melhor resistência (CBR > 2%) até pelo menos 1,00 metro, ou mesmo ser melhorado com a incorporação de outro material para a devida melhoria.

Em termos de expansibilidade dos solos foram encontrados valores de 0% a 0,44% indicando que não maiores preocupações na utilização de subleito quanto a expansibilidade, visto que nos normativos pode-se utilizar materiais com valores menos que 1%.

5.2. Dimensionamento

5.2.1. Classificação das Vias

Quanto ao estudo de tráfego, as vias foram classificadas de acordo com o tráfego previsto para os locais e em função do aumento da demanda. A classificação das vias foi definida em estudo contratado pela TERRACAP, o Plano de Uso e Ocupação do Solo, bem como por meio de visitas a área de projeto, levando em consideração o desenvolvimento da área de projeto e regiões do entorno.

Determinada as condições de tráfego, para efeito de dimensionamento de novos pavimentos, as vias foram classificadas em: principais, secundárias e locais, com base nos critérios do modelo PAVIURB utilizado na Prefeitura do Município de São Paulo CT/9-PMSP, conforme Tabela 10.

5.2.1.1 Vias Principais

Tráfego médio, ruas de características residenciais, com função predominante de via coletora secundária, para as quais é prevista a passagem de caminhões ou ônibus em um número entre 21 (vinte e um) e 100 (cem) por dia, na faixa de tráfego mais solicitada, caracterizadas por um número “N” típico de 5×10^5 solicitações do eixo simples padrão de 8,2t para o período de projeto de 10 anos, observando-se um provável aumento de demanda em função do desenvolvimento da região.

5.2.1.1. Vias Secundárias

Tráfego leve, ruas de características essencialmente residenciais, para as quais não é previsto o tráfego de ônibus, podendo existir, ocasionalmente, passagens de caminhões ou ônibus – em número entre 4 e 20 por dia, por faixa de tráfego, caracterizado por um número “N” típico de 10^5 solicitações do eixo simples padrão (8,2 t) para o período de 10 anos.

5.2.1.2. Vias Locais

Tráfego muito leve, ruas de características essencialmente residenciais, para as quais não é absolutamente previsto o tráfego de ônibus, podendo existir, ocasionalmente, passagens de caminhões em número não superior a 3 (três) por dia, por faixa de tráfego, caracterizado por um número “N” típico de 10^4 solicitações do eixo simples padrão (8,2 t) para o período de 10 anos. A Tabela 10 apresenta a classificação das vias e parâmetros de tráfego.

Tabela 10 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego

Tipo de Via	Função Predominante	Tráfego Previsto	Vida de Projeto (Anos)	Vida Inicial na faixa mais carregada		N	N Característico
				Veículo Leve	Caminhão e Ônibus		
I	Via local residencial sem passagem	Muito Leve	10	< 100	< 3	10^4	10^4
II	Via local residencial com passagem	Leve	10	100 a 400	4 a 20	$2,8 \times 10^4$ a $1,4 \times 10^5$	10^5
III	Via coletora secundária	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	$1,4 \times 10^5$ a $7,0 \times 10^5$	5×10^5
Vias urbanas típicas (I, II, III)						Fator Veículo = 1,55	

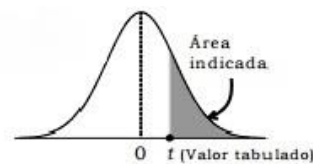
5.2.2. Cálculo do CBR de Projeto

De posse dos dados geotécnicos, os resultados dos ensaios, para fins de dimensionamento do pavimento, foram tratados estatisticamente. Assim, considerando-se que os dados seguem uma distribuição normal, para os casos em que a quantidade de observações não é suficientemente grande, ou seja, quando se

tem um volume de graus de liberdade inferior a 30 unidades é indicada à utilização da Distribuição de Student.

O tratamento estatístico foi feito através da distribuição “t” de Student, conforme Tabela 11, adequada ao controle pela média de amostragens pequenas e com nível de confiança de 95 % para o suporte de projeto. Assim, utilizando-se as Tabelas 9 e 10, e a equação abaixo, chega-se a um intervalo de valores para os quais o CBR de projeto pode ser enquadrado.

Tabela 11 - Distribuição de Student



gl	Área na cauda superior									
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005	
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6	
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60	
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92	
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610	
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869	
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959	
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408	
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041	
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781	
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587	
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437	
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318	
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221	
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140	
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073	
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015	
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965	
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922	
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883	
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850	
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819	
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792	
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768	
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745	
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725	
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707	
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689	
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674	
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660	
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646	
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591	
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551	
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520	
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496	
z	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291	

Fonte: (BABETTA,2010)

$$\mu = x \pm t (\sigma \div \sqrt{n})$$

Em que:

μ = média populacional;

x = média da amostra;

t = “t de student”;

σ = desvio padrão;

n = número de elementos

Aplicando os devidos valores na fórmula acima obtemos o seguinte resultado:

$$\mu = 4,684 \pm 1,812 (2,596 \div \sqrt{10})$$

$$\mu = 6,17$$

Portanto, para a área estuda usa-se o valor de 6% para o CBR de projeto.

5.2.3. Tráfego Estimado

Em função do número de repetições de eixo padrão adotado anteriormente ($N = 10^5$), foi possível determinar a espessura e o tipo de revestimento a ser adotado. Conforme a Tabela 12 deve-se executar tratamentos superficiais betuminosos.

Tabela 12 - Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

5.2.4. Fator Climático Regional

Para considerar as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano, o que se traduz em variações de capacidade de suporte dos materiais, adotou-se um Fator Climático Regional (FR) igual a 1,0, visto que o adotado pela AASHTO varia de 0,2 a 5,0 onde adota-se 5 na ocasião de extrema saturação dos materiais.

5.2.5. Coeficiente de Equivalência Estrutural

O coeficiente de equivalência estrutural de um material, que é definido como a relação entre as espessuras de uma base granular e de uma camada com material

que apresenta o mesmo comportamento foi definido conforme os materiais previamente selecionados, mostrados na Tabela 13. Quanto ao material de revestimento, e com base na classificação de tráfego adotada, será utilizado concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ, com espessura de 3,0 cm e com coeficiente estrutural $K_R = 2,0$.

Tabela 13 - Coeficiente de Equivalência Estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Os coeficientes de equivalência estrutural das principais camadas dos pavimentos foram designados genericamente por:

K_R = coeficiente estrutural da camada de revestimento;

K_B = coeficiente estrutural da camada de base;

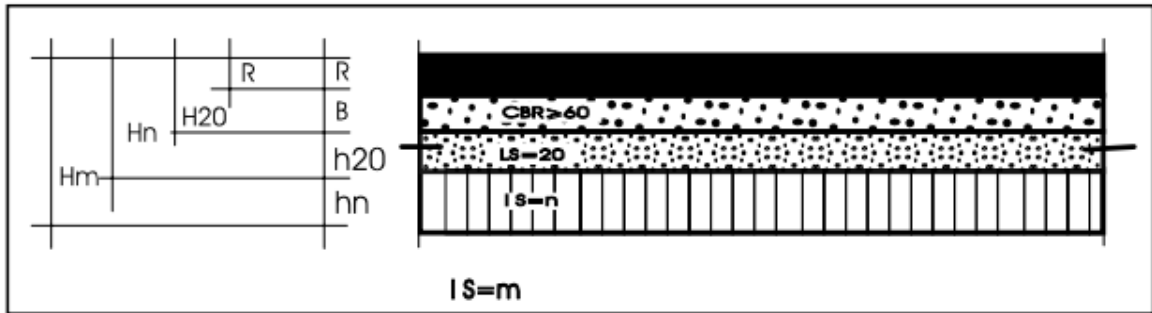
K_S = coeficiente estrutural da camada de sub-base;

K_{ref} = coeficiente estrutural da camada de reforço.

5.2.6. Determinação das Espessuras das Camadas do Pavimento

De posse dos parâmetros descritos acima, no Item 5.2.4, e com os materiais a serem utilizados na estrutura do pavimento, determinaram-se as espessuras das camadas do pavimento, conforme esquema abaixo:

Figura 22 - Esquema de Dimensionamento

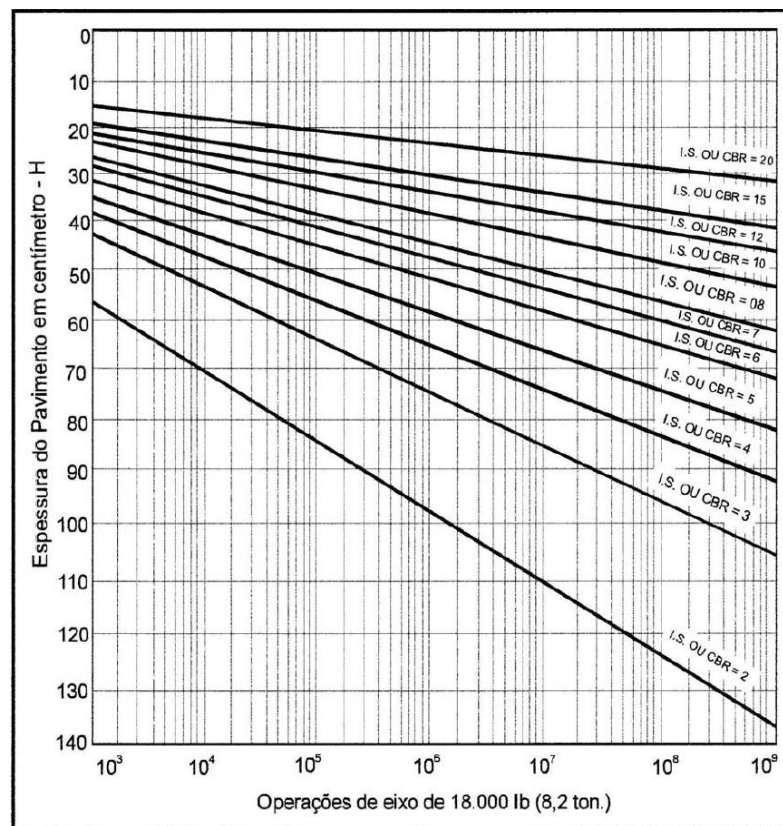


Fonte: (DNER,1996).

5.2.6.1. Espessura Total do Pavimento

Em função do tipo de tráfego previsto e de posse do suporte representativo do subleito (CBR_P) adotado, conforme cálculo do Item 5.2.2 acima, a espessura total básica (H_m) das camadas do pavimento, em termos granulares, foi fixada de acordo com o ábaco de dimensionamento da Figura 23 tráfegos médio.

Figura 23 - Determinação da Espessura das Camadas do Pavimento.



Fonte: (DNIT, 2006)

$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598}$$

5.2.6.2. Espessura das Camadas

Uma vez determinada a espessura total do pavimento (H_m), em termos de material granular com auxílio do ábaco da Figura 23 e fixada a espessura do revestimento (R), procedeu-se ao dimensionamento das espessuras das demais camadas, ou seja, da base, sub-base e do reforço de subleito, levando-se em conta os materiais selecionados para cada uma delas, seus coeficientes de equivalência estrutural e suas capacidades de suporte, traduzidas pelos seus respectivos CBR, como observa-se a seguir:

As espessuras de base (B), sub-base (h_{20}) e de reforço do subleito (h_m), se necessário, foram obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20}$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_m \times K_{ref} \geq H_m$$

Para a área em estudo, verifica-se que o tráfego de veículo a circular em na via tem características de via secundária. Diante disso, classificam-se as vias como de tráfego leve.

Quanto ao material de revestimento, e com base na classificação de tráfego adotada, será utilizado concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ, com espessura de 3 cm e com coeficiente estrutural $K_R = 2,0$.

De um modo geral, adota-se a espessura mínima para uma camada de base granular 10 cm e para garantir as condições ideais, considera-se também quando da necessidade de sub-base e/ou reforço ou quando da existência de uma única camada além da betuminosa, uma espessura mínima de 15 cm a fim de homogeneizar os pavimentos. Deverá ser efetuada a camada final de terraplenagem, regularização do subleito numa espessura de 60 cm, compactada a 100 % de energia do proctor intermediário.

5.2.6.3. Materiais Adotados

a. Revestimento

Concreto Betuminoso Usinado a Quente - CBUQ, na espessura 3,0 cm e coeficiente estrutural $K_R = 2,0$.

b. Base

Em Brita Graduada, com CBR $\geq 60\%$, na espessura B e coeficiente estrutural $K_B = 1,0$.

c. Sub-base

Em cascalho laterítico, com CBR $\geq 20\%$ e expansão $\leq 1,0\%$, na espessura h_{20} (sub-base) e coeficiente estrutural $K_S = 1,0$.

5.2.6.4. Cálculo da Espessuras das Camadas do Pavimentos

$$H_n = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598}$$

$$H_n = 77,67 \cdot (10^4)^{0,0482} \cdot (6)^{-0,598}$$

$$\mathbf{H_n = 41,5 \text{ cm}}$$

Assim, com o valor suporte CBR = 6,0% para a camada de subleito, obtém-se o valor $H_n = 41,5 \text{ cm}$ e com a utilização da inequação abaixo obtém-se a espessura mínima para a camada de base:

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_n$$

$$3 \times 2 + B \times 1 \geq 41,5 \text{ cm}$$

$$B \geq 35,5 \text{ cm}$$

6. Conclusões

Esta monografia procurou apresentar considerações sobre estudos geotécnicos necessários para a elaboração de um Projeto de Pavimentação além de dimensionar um pavimento flexível de acordo com o método estabelecido pelo DNIT. Os estudos e análises realizados permitiram concluir que:

01) Dentre os dez ensaios executados, nove apresentaram certa uniformidade nos valores de massa específica dos sólidos com variação de $2,53 \text{ g/cm}^3$ a $2,68 \text{ g/cm}^3$. Uma amostra (Amostra 10) apresentou o valor de $2,39 \text{ g/cm}^3$. Valor este bem abaixo dos demais. Esse fato pode indicar a presença de algum argilomineral com baixa massa específica que para comprovação há necessidade de ensaios próprios ou mesmo ensaios adicionais. As nove amostras que apresentaram certa uniformidade estão condizentes com valores apresentados para solos da região;

02) Para os ensaios de limites de liquidez foram encontrados valores de 41,37% a 46,97%, e para as plasticidades foram obtidos valores de 31,34% a 40,97%, mostrando valores de índice de plasticidade de 4,56% a 11,77%, indicando que se tratam de solos pouco plástico a solos com plasticidade média;

03) Em termos granulométricos observa-se que os solos não apresentaram a fração pedregulho. Ao se observar os ensaios sem a adição de defloculante, verifica-se que os solos têm comportamento de predominância arenosa, com variação de 70,10% a 86,50%. Já ao se observar os ensaios com adição de defloculante, tem-se solos com predominância argilosa com valores de 55,10% a 72,30%. Esse fato é de esperar porque o defloculante age diretamente na quebra da cimentação entre as partículas. Ressalte-se a coerência dos ensaios de granulometria sem defloculante com os ensaios de plasticidade, visto que a predominância da fração areia diminui a plasticidade dos solos;

04) Ao se classificar os solos verifica-se que pela classificação SUCS, os solos com defloculante, há predominância de solos “ML” que indicam solos siltosos com baixa compressibilidade. Em análises aos solos sem defloculante há predominância de solos “SM” que indicam areias siltosas;

05) Quando da classificação pela HRB os solos com defloculante há solos “A-7-5” e “A-5”, indicando se tratar de solos siltosos a solos argilosos com mau comportamento para utilização em subleito. Ao se analisar os ensaios sem

defloculante, verifica-se solos “A-7-5”, “A-5”, “A-2-5”, “A-2-7” e “A-1-B”. Neste caso percebe-se solos com comportamento variado que vai desde solos com comportamento excelente a bom a solos sofrível a mau para emprego em subleito;

06) Nas análises aos ensaios de compactação, verifica-se que os valores de peso específico seco se comportaram de 12,97 kN/m³ e 14,16 kN/m³ e as umidades ótimas correspondentes com valores 26,20% a 33,20%, valores estes bastantes comuns para solos argilosos, entretanto é possível que algum argilomineral tenha influenciado na elevação das umidades ótimas encontradas;

07) Os ensaios de CBR mostraram valores de 1,18% a 8,02% indicando que análises bem mais detalhadas devem ser realizadas ao se considerar que quando o material do subleito estiver com CBR < 2%, ele deve ser substituído por outro de melhor resistência (CBR > 2%) até pelo menos 1,00 metro, ou mesmo ser melhorado com a incorporação de outro material para a devida melhoria;

08) Em termos de expansibilidade dos solos foram encontrados valores de 0% a 0,44% indicando que não maiores preocupações na utilização de subleito quanto a expansibilidade, visto que nos normativos pode-se utilizar materiais com valores menos que 1%;

09) As vias a serem dimensionadas foram classificadas como de tráfego leve e o índice de suporte de projeto adotado foi de 6%. Pelas características consideradas a camada de revestimento do pavimento será 3 cm de concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ; 20 cm de base de brita graduada com CBR mínimo de 60% e a camada deve obter 100% de compactação na energia modificada; sub-base com espessura de 20 cm de material granular com CBR mínimo de 20%, deve-se obter 100% de compactação na energia intermediária; 16 cm na camada de regularização do subleito e 100% compactação na energia intermediária.

6.1. Sugestões Para Pesquisas Futuras

Como sugestões para futuras pesquisas apresenta-se os seguintes temas:

- ✓ Estudar as diferenças entre as curvas de compactação obtidas através do ensaio com e sem reuso.
- ✓ Calcular e comparar os custos para os dimensionamentos pelos Métodos do DNIT e da Resiliência.

- ✓ Definir o dimensionamento mais vantajoso em questões técnicas, executivas e econômicas.

7. Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**. Rochas de Solos. Rio de Janeiro. 1995.

_____. **NBR 6459**. Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 6502**. Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro. 1995.

_____. **NBR 6508**. Grãos de Solos que Passaram na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 7180**. Solo - Determinação do limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 7181**. Solos - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 6457**. Amostra de solos - Preparação para ensaio de caracterização e compactação. Rio de Janeiro. 1986.

_____. **NBR 7182**. Solos - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro. 1986.

_____. **NBR 9604**. Abertura em poços e trincheiras de inspeção em solo para retirar amostra deformada e indeformada. Rio de Janeiro. 1986.

_____. **NBR 9895**. Índice Suporte Califórnia - CBR. Rio de Janeiro. 1987.

AZEVÊDO, André Luis Cairo. **Estabilização de solos com adição de cal – um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2010.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.

BAPTISTA, Cyro de Freitas Nogueira. **Pavimentação**, 3a ed., Porto Alegre: Ed. Globo, vol. 1, 1978.

BARBETTA, P. A. - **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 7ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2010

BERNUCCI et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações.** 3ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Volume 1, 1976.

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

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**, 3. ed. – Rio de Janeiro, 2005.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**, 3. ed. – Rio de Janeiro, 2006a.

EMMERT, FABIANO. **Avaliação do Emprego da Técnica de Estabilização do Solo na Melhoria de Estradas Florestais da Região de Niquelândia – GO.** Brasília, 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, UNB.

FERREIRA, AURÉLIO. **Minidicionário da Língua Portuguesa.** Rio de Janeiro. 2001. 4ª ed.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2006.

SOUZA, Alan Nunes. **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário.** Brasília, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário de Brasília, UniCeub.

OLIVEIRA, Milena Damilde. **Utilização de Resíduos em Pavimentação Rodoviária.** Florianópolis, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina.

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

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **A consideração da Resiliência no Projeto de Pavimentos**, Rio de Janeiro, 1994.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**, 2a ed., Rio de Janeiro, Copiarte Copiadora e Artes Gráficas Ltda., 2002.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**, volume I - 1 a. ed.- São Paulo: Pini, 1997.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Pavimentação Rodoviária**, volume 1, Rio de Janeiro, Artes Gráficas Schulze, 1976.

SOUSA, Alex Torres de. **Estudo de parâmetros de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal**. 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília - UniCEUB, Brasília, 2013.

QUIRINO, Maria Eliza Pacífico. **Recuperação de Pavimentos Flexíveis em Áreas de Taxiamento de Aeronaves**. Belo Horizonte, 2013. Curso de Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da UFMG.

TERZAGHI, K; PECK, R.B. **Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia**. Traduzido por Antônio José da Costa Nunes e Maria de Lourdes Campo Campelo. Rio de Janeiro: SEDEGRA, 1962. 659p.

