

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EDGAR DE CASTRO TORRES NETO

**EXECUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE
CALIFÓRNIA (ISC) DO SUBLEITO E DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO
UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO DA PISTA DE ROLAMENTO DO BRT NORTE-
SUL DE GOIÂNIA – TRECHO AVENIDA GOIÁS NORTE**

Goiânia, GO
2019



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: EDGAR DE CASTRO TORRES NETO

Matrícula: 20141011050198

Título do Trabalho: EXECUÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFORNIA (IRC) DO SUPLENTO E DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO DA PISTA DE ROLAMENTO DO BRT NORTE-SUL DE GOIÂNIA - TRECHO AVENIDA GOIÁS NORTE

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG;
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____;
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG.

Ao indicar a opção 2 ou 3, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

GOIÂNIA, 18/12/19.
Local Data

EDGAR DE CASTRO

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Edgar de Castro Torres Neto

**EXECUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE
CALIFÓRNIA (ISC) DO SUBLEITO E DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO
UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO DA PISTA DE ROLAMENTO DO BRT NORTE-
SUL DE GOIÂNIA – TRECHO AVENIDA GOIÁS NORTE**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Civil, do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Campus Goiânia, como parte
dos requisitos necessários para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil**

**Orientador: Prof. Esp. Wesley Pimenta
de Menezes**

**Goiânia, GO
2019**

T6365e Torres Neto, Edgar de Castro.
Execução e avaliação dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) do subleito e dimensionamento do pavimento utilizados na pavimentação da pista de rolamento do BRT Norte-Sul de Goiânia – Trecho Avenida Goiás Norte / Edgar de Castro Torres Neto. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2019.
104 f.: il.

Orientador: Prof. Esp. Wesley Pimenta de Menezes.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.
Inclui apêndice.

1. Pavimentação. 2. Mecânica dos solos. 3. BRT - Goiânia. I. Menezes, Wesley Pimenta de (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 625.85

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

Edgar de Castro Torres Neto

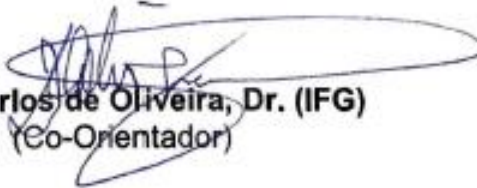
**EXECUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE
CALIFÓRNIA (ISC) DO SUBLEITO E DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO
UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO DA PISTA DE ROLAMENTO DO BRT NORTE-
SUL DE GOIÂNIA – TRECHO AVENIDA GOIÁS NORTE**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Civil, do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Campus Goiânia, como parte
dos requisitos necessários para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil**

Aprovado em 27 de JUNHO de 2019:



Wesley Pimenta de Menezes, Esp. (IFG)
(Orientador)



João Carlos de Oliveira, Dr. (IFG)
(Co-Orientador)



Giovane Batalione, Me. (IFG)



Marcus Vinícius de Araújo da Silva Mendes, Dr (IFG)

Goiânia, GO
2019

DEDICATÓRIA

*A Deus pela vida, família e todas as
oportunidades proporcionadas.*

AGRADECIMENTOS

Para a conclusão deste trabalho, várias foram as pessoas que colaboraram direta e indiretamente.

Agradeço minha família, sobretudo meus pais, Eduardo e Iolete, que me proporcionaram sempre o melhor.

Minha namorada, Lígia, que sempre me apoiou e confortou incondicionalmente.

Aos meus orientadores, Wesley Pimenta e João Carlos, pelo suporte em todo o trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Solos, Sandro Vale, e todos os estagiários, pelo suporte na execução dos ensaios.

Aos colegas de curso, que sempre me ajudaram e estiveram juntos.

Ao Instituto Federal de Goiás, na pessoa dos seus servidores e professores, por proporcionar um ensino de excelência e me formar profissional capacitado ao mercado.

EPÍGRAFE

*“Sabe lá
O que é não ter e ter que ter pra dar
Sabe lá”*

(Esquinas - Djavan)

RESUMO

EXECUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) DO SUBLEITO E DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO DA PISTA DE ROLAMENTO DO BRT NORTE-SUL DE GOIÂNIA – TRECHO AVENIDA GOIÁS NORTE

AUTOR: Edgar de Castro Torres Neto
ORIENTADOR: Wesley Pimenta de Menezes

O presente trabalho, estruturado como um estudo de caso, analisou o Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo do subleito da pista de rolamento do BRT (*Bus Rapid Transit*) Norte-Sul, trecho Avenida Goiás Norte, em Goiânia, a fim de avaliar sua importância e influência no dimensionamento do pavimento de concreto de cimento Portland. O método de cálculo foi o mesmo utilizado no projeto em execução, da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), adaptado do método da *Portland Cement Association/84* (PCA/84). Idealizado por G. Pickett, a metodologia é baseada nas teorias de Westergaard para o dimensionamento das placas de concreto utilizadas, no que tange a resistência à tração na flexão, que, por sua vez, é função do coeficiente de recalque do topo da sub-base (região imediatamente abaixo da face inferior da placa de concreto). Esse coeficiente de recalque foi obtido através de tabelas e ábacos que correlacionam CBR e k para determinada espessura e tipologia de sub-base adotada. A partir das amostras coletadas, realizaram-se os ensaios de compactação e CBR, obtendo valores de suporte e expansão bastante satisfatórios e semelhantes aos resultados do consórcio executor para o mesmo trecho de estudo, o que resultou em um dimensionamento de espessuras igual o que está em execução.

Palavras-chave: *Bus Rapid Transit*. Dimensionamento. Pavimento rígido. Westergaard. Coeficiente de recalque. *California Bearing Ratio*.

ABSTRACT

EXECUTION AND EVALUATION OF THE SUBGRADE CALIFORNIA BEARING RATIO TESTS AND THICKNESS DESIGN PROCEDURE OF PAVEMENT USED IN THE NORTH-SOUTH BRT OF GOIÂNIA ROLLING TRACK PAVING – GOIAS NORTE AVENUE SECTION

AUTHOR: Edgar de Castro Torres Neto

ADVISOR: Wesley Pimenta de Menezes

The present work, structured as a case study, analyzed the California Bearing Ratio (CBR) of the subgrade soil of the North-South Bus Rapid Transit (BRT), Avenida Goiás Norte section, in Goiânia, in order to evaluate its importance and influence in the design of Portland cement concrete pavement. The calculation method was the same as that used in the running project of the Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), adapted from the method of the Portland Cement Association / 84 (PCA/84). The methodology is based on Westergaard's theories for the dimensioning of the concrete slabs used, with respect to the tensile strength in the bending, which in turn is a function of the regression coefficient of the top of the sub-base (immediately below the underside of the concrete slab). This regression coefficient was obtained through tables and abacuses that correlate CBR and k for a certain thickness and type of sub-base adopted. From the collected samples, the compaction and CBR tests were carried out, obtaining very satisfactory support and expansion values and similar to the results of the executing consortium for the same study section, which resulted in a thickness sizing equal to what is running.

Keywords: Bus Rapid Transit. Thickness design. Rigid Pavements. Westergaard. Regression coefficient. California Bearing Ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Palácio das Esmeraldas década de 40	21
Figura 1.2 – Eixo Anhanguera.....	21
Figura 2.1 – Linha Ecovia de Quito	26
Figura 2.2 – Extensão do Eixo Norte-Sul	28
Figura 2.3 – Estrutura de pavimento rígido com barras de transferência.....	29
Figura 2.4 – Aparelhagem CBR	32
Figura 2.5 – Principais modelos de resposta do solo	35
Figura 2.6 – Leito de molas de Winkler	36
Figura 2.7 – Gráfico CBR x k.....	37
Figura 2.8 – Coeficientes de recalque para cada camada do pavimento (k_2 , k_1 e k)	38
Figura 2.9 – Posições de configurações de carregamentos na placa de concreto....	41
Figura 2.10 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos de concreto para eixos simples	45
Figura 2.11 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos de concreto para eixos tandem duplos.....	46
Figura 2.12 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos de concreto para eixos tandem triplos.....	47
Figura 2.13 – Consumo de fadiga por dano acumulado.....	50
Figura 2.14 – Deflexão causada pela erosão da região imediatamente inferior à placa.....	51
Figura 2.15 – Posição crítica da carga no critério de ruptura à erosão	53
Figura 2.16 – Camada dos pavimentos de concreto	56
Figura 2.17 – Distribuição de tensões nos dois tipos de pavimento	57
Figura 2.18 – Pavimento de concreto simples sem barra de transferência.....	58
Figura 2.19 – Pavimento de concreto simples com barra de transferência.....	58
Figura 2.20 – Rodovia Imigrantes, São Paulo	59

Figura 3.1 – Fluxograma da sequência metodológica do trabalho	61
Figura 3.2 – Local do primeiro ponto coletado	62
Figura 3.3 – Local do primeiro ponto coletado	63
Figura 3.4 – Coleta do material: (a) local do primeiro ponto de coleta, (b) amostras ensacadas e identificadas	64
Figura 3.5 – Cálculo das amostras retidas (a) e passantes (b) na peneira Nº 4 para amostra total de 7.000 g.....	65
Figura 3.6 – Determinação da umidade higroscópica	66
Figura 3.7 – Materiais utilizados para umidificação das amostras	69
Figura 3.8 – Umidificação da amostra na umidade ótima ($w_{ót}$).....	69
Figura 3.9 – Amostras na umidade ótima ensacadas	69
Figura 3.10 – Molde cilíndrico grande montado, disco espaçador, soquete grande e papel filtro.....	70
Figura 3.11 – Amostras na umidade ótima homogeneizadas.....	71
Figura 3.12 – Pesagem das camadas.....	71
Figura 3.13 – Colocação do solo no cilindro (a), compactação (b) e escarificação (c)	72
Figura 3.14 – Determinação do teor de umidade	72
Figura 3.15 – Escarificação e remoção do colarinho (a) e (b), retirada de material em excesso (c) e limpeza do cilindro (d)	73
Figura 3.16 – Pesagem do conjunto.....	74
Figura 3.17 – Molde invertido para embebição	74
Figura 3.18 – Execução do ensaio de expansão.....	75
Figura 3.19 – Cilindro pronto para submersão (a) e submerso (b).....	75
Figura 3.20 – Quadro 1 da NBR 9895:2016.....	76
Figura 3.21 – Cilindro escoando água.....	76
Figura 3.22 – Montagem do ensaio de penetração	77
Figura 3.23 – Quadro 2 da NBR 9895:2016.....	78
Figura 3.24 – Extração dos corpos-de-prova	78

Figura 4.1 – Ônibus Urbano Articulado 2SB1.....	86
Figura 4.2 – Infraestrutura do pavimento de concreto de cimento Portland	88
Figura 4.3 – Análise de fadiga para eixos simples de roda simples e dupla	91
Figura 4.4 – Análise de erosão para eixos simples de roda simples e dupla	92
Figura 4.5 – Análise de fadiga para eixos simples de roda simples e dupla	94
Figura 4.6 – Análise de erosão para eixos simples de roda simples e dupla	95
Figura 4.7 – Dimensionamento final obtido	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Correlação entre CBR e o k do subleito	37
Tabela 2.2 Aumento de k em função de sub-base granular em diferentes espessuras.....	39
Tabela 2.3 Aumento de k em função de solo-cimento em diferentes espessuras.....	39
Tabela 2.4 Aumento de k em função de sub-base de concreto rolado em diferentes espessuras.	39
Tabela 2.5 Formulário padrão do dimensionamento pelo método da PCA/84.	55
Tabela 3.1 Normas referentes aos ensaios realizados.....	64
Tabela 3.2 Granulometria do furo 01, com a porcentagem de material passante e retido na peneira Nº 4 em destaque.	65
Tabela 3.3 Material passante e retido na peneira Nº 4 de todos os furos.	66
Tabela 4.1 Resultados do ensaio de CBR	79
Tabela 4.2 Resumo dos ensaios.....	84
Tabela 4.3 Comparação dos resultados obtidos com os em execução na obra.	85
Tabela 4.4 Determinação da Distribuição de Eixos.....	87
Tabela 4.5 Faixas granulométricas que o material deve se enquadrar.	89
Tabela 4.6 Fatores de segurança para cargas (FSC).	89
Tabela 4.7 Dimensionamento da placa de concreto para espessura de 27 cm.	93
Tabela 4.8 Dimensionamento da placa de concreto para espessura de 27 cm.	96
Tabela A.1 Tensão equivalente para eixos simples e tandem duplo (MPa) para pavimento sem acostamento de concreto.....	104
Tabela A.2 Fator de Erosão para eixos simples e tandem duplo com juntas sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto	105

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 Curva CBR furo 01.....	80
Gráfico 4.2 Curva CBR furo 02.....	80
Gráfico 4.3 Curva CBR furo 03.....	81
Gráfico 4.4 Curva CBR furo 04.....	81
Gráfico 4.5 Curva CBR furo 05.....	82
Gráfico 4.6 Curva CBR furo 06.....	82
Gráfico 4.7 Curva CBR furo 07.....	83
Gráfico 4.8 Curva CBR furo 08.....	83
Gráfico 4.9 Curva CBR furo 09.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
ANT	Associação Nacional de Empresas de Transportes Urbanos
BGS	Brita Graduada Simples
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
c.p.	Corpo de prova
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CMTC	Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ET	Estudo Técnico
Fig.	Figura
FSC	Fator de Segurança de Carga
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
NBR	Norma Brasileira
nº	Número
NS	Norte-Sul
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
SETRANSP	Sindicato das Empresas de Transporte Coletivo Urbano de Passageiros de Goiânia
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Coeficiente de recalque
C ₁	Constante de ajustamento relacionada ao tipo de sub-base
cm	Centímetro
D _{total}	Danos causados pela erosão, que devem ser menores que 1
f _{ctM,k}	Resistência característica de ruptura à tração na flexão
F _{sc}	Fator de segurança de cargas
g	Gramma
h	Espessura da placa em polegadas
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-Força
k _{granular}	Coeficiente de recalque k no topo da sub-base granular
km	Quilômetro
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	MegaPascal
MPa/m	MegaPascal/metro
ms	Massa de solo seco, em gramas
m _{wót}	Massa de solo na umidade ótima, em gramas
n	Número total de grupos de carga
N	Número admissível de passagens da força
N _{sol,i}	Número previsto de repetições de carga para o i-ésimo grupo de carga
p	Tensão unitária aplicada, em MPa
P	Fator de erosão
psi	<i>pound force per square inch</i>
q(x,y)	Tensão vertical no ponto (x,y)
tf	Tonelada-Força
V	Volume do solo seco no cilindro, em gramas
w	Deflexão ou recalque, em m
W _{hót}	Teor de umidade ótima, em %.
xf	Amostra passante na peneira N°4

x_g	Amostra retida na peneira Nº 4
δ	Desvio padrão
$\rho_{dm\acute{a}x}$	Densidade seca máxima do solo, em g/cm ³
σ	Tensão de tração na flexão na face inferior da placa

Sumário

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. OBJETIVOS.....	22
1.1.1. Objetivo geral	23
1.1.2. Objetivo específico	23
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	25
2.1. BRT – <i>BUS RAPID TRANSIT</i>	25
2.1.2. BRT em Goiânia	27
2.2. MECÂNICA DOS SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	29
2.2.1. CBR – <i>California Bearing Ratio</i>	30
2.2.2. Coeficiente de recalque k do solo	34
2.2.2.1. Modelo de Winkler	35
2.2.2.2. Correlação entre o coeficiente k e o CBR do solo do subleito	36
2.3. FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PCA/84	40
2.3.1. Teoria de Westergaard	40
2.3.2. Cartas de influência e ábacos de Pickett e Ray	43
2.4. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO <i>PORTLAND CEMENT ASSOCIATION 1984 (PCA/84)</i>	48
2.4.1. Critério de fadiga.....	49
2.4.2. Critério de erosão e escalonamento	50
2.4.3. Metodologia do cálculo	53
2.5. PAVIMENTOS DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	55
2.5.1. Pavimentos de concreto simples	58
3. METODOLOGIA.....	61
3.1. COLETA DAS AMOSTRAS.....	62
3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	64
3.2.1. Moldagem dos corpos-de-prova/Compactação Proctor.....	65
3.2.2. Expansão	74
3.2.3. Penetração.....	77
4. RESULTADOS E DIMENSIONAMENTO DA PISTA DE ROLAMENTO	79
4.1. RESULTADOS.....	79

4.2. DIMENSIONAMENTO DA PISTA DE ROLAMENTO	86
4.2.1. Tráfego	86
4.2.2. Infraestrutura e sub-base	87
4.2.3. Placa de concreto	89
4.2.4. Cálculo das espessuras	90
4.2.4.1. Espessura necessária	96
5. CONCLUSÕES	98
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE A – TABELAS	104

1. INTRODUÇÃO

Em 24 de outubro de 1933, foi colocada, onde situa-se hoje o Palácio das Esmeraldas (figura 1.1), planalto determinado por Atílio Correia Lima, a pedra fundamental da nova cidade, Goiânia (PREFEITURA DE GOIÂNIA, 2012). Inicialmente planejada para 50 mil habitantes, obteve nos anos de 1960 um acelerado crescimento populacional, atingindo um milhão de habitantes sessenta anos depois de sua fundação e, estima-se que hoje já ultrapassa a faixa dos 1,4 milhões (IBGE, 2017). Advindo de todo esse aumento demográfico e consequente desenvolvimento industrial, que fora influenciado pelas grandes metrópoles do país, o caos urbano, no que tange ao trânsito, é uma das principais consequências, uma vez que, quanto mais são as pessoas, mais são os trajetos casa-trabalho, o que afeta não só a população e os usuários das vias, mas também as próprias vias. Nesse sentido, na década de 1970, foi implementado em Goiânia, o projeto do arquiteto Jaime Lerner, que propunha um eixo único de fluxo de ônibus, do tipo *Bus Rapid Transit* – BRT, denominado Eixo Anhanguera (O POPULAR, 2017) que, até hoje está em operação e continua suprimindo a grande demanda (figura 1.2).

Figura 1.1 – Palácio das Esmeraldas década de 40



Fonte: Prefeitura de Goiânia, 2017

Figura 1.2 – Eixo Anhanguera



Fonte: O Popular, 2010

Com o intuito de evoluir a problemática do trânsito citada acima, que não atinge a capital goiana isoladamente, mas também a maioria, senão todos os conglomerados mundiais, a Engenharia de Tráfego desenvolveu-se bastante ao longo dos anos, e criaram-se várias alternativas viáveis e já em utilização nas grandes capitais do país, como o uso de meios alternativos de transportes (infraestrutura ciclovária), rodízio de carros, maior rigor em multas e implantação e maior investimento em transportes coletivos, para que a população seja estimulada a usá-los. No caso de Goiânia, o BRT implantado no sentido Leste-Oeste contribuiu com a flexibilidade do trânsito, porém, da década de 70 até os dias atuais, a cidade continuou crescendo e a falta de políticas de investimento em transporte público de qualidade fez com que grande parte dos habitantes goianienses optassem pela

aquisição de veículos particulares, contribuindo cada vez mais com o congestionamento do trânsito na cidade (O POPULAR, 2017). Sob essa ótica, viu-se necessário a implementação de uma alternativa que suprisse esse adicional populacional e desafogasse as vias principais da cidade, contribuindo com a integração e fluidez da capital com a Região Metropolitana. Sendo assim, por meio da Portaria nº 185, de 24 de abril de 2012, o Ministério das Cidades tornou pública a seleção de proposta apresentada pela Prefeitura do Município de Goiânia, através do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC 2) – Mobilidade Grandes Cidades, relativa ao projeto básico de implantação do Corredor Norte-Sul – BRT-NS com a solução do tipo BRT (CONTROLADORIA GERAL DA UNIÃO, 2015), com 27 km de extensão, unindo Goiânia e Região Metropolitana e beneficiando cerca de 120.000 usuários por dia (CMTC, 2012), orçado em quase 270 milhões de reais e com previsão de término para março de 2019 (G1-GO, 2018).

É sabido da importância que um transporte público de qualidade tem para a vida de um cidadão. Evita atrasos nos compromissos, acidentes, eventuais prejuízos mecânicos dos automóveis, permite trajetos com conforto etc. Para que essa qualidade seja presente, vários são os fatores que necessitam de trabalhar de forma eficaz conjuntamente. Entre eles, está o objeto de estudo deste trabalho: a interface solo-pavimento, a saber a capacidade de carga do solo do subleito do pavimento, que é do tipo rígido, de concreto de cimento Portland com barras de transferência, que, segundo a Associação Brasileira de Pavimentação (2010), é o mais ideal para vias que apresentam as características do BRT: tráfego intenso, pesado e repetitivo. Essa capacidade de suporte é, na maioria dos projetos, mensurada por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) – *California Bearing Ratio* (CBR), índice formulado por O. J. Porter na década de 30 (vide item 2.2.1), que é o fator mais importante do solo no dimensionamento de pavimentos (asfálticos ou de concreto). Para analisar esse importante parâmetro do solo com mais clareza e facilidade de forma prática, este trabalho é compreendido em um estudo de caso, de uma obra real em execução e que agrega bastante valor no tocante à mobilidade urbana do município de Goiânia e Região Metropolitana.

1.1. OBJETIVOS

Neste item estão contidos os objetivos desta pesquisa, tanto gerais quanto específicos.

1.1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal, compreendendo um estudo de caso (pavimento de concreto do BRT-NS), analisar a importância e a influência do CBR do solo do subleito para o dimensionamento de pavimentos de concreto de cimento Portland, confrontando e analisando, ao final, os resultados que foram obtidos pelo consórcio executor da obra.

1.1.2. Objetivo específico

Para que o objetivo geral explanado no item 1.1.1 possa ser alcançado, há de se realizar os objetivos específicos abaixo listados:

- Preparação das amostras (nove furos) previamente coletadas e caracterizadas, para os ensaios de Compactação Proctor e Índice de Suporte Califórnia (ISC);
- Execução dos ensaios de Compactação Proctor, na energia normal (12 golpes) e Índice de Suporte Califórnia;
- Confrontar os resultados de CBR e o próprio dimensionamento com os reais que foram obtidos e executados pela Companhia Metropolitana de Transporte Coletivo (CMTC).

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em forma de capítulos, sendo o primeiro correspondente à Introdução, onde está disposta uma breve apresentação do estudo que realizado e alguns conceitos iniciais, além dos objetivos, justificativa e a estruturação. No capítulo 2, compreende-se o Referencial Teórico, onde está contida toda a fundamentação teórica utilizada para realizar a pesquisa. No capítulo 3 denominado Metodologia, está contida a forma como o trabalho foi executado, ou seja, a sequência metodológica para obter o objetivo desta pesquisa (ver item 1.1.1). No capítulo 4, que compreende os resultados obtidos no trabalho, juntamente com o dimensionamento da estrutura do pavimento obtido através dos ensaios experimentais. O capítulo 5 se refere às conclusões, onde define se os resultados do capítulo 4 foram satisfatórios e descreve-se a relação dos resultados experimentais e dos resultados de campo. O capítulo 6 corresponde as sugestões para trabalhos

futuros. Por fim, tem-se as referências que serviram de base e fonte de conteúdo para a elaboração do trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para que se possa compreender as técnicas e teorias que foram utilizadas para a realização deste estudo de caso, faz-se necessário obter informações contidas na bibliografia técnica vigente da mecânica dos solos e pavimentação, bem como do tipo de transporte coletivo que utilizará o pavimento, o BRT. Sendo assim, neste capítulo, são abordados conceitos sobre o BRT, as propriedades mecânicas que devem ser analisadas no solo do subleito para a execução do pavimento – com enfoque no CBR e no coeficiente de recalque k , e pavimentos rígidos.

2.1. BRT – *BUS RAPID TRANSIT*

Criado em 1974 pelo arquiteto e então prefeito da cidade de Curitiba, no Paraná, Julio Lerner, o BRT de Curitiba foi o pioneiro no sistema e hoje, é referência na mobilidade urbana mundial, além de ser um dos únicos BRT's do tipo completo do mundo, formado por linhas expressas, alimentadoras, interbairros e diretas, sendo composto por 1.980 ônibus e atendendo a 395 linhas (Associação Nacional de Empresas de Transportes Urbanos, 200-?)

Segundo WRIGHT e HOOK (2008), o acesso a empregos, educação e serviços públicos fazem parte do desenvolvimento humano e, um sistema de transporte público eficiente e de preço justo pode propiciar tal desenvolvimento. Sendo assim, dentre os sistemas de transporte público em funcionamento, o Bus Rapid Transit (BRT) é um dos mecanismos de custo mais eficiente para o desenvolvimento de um sistema de transporte público que possa se expandir para uma rede completa, além de oferecer um serviço veloz e de qualidade. Levinson *et al.* (2003) define BRT como “um transporte público de alta qualidade, orientado ao usuário, que realiza mobilidade urbana rápida, confortável e de custo eficiente”.

Bus Rapid Transit (BRT) é um sistema de transporte de ônibus que proporciona mobilidade urbana rápida, confortável e com custo eficiente através da provisão de infraestrutura segregada com prioridade de passagem, operação rápida e frequente e excelência em marketing e serviço ao usuário. (WRIGHT e HOOK, 2008).

Na prática, o BRT lança mão das qualidades individuais do transporte ferroviário e rodoviário urbano de forma conjunta, ou seja, se utiliza de um sistema de transporte de massa por meio de ônibus, o que proporciona mobilidade, conforto, flexibilidade e custo eficiente, aliado ao número elevado de passageiros por unidade de transporte, vias exclusivas, velocidades constantes e poucas interrupções

durante viagens, que é proporcionado pelos metrô e trens (CMTC, 2012), como se pode ver no BRT da cidade de Quito (figura 2.1). Essa vantagem de aliar todos os atributos de um sistema ferroviário num rodoviário se torna ainda maior uma vez que o custo de implantação de um BRT é uma fração de um sistema ferroviário, custando entre 4 a 20 vezes menos em relação a bondes ou VLT's (veículo leve sobre trilhos) e 10 a 100 vezes menos que um sistema de metrô. Esse relativo baixo custo do BRT (tanto de implementação quanto de operação), faz com que seja uma alternativa bastante viável para cidades de baixa renda de países em desenvolvimento onde, o custeio total de toda a implantação da obra é financiado somente utilizando recursos internos (nacionais e municipais), evitando assim os empréstimos e financiamentos externos.

Em suma, o BRT é um sistema de transporte de ônibus que conjuga infraestrutura de qualidade, operações eficientes, arranjos institucionais e de negócios eficazes e transparentes, tecnologia sofisticada e excelência em marketing e serviço ao usuário.

O BRT basicamente imita as características de desempenho e conforto dos modernos sistemas de transporte sobre trilhos, mas a uma fração do custo. (WRIGHT e HOOK, 2008).

Figura 2.1 – Linha Ecovia de Quito



Fonte: Lloyd Wright (2008)

Além de toda a vantagem e comodidade relacionado à mobilidade e conforto, os benefícios no âmbito ambiental também são significantes. Estudos realizados

pelo SETRANSP (Sindicato das Empresas de Transporte Coletivo Urbano de Passageiros de Goiânia) indicam redução de cerca de 50% de emissão de poluentes através do sistema de BRT, simplesmente pelo aumento da velocidade operacional dos ônibus. Ademais, espera-se que, havendo a mudança do combustível de diesel comum para biodiesel, haja uma redução de cerca de 1.407 toneladas de emissões de poluentes no meio (Associação Nacional de Empresas de Transportes Urbanos, 2012).

2.1.2. BRT em Goiânia

Após a adoção do sistema de forma pioneira em Curitiba, várias outras cidades, até internacionalmente, se influenciaram pela iniciativa e começaram a implantar, mesmo que aos poucos, as características do BRT. Não foi diferente na capital goiana, quando dois anos depois da criação em Curitiba, implantou-se o BRT Anhanguera, ou como é popularmente conhecido “Eixo Anhanguera”, o segundo corredor de BRT implantando no Brasil e, conseqüentemente no mundo (INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO, 2016), que corta a cidade no sentido Leste-Oeste e atende média de 20.000 passageiros/dia, através das 19 estações e 5 terminais ao longo dos 13,5 km de extensão (Associação Nacional de Empresas de Transportes Urbanos, 200-?).

Através dos dados da figura 2.2, é possível verificar que o sistema do Eixo Anhanguera, não atende boa parte das características que contemplam um sistema de BRT completo, como a ausência de faixas de ultrapassagem, de prioridade semafórica e de gerenciamento remoto com localização automática, fatores esses que influem negativamente com o controle e tempo de viagem dos usuários. Ademais, o espaço urbano em que foi inserido não obteve revitalizações consideráveis no quesito de propiciar conforto visual e de bem-estar (BENEDETTI, 2013). Dos 24 itens que compreendem características de BRT, contidos na tabela comparativa dos BRT's existentes no Brasil, do Manual de BRT, somente 13 são completamente preenchidos pelo BRT Eixo Anhanguera.

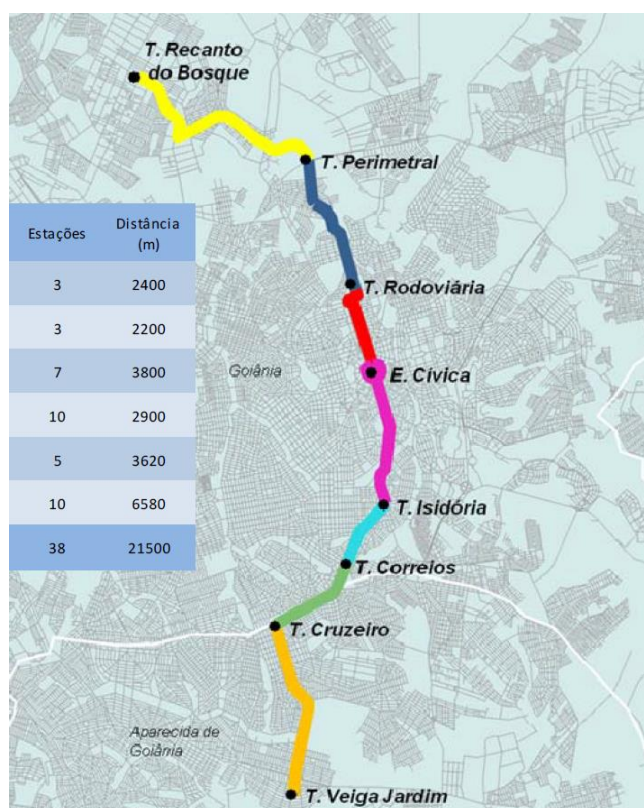
À medida que novos experimentos em BRT's surgem, o estado da arte em BRT indubitavelmente continua a melhorar. Apesar de tudo, o foco no usuário do BRT, certamente, continua a ser sua característica mais marcante. (WRIGHT e HOOK, 2008).

Mesmo embora descumpra características fundamentais que definem um sistema BRT, o Eixo Anhanguera vem cumprindo muito bem o seu papel há mais de

40 anos, flexibilizando a cidade no sentido Leste-Oeste e ligando Goiânia à região metropolitana de forma eficaz.

A eficácia do sistema no sentido Leste-Oeste não exclui o fato de que, durante o passar dos anos, o sistema veio defasando-se, vez que a população cada vez mais cresceu e as cidades conurbadas também. Nesse sentido, surge a necessidade de implantar-se mais um BRT, a fim de suprir o adicional gerado pelo caos urbano. Ademais, o BRT já existente supre a demanda do fluxo entre a capital e as cidades de Trindade, Senador Canedo e Goianira, restando em déficit a ligação Goiânia-Aparecida de Goiânia. Considerando essa problemática e que, o Eixo Norte-Sul (Corredor Goiás) possui maior extensão que o Eixo Leste-Oeste (Corredor Anhanguera) segundo o Plano Diretor de Transporte Coletivo Urbano da Grande Goiânia, iniciaram-se as obras do BRT Norte-Sul, através do PAC 2 (Programa de Aceleração do Crescimento), que ligará a capital goiana à Aparecida de Goiânia, com extensão de 27 km, iniciando no Terminal Veiga Jardim e findando no Terminal Recanto do Bosque (figura 2.3), sendo 22 km na capital e o restante do trecho em Aparecida.

Figura 2.2 - Extensão do Eixo Norte-Sul



Fonte: CMTc (2012)

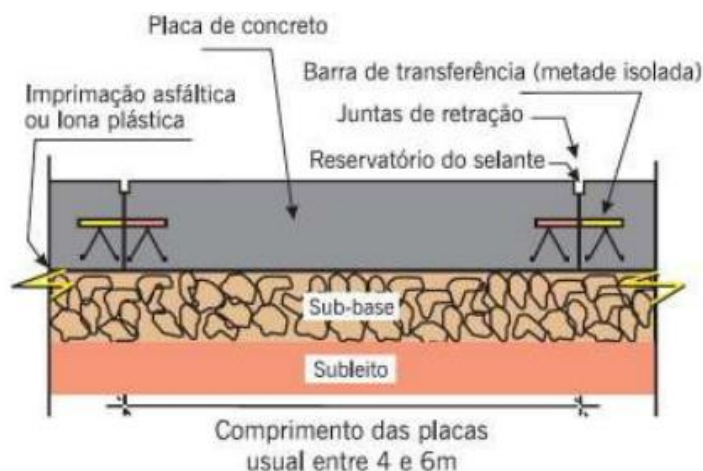
2.2. MECÂNICA DOS SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

As obras de engenharia interagem com o meio e entre si próprias, tendo todas elas uma fundação e assim, conseqüentemente, sempre possuem um vínculo com o solo em que estão assentadas (GONÇALVES, 2014).

De acordo com SENÇO (1997), os materiais que compõem as camadas do pavimento em si não são os únicos a se ter conhecimento na execução de pavimentação, mas também os que constituem o subleito, no caso o solo do subleito que, mesmo não sendo propriamente utilizado para compor o pavimento, é sempre o suporte da estrutura (fig. 2.4).

Além disso, o método que se utilizou para dimensionar o pavimento de concreto (método PCA/84), se fundamenta na teoria de Westergaard (vide item 2.3.1 que define a espessura da placa de concreto sendo função da resistência à tração na flexão. As tensões de tração na placa dependem das deformações por flexão desta, e essas deformações dependem do coeficiente de recalque k do solo de suporte, o subleito. Sendo assim, partindo da primeira camada que a placa de concreto faz contato até onde assenta-se sob o subleito, é necessário conhecer o coeficiente de recalque no topo da sub-base, que é a superfície onde a placa se assenta. Esse coeficiente depende do coeficiente de recalque do subleito, camada onde a sub-base se assenta. Logo, faz-se necessário conhecer o valor do coeficiente de recalque do subleito, a fim de dimensionar a placa de concreto do pavimento e, obtém-se esse valor através do valor de suporte do solo, obtido pelo CBR, que por sua vez é diretamente correlacionado com o coeficiente k , através de gráficos e ábacos (vide item 2.2.2.2).

Figura 2.3 – Estrutura de pavimento rígido com barras de transferência



Fonte: BERNUCCI et al., 2006

Além do CBR, fator que é a base do dimensionamento de pavimentos, outras análises são importantes para a classificação mais fidedigna possível do solo da fundação, tais como granulometria, índices de plasticidade (limite de liquidez e limite de plasticidade), compactação Proctor etc. Essa classificação e caracterização geral dos nove furos analisados já foi realizada por Machado (2018). Sendo assim, de posse de todos esses dados, o foco será no ensaio de Índice de Suporte Califórnia, que permitirá dimensionar o trecho estudado nesse trabalho.

2.2.1. CBR – *California Bearing Ratio*

California Bearing Ratio ou Índice de Suporte Califórnia é, sem dúvidas, o método mais aceito e estudado para avaliar o comportamento de um solo, no tocante ao seu suporte ou resistência às solicitações, tanto em subleito de pavimentos, quanto em suas camadas propriamente ditas. Esse método, foi inicialmente idealizado por O. J. Porter, então diretor da Divisão de Materiais do *California Highway Department* (Departamento Rodoviário da Califórnia), no final da década de 30, com o intuito de definir a resistência dos materiais granulares que eram utilizados nos pavimentos. Os resultados obtidos eram separados em duas curvas, referentes a tráfegos leve e pesado e, a partir dessas, eram dimensionados os pavimentos. Posteriormente, esse método específico para pavimentos criado por Porter foi desligado quando o U. S. Corps of Engineers associou os resultados a outros tipos de curvas, utilizadas para dimensionamento de aeroportos e rodovias (SENÇO, 1997).

O CBR ou ISC pode ser definido como a “relação percentual entre a pressão necessária para fazer penetrar, de maneira padronizada, um pistão numa amostra de solo convenientemente preparada e a pressão para fazer penetrar o mesmo pistão, à mesma profundidade, numa amostra padrão de pedra britada, ou material equivalente, exigindo a pressão de 1.000 psi para a penetração de 0,1” ou 1.500 psi para 0,2” de penetração” (SENÇO, 1997). Na prática, o ensaio de CBR mede a resistência à penetração de uma amostra saturada compactada segundo o método de Proctor, através de um pistão com 49,6 mm de diâmetro (SOUZA, 2007).

No Brasil, a metodologia do ensaio é regida pela NBR 9895:2016 denominada “Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio” e pela DNIT 172/2016 – ME “Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio”, que diferem-se somente na quantidade de leituras que são feitas, não alterando o resultado entre si. O trabalho em questão, executou o ensaio do tipo P, onde é moldado somente um corpo-de-prova na umidade ótima, com energia de compactação do Proctor Normal. Sendo assim, determina-se a massa específica aparente máxima do solo e a umidade de

compactação ótima para a energia de compactação referente ao ensaio. Posteriormente, realiza-se o peneiramento do material na peneira #4 (4,76 mm), a fim de verificar se há material retido nesta. Caso não haja material retido, procede-se com o ensaio, do contrário, passa-se esse material retido na #4 na peneira de abertura 19,1 mm (#3/4”), incorporando o material à amostra que será ensaiada, sendo denominada “pedregulho”. Com o valor da porcentagem da fração retida na peneira 19,1 mm, substitui-se esse valor por material do excesso de amostra, passando na peneira de 19,1 mm e ficando retido na peneira nº 4, com mesma quantidade retida na peneira de 19,1 mm. Como o ensaio será realizado com as amostras na umidade ótima, calcula-se a quantidade de água a ser adicionada para se obter os teores desejados. Feito a homogeneização do solo, faz-se a compactação segundo a energia especificada para o ensaio e, posteriormente, coloca-se os corpos de prova em imersão após feitas as pesagens para determinação do teor de umidade e densidade do solo. Através de um aparelho extensômetro, tendo os corpos de prova (c.p.) totalmente imersos em água, faz-se as medições da expansão do solo, durante quatro dias mergulhado (SENÇO, 1997)

Após esse período, o ensaio de penetração pode ser realizado. Através do aparelho de penetração do CBR (figura 2.5), realiza-se as penetrações no centro do c.p., tendo as cargas aplicadas medidas por um manômetro e a penetração do cilindro por um extensômetro. A velocidade de penetração do cilindro deve ser de 1,25 mm/min., obtendo-se as cargas para as penetrações de 0,63; 1,25; 2,50; 5,00; 7,50; 10,00 e 12,50 mm. Essas cargas são aplicadas mediante tempos definidos, que são lidos com o auxílio de um cronômetro. Através dos valores obtidos, coloca-se os dados num gráfico que relaciona carga ou pressão com penetração. O valor do cálculo de CBR é obtido conjuntamente com a expansão, em forma de porcentagem, com aproximação de 0,1%, definido como o acréscimo de altura do c.p., durante a imersão, em relação à altura inicial do c.p. (SENÇO, 1997).

Figura 2.4 - Aparelhagem CBR



Fonte: Autoria Própria (2018)

Porter fixou um material padrão de CBR = 100%. Os outros materiais correlacionam-se em porcentagem com o material padrão. Através de cargas ou pressões, define-se o material padrão como aquele que, para penetrar 0,1", precisa de carga de 1.350 kgf, ou 1.000 psi, ou para penetração de 0,2", exige carga de 2.050 kgf, ou 105,46 kgf/cm², que corresponde a 1.500 psi. Essas condições são praticamente independentes, admitindo assim o maior valor de CBR final.

Todos esses dados podem ser resumidos através das seguintes equações, onde $Q_{2,5}$ é a carga que provoca a penetração de 2,5 mm, medida em kgf; Q_5 é a carga que provoca a penetração de 5,0 mm, medida em kgf; $P_{2,5}=P_{0,1}$ são as pressões que provocam as penetrações de 2,5 mm, em kgf/cm²; $P_5=P_{0,2}$ são as pressões que provocam a penetração de 5 mm, em kgf/cm²; $P_{0,1}$ é a pressão que provoca a penetração de 0,1", em psi e $P_{0,2}$ é pressão que provoca a penetração de 5 mm, em psi.

$$CBR_{2,5} = (Q_{2,5}/1.350) \cdot 100\% = (P_{2,5}/70,31) \cdot 100\% = (P_{0,1}/1.000) \cdot 100\% \quad (2.1)$$

$$CBR_5 = (Q_5/2.050) \cdot 100\% = (P_5/105,46) \cdot 100\% = (P_{0,2}/1500) \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Através dos resultados das duas equações, determina-se o CBR que se utilizará. Se $CBR_{2,5} > CBR_5$, adotar-se-á o $CBR_{2,5}$. Caso contrário, repete-se o ensaio até que seja confirmado diferença no novo ensaio, pois, para penetrações da ordem de 5 mm, é bem provável que o solo já entrou em fase de rompimento por cisalhamento, o que pode ser visto na curva CBR, devido ao seu abatimento para valores dessa ordem.

Basicamente, o ensaio consiste em três etapas (que serão mais detalhadas no capítulo 3 deste trabalho): a compactação dos corpos de prova na energia necessária, segundo o método Proctor; obtenção da curva de expansão, através da leitura dos extensômetros a cada 24 horas, durante quatro dias; e por fim o valor da resistência à penetração, através da penetração do pista no c.p. logo após retirado da imersão, obtendo assim os valores de carga do solo.

Estando a Engenharia Geotécnica em constante evolução e, sendo o método do CBR já largamente utilizado desde o início do século XX, a discussão acerca da eficácia desse difundido ensaio é inevitável, bem como questionamentos quanto ao seu empirismo, dispersão de resultados, grande quantidade de solo para sua determinação etc. Além disso, a discussão sobre sua regionalidade é plausível para nossa região em questão, pois segundo Nogami e Villibor (1979 apud SOUZA, 2007), o ensaio de CBR é insuficiente para caracterização dos solos destinados ao uso em pavimentação nas regiões tropicais úmidas, por limitar-se à obtenção do valor da expansão e de suporte para umidade ótima e massa específica máxima de uma determinada energia de compactação em uma condição de quatro dias de imersão e uso de uma sobrecarga padrão, sendo recomendado outras condições de umidade de compactação, imersão, sobrecarga e energias de compactação, exigindo a moldagem de 15 corpos de prova em média, e cerca de 100 kg de solo, demandando muito mais tempo e labor.

Por esse motivo, outros métodos e estudos foram realizados a fim de aprimorar e preencher essas lacunas deixadas pela regionalidade e empirismo que baseiam o método, como o Mini-CBR ou S-CBR. Segundo Marson, L. A., (2004 apud SOUZA 2007), esse ensaio possui grandes vantagens em relação ao antecessor, como a maior rapidez em sua execução, menor quantidade de amostra, maior praticidade etc.

Sendo assim, pode-se estabelecer como desvantagens, além das citadas acima, o alto grau de esforço físico e movimentos repetitivos durante sua execução e a lentidão do ensaio, que dura no mínimo quatro dias. Em contrapartida, suas

vantagens são a sua facilidade e simplicidade de execução, não demandando de cálculos muito dispendiosos e sua credibilidade no meio técnico, pois é um método quase centenário e com resultados e parâmetros reconhecidos no mundo todo, além de ser padrão nacional na pavimentação.

2.2.2. Coeficiente de recalque k do solo

Uma edificação, seja qual for a sua finalidade, tamanho ou tipo, tem seu corpo ou estrutura diretamente ligado ao solo em que está assente, através da fundação. Nos pavimentos de concreto, essa interação solo-fundação-estrutura não é diferente. Sendo assim, o dimensionamento de pavimentos passa pelo entendimento das características mecânicas intrínsecas da estrutura do pavimento, bem como das características geotécnicas do material da fundação (FERREIRA, 2004), no caso o tipo de solo utilizado no subleito. Então, com base no exposto, além do CBR do solo do subleito - característica geotécnica do material da fundação, a análise para o dimensionamento do pavimento abrange também o coeficiente k do solo, chamado de coeficiente de reação vertical, coeficiente de recalque, módulo de reação ou coeficiente de mola, índice que compreende a característica mecânica da estrutura.

O coeficiente de recalque é definido como a relação entre a tensão unitária aplicada e o recalque correspondente, como na equação a seguir.

$$k = p / w \quad (2.3)$$

onde:

q = tensão unitária aplicada a uma placa rígida, em Mpa;

k = coeficiente de recalque, em Mpa/m;

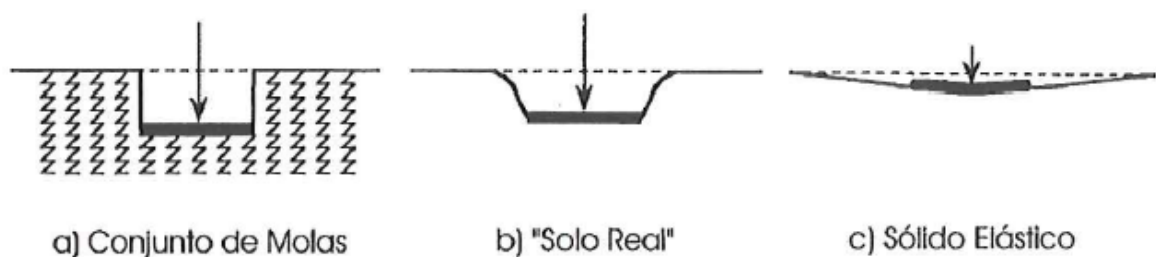
w = deflexão ou recalque, em m.

Esse parâmetro pode ser obtido através de provas de carga ou por métodos indiretos, por correlações com outros parâmetros do solo (JUNIOR, 1998), que está mostrado no item 2.2.2.2.

Negativamente, a análise baseada no coeficiente de recalque tem suas limitações pois o solo não possui comportamento elástico, seu valor é função das dimensões, do fator de forma e rigidez da placa e da estratificação do solo a medida em que se aprofunda, uma vez que a prova de carga não percebe essas descontinuidades com placas de pequenos diâmetros.

A fim de entender a relação do solo com uma estrutura lhe aplicando uma força, elaborou-se modelos físicos que demonstram a reação do solo quando sujeito a tensões. A maioria desses modelos trata o solo como um conjunto de molas (FERREIRA, 2004), considerando que a deflexão em qualquer ponto de uma placa de concreto é proporcional à pressão de reação no ponto em questão. Dentre esses modelos, o mais simples e usual é o Modelo de Winkler. Outro modelo, denominado de Semi-espaço de Boussinesq, define o solo como um sólido elástico, considerando assim o deslocamento em um ponto não sendo apenas função da tensão sobre esse ponto, mas também dos pontos em volta, havendo uma distribuição contínua do deslocamento na superfície. As duas análises tratam de situações extremas e irreais, sendo o modelo que mais se aproxima com a realidade o intermediário, entre as duas situações de recalque (RUFINO, 1997 apud FERREIRA, 2004), como mostrado na figura abaixo.

Figura 2.5 – Principais modelos de resposta do solo



Fonte: Rufino (1997)

2.2.2.1. Modelo de Winkler

Como dito no item 2.2.2, o modelo idealizado por Winkler considera o solo como um conjunto de molas lineares (figura 2.7), independentes entre si e minimamente espaçadas umas das outras, de modo que cada mola se deforma individualmente em resposta à tensão aplicada sobre ela, não distribuindo essa tensão às molas vizinhas. Por isso, admite-se que a tensão vertical em qualquer ponto da superfície da fundação é diretamente proporcional à deflexão nesse ponto, sendo a constante de proporcionalidade denominada de coeficiente de recalque (FERREIRA, 2004), o que resulta na equação 2.4 a seguir:

$$q(x,y) = k.w(x,y) \quad (2.4)$$

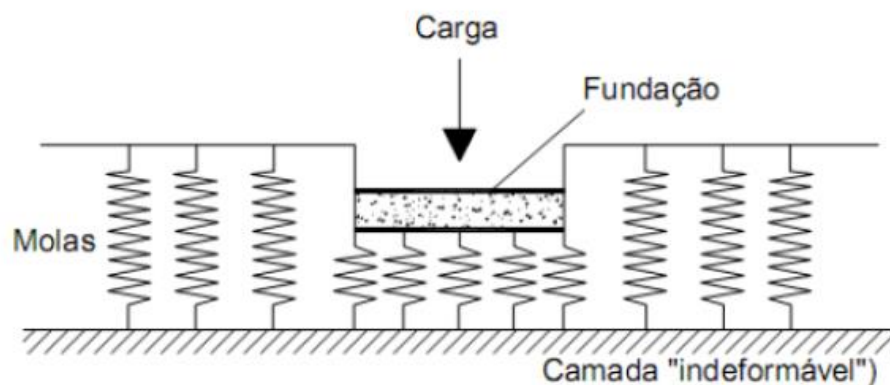
onde:

q = tensão vertical no ponto (x,y) ;

k = coeficiente de recalque;

w = deflexão no ponto (x,y) .

Figura 2.6 – Leito de molas de Winkler



Fonte: ANTONIAZZI (2011, apud Netto, 2014)

Paralelamente, faz-se uma analogia da idealização de Winkler ao elemento de fundação flutuando sobre um líquido denso de peso específico k , pois as unidades do coeficiente de recalque são as mesmas de um peso específico (FERREIRA, 2004).

Em 1923, Westergaard se utilizou da idealização de Winkler para a análise de pavimentos de concreto. Em seus estudos, considerou uma placa de concreto elástica, isotrópica, homogênea, com espessura constante e dimensões infinitas (FERREIRA, 2004), sendo o primeiro a apresentar um desenvolvimento lógico para determinação de esforços em pavimentos rígidos (OLIVEIRA, 2000), como será visto no item 2.3 deste trabalho.

2.2.2.2. Correlação entre o coeficiente k e o CBR do solo do subleito

Sendo o CBR um índice bastante estudado e conhecido na Engenharia Civil, sobretudo na Engenharia Rodoviária, tendo mais de 60 anos de estudo, há a possibilidade de determinar e correlacionar várias outras características do solo em função dele, o que reduz os trabalhos isolados acerca desses métodos (SENÇO, 1997).

Pitta (1990, apud FERREIRA, 2004) também reforça que a correlação do CBR com o módulo de reação é recomendada devido à larga utilização e grande experiência deste índice no Brasil. Além disso, Pitta (1998) acrescenta que a precisão dessa correlação é satisfatória no dimensionamento de pavimentos rígidos, uma vez que o cálculo da espessura da placa não é muito sensível a pequenas variações do suporte da fundação.

Sendo assim, formularam-se tabelas, baseadas no método de dimensionamento PCA – 1966, que correlacionam os valores de k para um dado valor de CBR, como pode ser visto na tabela a seguir, a fim de, somente com o valor de suporte poder dimensionar as espessuras, evitando a realização de eventuais provas de carga em placa, aumentando assim a praticidade do dimensionamento.

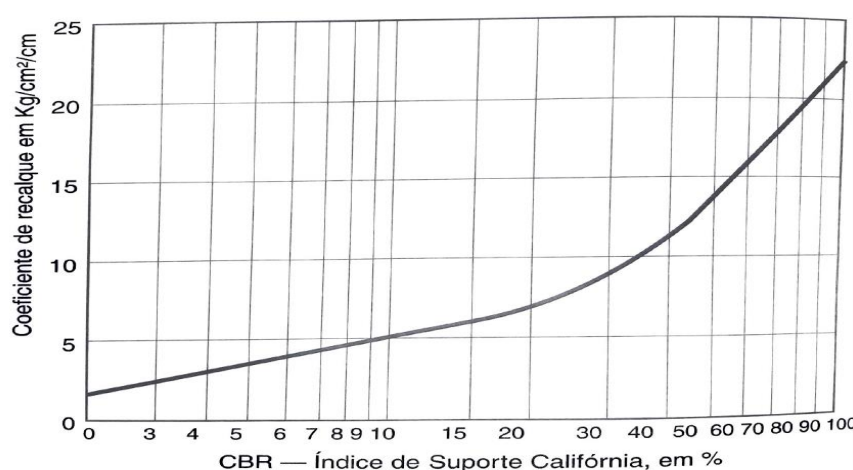
Tabela 2.1 – Correlação entre CBR e coeficiente de recalque k do subleito

CBR (%)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K(MPa/m)	16	24	30	34	38	41	44	47	49	51	53	54	56	57	59	60	61	62	63

Fonte: PITTA (1990)

Além das tabelas, pode-se correlacionar os dois índices através de gráficos elaborados empiricamente, como a seguir:

Figura 2.7 – Gráfico CBR x k

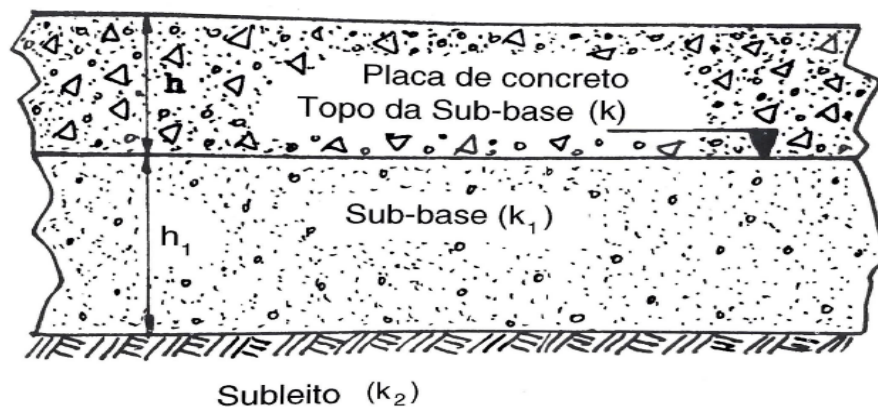


Fonte: SENÇO (1997)

Pitta (1990, apud Pitta, 1998), no método de dimensionamento da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), também comenta sobre prática consagrada internacionalmente em projetos modernos, a adição de uma camada delgada de

sub-base, a fim de conferir suporte razoavelmente uniforme e constante e eliminar o fenômeno de bombeamento dos finos do subleito, que costumeiramente causava a ruína dos antigos pavimentos de concreto. O esquema completo da estrutura do pavimento, com suas respectivas camadas e coeficientes k está mostrado a seguir, na figura 2.9.

Figura 2.8 - Coeficientes de recalque para cada camada do pavimento (k_2 , k_1 e k)



Fonte: SENÇO (1997)

Esse aumento na espessura da camada de sub-base, constituído de material de boa qualidade, traz significativo aumento do coeficiente de recalque do sistema subleito-sub-base – como se vê nas tabelas a seguir, de forma que a espessura da camada da placa de concreto é reduzida. Segundo Pitta (1998, apud FERREIRA 2004), o procedimento mais adequado a se realizar é a execução de provas de carga no topo da sub-base, fornecendo assim o valor ideal para o dimensionamento. Ademais, estão correlacionados com o CBR, a espessura e o tipo de material da sub-base, como mostrado nas tabelas a seguir:

Tabela 2.2 – Aumento de k em função de sub-base granular em diferentes espessuras

CBR (%)	K(MPa/m)	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm
2	16	19	22	27	33
3	24	27	31	37	45
4	30	34	38	44	54
5	34	38	42	49	59
6	38	42	46	53	65
7	41	45	50	56	69
8	44	48	53	60	72
9	47	52	56	63	76
10	49	54	58	65	79
11	51	56	60	67	81
12	53	58	62	69	84
13	54	59	63	70	85
14	56	61	65	72	87
15	57	62	66	73	88
16	59	64	68	75	91
17	60	65	69	76	92
18	61	66	70	77	93
19	62	67	71	78	94
20	63	68	72	79	96

Fonte: Adaptado de Pitta (1998)

Tabela 2.3 Aumento de k em função de sub-base de solo-cimento em diferentes

CBR (%)	K(MPa/m)	10 cm	15 cm	20 cm
2	16	50	66	89
3	24	69	91	122
4	30	81	108	145
5	34	90	119	160
6	38	98	130	174
7	41	103	138	185
8	44	109	146	195
9	47	115	153	205
10	49	119	158	212
11	51	122	163	218
12	53	126	168	225
13	54	128	171	229
14	56	131	176	235
15	57	133	178	239
16	59	137	183	245
17	60	139	185	248
18	61	140	188	251
19	62	142	190	255
20	63	144	192	258

Fonte: Adaptado de Pitta (1998)

Tabela 2.4 Aumento de k em função de sub-base de concreto rolado em diferentes espessuras

CBR (%)	K (Mpa/m)	10 cm	12,5	15 cm
2	16	65	77	98
3	24	87	101	126
4	30	101	118	145
5	34	111	128	158
6	38	120	138	169
7	41	127	145	177
8	44	133	152	186
9	47	140	159	194
10	49	144	164	199
11	51	148	168	204
12	53	152	173	209
13	54	154	175	211
14	56	158	179	216
15	57	160	182	219
16	59	164	186	224
17	60	166	188	226
18	61	168	190	229
19	62	170	192	231
20	63	172	194	233

Fonte: Adaptado de Pitta (1998)

Analizando as tabelas acima, pode-se concluir que, com a adoção de uma sub-base granular, pouca é a influência no k do sistema. Por outro lado, com a adição de solo-cimento de 10 cm de espessura, o resultado é um k cerca de 2,5 vezes o k do subleito e, em torno de 3 vezes quando com 10 cm de concreto rolado (Pitta, 1998).

Em suma, por meio das tabelas e de posse do valor de CBR do subleito ou da sub-base, determina-se os coeficientes de recalque dessas camadas, para que se obtenha no final o coeficiente da camada de concreto, que é o k necessário para dimensioná-la.

2.3. FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PCA/84

Segundo Rufino (1997) e como já citado nesse trabalho, o projeto de um pavimento é bastante complexo uma vez que é dependente de várias variáveis, como o tráfego, condições ambientais, suporte da fundação e análise geométrica e dos componentes (tipo de pavimento, acostamento, presença de juntas etc.). Pitta (1998) comenta sobre os critérios em que se baseiam os métodos clássicos de dimensionamento de pavimento de concreto, a saber as propriedades do concreto, capacidade de suporte da fundação e nas características do carregamento.

Rufino (1997) cita Figueroa (1983), definindo os elementos que são essenciais para se garantir um desempenho aceitável dos pavimentos de concreto ao longo de sua vida útil, como a manutenção das tensões devidas às cargas em níveis aceitáveis através de um projeto de espessura da placa; uniformidade do suporte; adoção de subbase evitando o bombeamento da camada subjacente à placa, principalmente quando se trata de tráfego pesado; e um projeto geométrico de juntas.

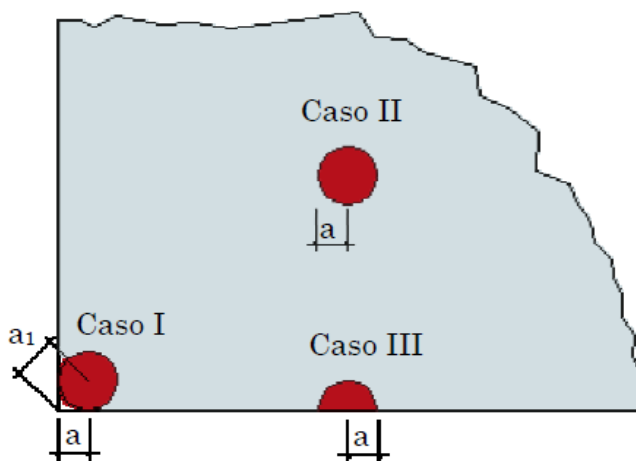
Neste tópico estão contidos de forma sucinta as teorias e o embasamento que estruturaram as formulações da *Portland Cement Association* (PCA/84) para o dimensionamento de pavimentos rígidos.

2.3.1. Teoria de Westergaard

Como já mencionado neste trabalho, na década de 20, Harald Malcolm Westergaard, engenheiro e matemático americano, utilizando da teoria de Winkler, propôs equações para a análise de tensões na flexão em placas de concreto submetidas a esforços oriundos de carga solitária (BALBO, 2003). Westergaard (1926), baseado no princípio da mínima energia e utilizando os métodos de Ritz das

aproximações sucessivas e o Teorema de Mawell nas deformações, investigou os deslocamentos em placas delgadas, elásticas, sob forças distribuídas em áreas circulares e semi-circulares, apoiados em líquido muito denso, analisando nos seguintes pontos ilustrados na figura 2.10 e descritos a seguir (apud OLIVEIRA, 2000).

Figura 2.9 – Posições de configurações de carregamentos na placa de concreto



Fonte: Adaptado de Oliveira (2000)

Onde:

- a) Caso I – As cargas tangenciam a junta transversal, e as tensões máximas de tração na flexão ocorrem na parte inferior da placa e paralelamente à junta;
- b) Caso II – Os eixos são perpendiculares à borda longitudinal externa e as rodas tangenciam-na, havendo tensões máximas de tração na flexão na parte inferior da placa e paralelamente à borda longitudinal externa;
- c) Caso III – Fenômenos semelhantes ao caso II, estando as rodas externas dos eixos afastados de 15 cm da borda longitudinal.

Foi inicialmente desenvolvida em 1926 uma equação para o cálculo da tensão máxima devido a uma carga colocada na borda da placa para um caso particular de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Em 1933, Westergaard complementou e generalizou essa primeira equação para o cálculo de tensões e, em 1939, essas formulações foram reelaboradas e são as vigentes e usuais. Posteriormente, em 1948, Westergaard desenvolveu novas fórmulas, acrescentando

áreas de contato elíptica e semi-elíptica e estendeu o uso das equações aos pavimentos de aeroportos, além de reformulações acerca do raio de carga aplicada, admitindo a hipótese de que este era maior do que 1,724 vezes a espessura da placa de concreto (RUFINO, 1997). Balbo (2003) reforça que, além de seus artigos sucessivos e vários estudos e correções tangentes à sua teoria de cálculo de tensões em placas de concreto, Westergaard inovou e desenvolveu uma teoria pioneira para o cálculo de tensões impostas pelo empenamento devido a gradientes térmicos.

Balbo (2003) comenta que, além das idealizações de Winkler-Zimmermann (item 2.2.2.1), as soluções propostas por Westergaard em 1926, tinham como base a Teoria Elástica de Placas (medianamente espessas) formalizadas por Poisson e Kirchhoff, tendo alguns critérios e exceções a se considerar. Westergaard considerou a placa como infinita, homogênea, isotrópica e elástica, sendo o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson constantes (Westergaard, 1926 apud Rufino, 1997). No tocante ao carregamento, limitou-se a um tipo particular, sendo somente uma carga de roda na superfície do pavimento, distribuída e analisada separadamente em cada uma das três posições, como visto na figura 2.10. Além disso, Balbo (2003) também acrescenta que as considerações feitas por Westergaard não consideram a existência de transferência de carga em juntas de placas de concreto simples, havendo de empregar funções polinomiais para campos de deslocamentos e possuir algumas hipóteses simplificadoras para a integração da equação diferencial que governa as placas em flexão.

Embasando-se nos resultados de Westergaard, Balbo (2003) conclui que, uma majoração de quatro vezes o valor do módulo de reação k do subleito é capaz de reduzir as tensões em torno de 10%, sendo que um acréscimo de 50% no raio da carga seria capaz da mesma redução de 10%, sem alteração de carga. Então, não alterando-se a carga, mas somente a carga distribuída, com pressão constante a fim de alterar-se o raio, pode-se concluir que:

- A dimensão da roda afeta a tensão resultante na placa;
- O valor de k é insignificante proporcionalmente a tensão na placa;
- O raio da carga é inversamente proporcional a tração na flexão.

Posterior às formulações de Westergaard, vários outros pesquisadores complementaram e fizeram reformulações acerca de sua metodologia. A mais recente e relevante entre essas metodologias foi a de Ioannides, em 1984, apresentando uma equação para o cálculo da deflexão, sendo essa a mais recomendada para este caso (RUFINO, 1997). Além disso, em sua pesquisa de doutorado, Ioannides fez reformulações e considerações acerca das dimensões da

placa quanto ao seu comportamento como placa infinita, além de analisar, sob a ótica de um *software* (ILLI-SLAB) que é baseado no método dos elementos finitos, as soluções de Westergaard, chegando à conclusão de que diversas equações foram mal interpretadas e utilizadas de forma incorreta (IOANNIDES et. al, 1985 apud RUFINO, 1997).

Oliveira (2000) afirma que a utilização das equações de Westergaard é limitada, uma vez que consideram apenas duas camadas: o pavimento e a fundação semi-infinita, excluindo a existência de sub-camadas intermediárias, como a sub-base por exemplo. Ademais, Ioannides et. al (1984, apud RUFINO, 1997) citam que as soluções de Westergaard fornecem resultados próximos às observações de campo para força no interior, mas não fornecem bons resultados para carregamento na borda ou no canto da placa. Além das constatações acerca das limitações do método, Balbo (2003) comenta que o próprio Westergaard reconhecia dificuldades em seu método, como:

- não permitir a consideração dos efeitos de variação da temperatura nas placas;
- não permitir a consideração de variação de espessura na placa, pois era comum a utilização de maiores espessuras nas bordas das placas;
- não considerava reações horizontais no subleito;
- não considerava os efeitos dinâmicos nos pavimentos.

2.3.2. Cartas de influência e ábacos de Pickett e Ray

Com o aumento da malha rodoviária e aeroportuária nos anos pós-guerra, e concomitante incremento da carga nos veículos, bem como o aumento do número de seus eixos, houve a necessidade da consolidação de métodos de cálculo de momentos fletores e tensões de tração na flexão resultantes de várias cargas sobre uma mesma placa de concreto (BALBO, 2003). Nesse intuito, além de simplificar as formulações de Westergaard, Pickett e Ray elaboraram em 1951 uma série de figuras, constituindo um método gráfico através de cartas de influência, a fim de determinar as tensões, momentos e os deslocamentos verticais (OLIVEIRA, 2000), causadas por qualquer configuração de carga atuante numa placa de concreto de espessura h assente sobre uma fundação do tipo líquido denso (HUANG, 1993 apud RUFINO, 1997). Essas cartas podem ser perfeitamente substituídas por ábacos de simples utilização, elaborados pelos mesmos autores, determinando a tensão de tração na flexão entrando com uma carga, um coeficiente de recalque e uma espessura de placa dados; ou com carga e coeficiente de recalque dados,

determinar a espessura da placa necessária para manter a tensão de tração na flexão dentro de um limite prefixado (PITTA, 1998).

Dentre as oito cartas, a sexta, se utilizou da equação para o cálculo de deflexões (ω) quando uma carga distribuída sobre uma área qualquer (não muito grande) está próxima da borda de uma placa, modificada da teoria original proposta por Westergaard em 1948:

$$\omega = \frac{2P}{\pi k \ell} \int_0^{\infty} \frac{\gamma \cdot \cos \frac{\alpha x}{\ell} \left[\cos \frac{\beta y}{\ell} + (1 - \mu) \cdot \alpha^2 \cdot \sin \frac{\beta y}{\ell} \right] \cdot e^{-\frac{\gamma y}{\ell}} \cdot d\alpha}{1 + 4(1 - \mu) \cdot \alpha^2 \cdot \gamma^2 - (1 - \mu)^2 \cdot \alpha^4} \quad (2.5)$$

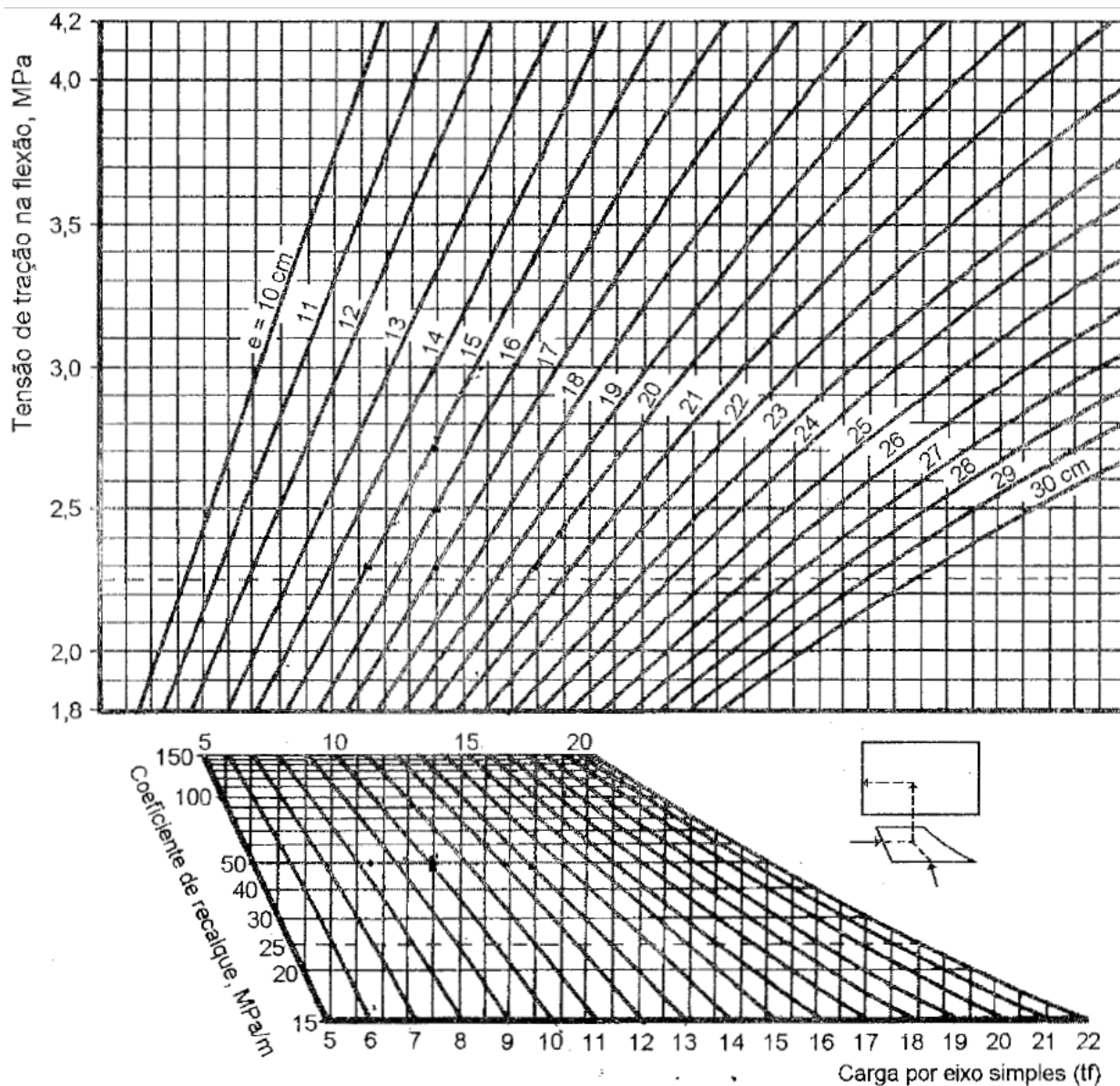
Na equação acima, β e γ são números reais positivos tal que $\alpha^2 + \beta^2 = \gamma^2$ e $2 \cdot \beta \cdot \omega \cdot \gamma = 1$. Como já visto e analisando a equação, não é considerada a transferência de cargas nas juntas das placas. Integrando a equação acima, Pickett e Ray assumiram um coeficiente de Poisson igual a 0,15. Devido à curvatura da placa em flexão, conhecida a equação da linha elástica deduzida por Westergaard, a tensão de tração na flexão na face inferior da placa, na direção x (sentido do tráfego) é calculada pela seguinte expressão (BALBO, 2003):

$$\sigma = -\frac{E \cdot h}{2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

Huang e Wang (1973) citados por Rufino (1997), afirmam que Pickett observou, comparando os resultados obtidos das tensões de canto críticas pelas fórmulas de Westergaard e as medidas em campo, que tais formulações sempre forneciam tensões muito pequenas em relação às tensões medidas, uma vez que as fórmulas de Westergaard são baseadas na hipótese de que a placa e a fundação estão em pleno contato. Admitindo que parte da placa não estava em pleno contato, Pickett desenvolveu fórmulas semi-empíricas que forneceram bons resultados comparativamente aos resultados experimentais. Além disso, cabe ressaltar que Pickett e Ray consideraram para a construção de suas cartas, o princípio de superposição de efeitos, admitindo assim que a estrutura teria comportamento elástico-linear (BALBO, 2003).

A seguir estão os ábacos que cobrem as faixas de valores mais usuais, para eixos simples e tandem duplos, respectivamente:

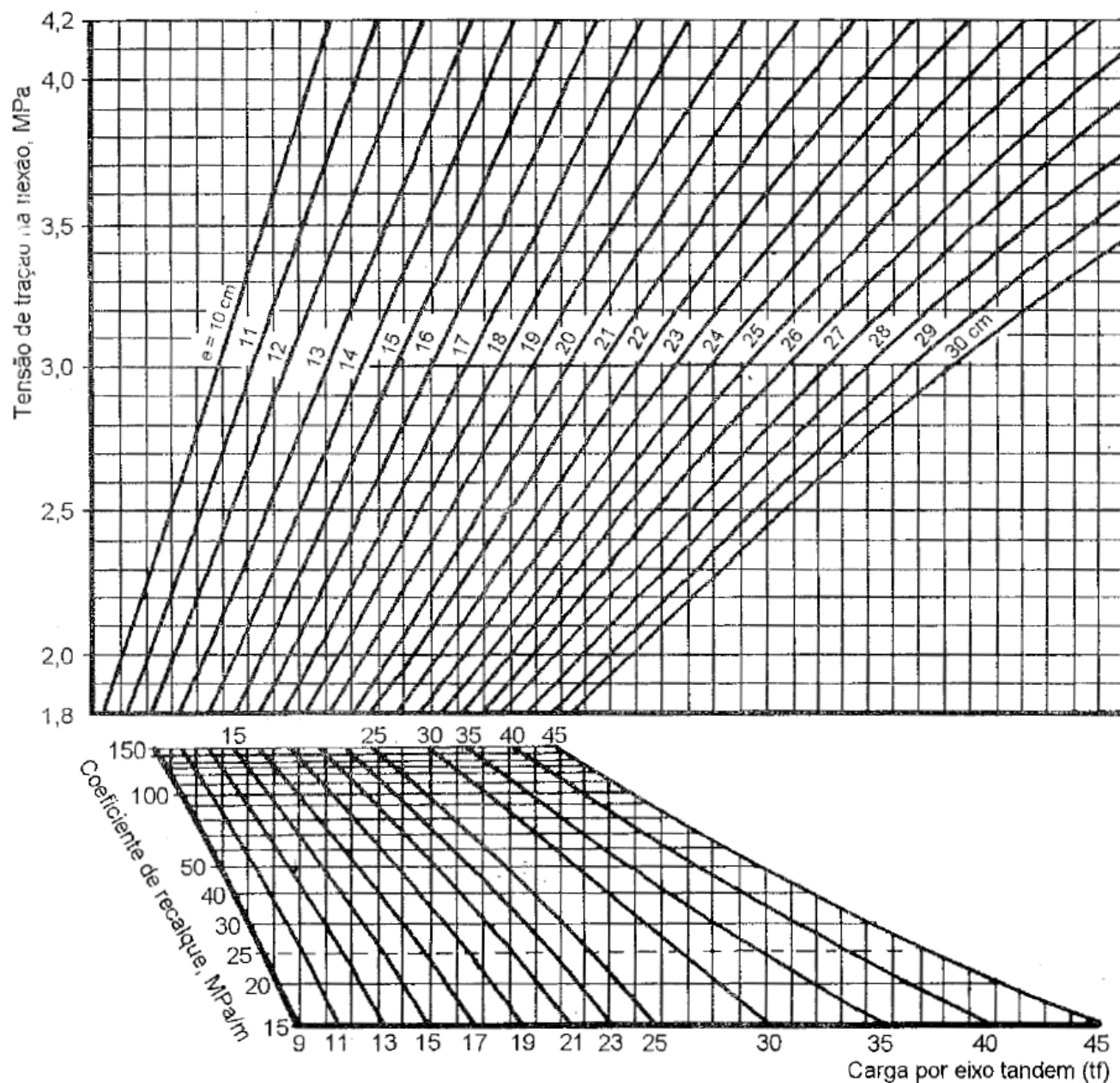
Figura 2.10 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos de concreto para eixos simples



PARA O CASO I, "INFLUENCE CHART 6"

Fonte: Adaptado de Pitta (1998)

Figura 2.11 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos de concreto para eixos tandem duplos

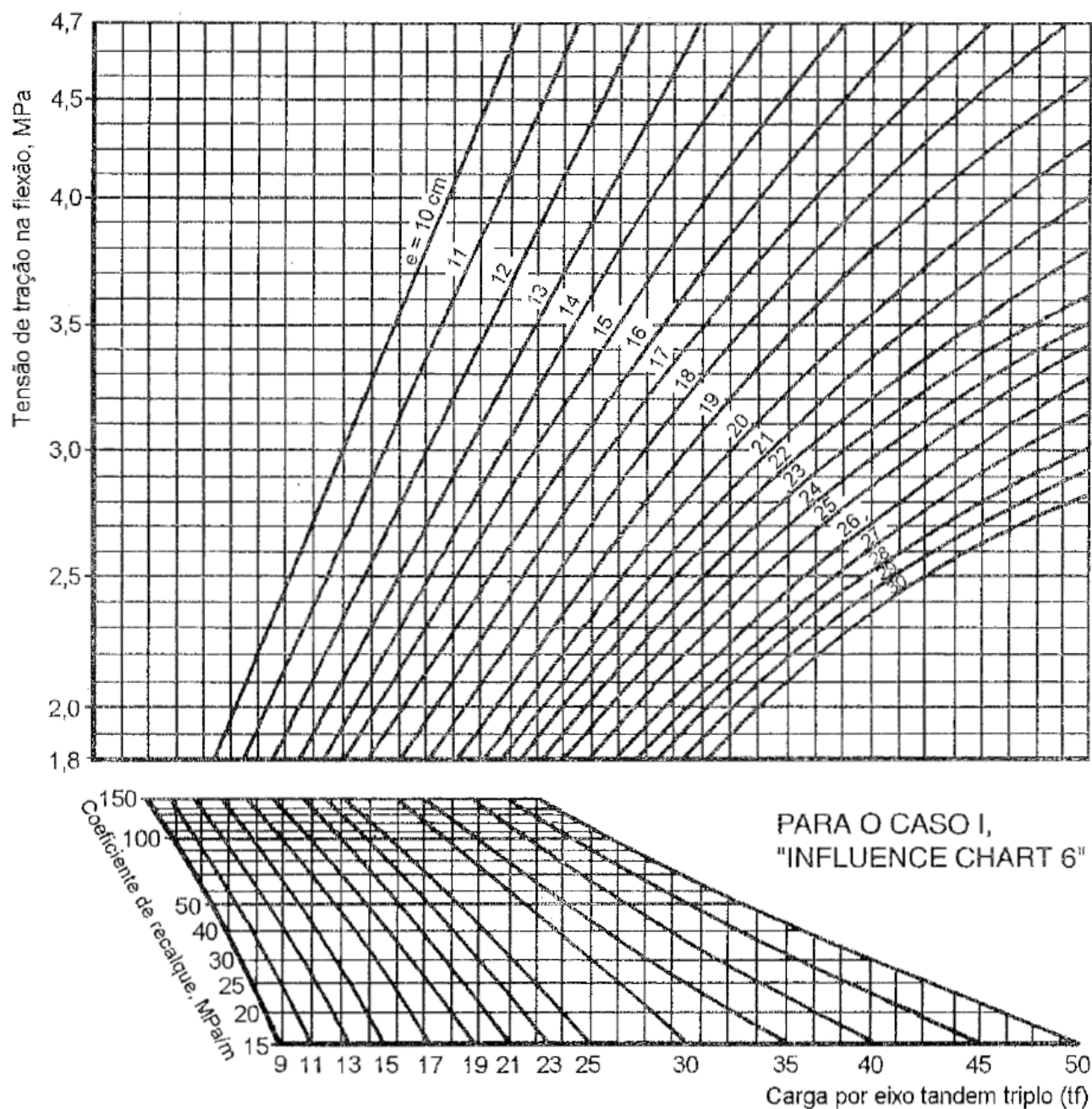


PARA O CASO I, "INFLUENCE CHART 6"

Fonte: Adaptado de Pitta (1998)

Como nas cartas originais não se dispõe de ábaco para a situação de eixos tandem triplos, que é de significativa frequência em nossas rodovias, Pitta (1998) desenvolveu um ábaco proposto para essa situação, com mesma aplicação e utilização dos anteriores (fig. 2.13).

Figura 2.12 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos de concreto para eixos tandem triplos



Fonte: Adaptado de Pitta (1998)

Por fim, Pitta (1998) ressalta que os ábacos mostrados se aplicam a veículos de linha, com dimensões e características geométricas de seus eixos padronizados, não considerando veículos nem carregamentos especiais, como empilhadeiras, cargas de empilhamento, montantes de prateleiras etc.

2.4. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO *PORTLAND CEMENT ASSOCIATION 1984 (PCA/84)*

O método de dimensionamento para pavimentos de concreto no Brasil é regido e baseado no método da *Portland Cement Association* (PCA) de 1984, configurando o ET-97 “Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84”, publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em 1996 (BALBO, 2010). Segundo Packard e Tayabji (1985), esse método é uma revisão de sua versão anterior, publicada em 1966, considerando novas práticas de construção e uma avaliação de desempenho (apud RUFINO, 1997). Oliveira (2000) afirma que, enquanto no método de 1966 a teoria adotada para a determinação das tensões era a Teoria de Westergaard (item 2.3.1), na revisão de 1984 as análises estruturais da placa são realizadas através do método dos elementos finitos, pelo software J-Slab, que levava em conta as seguintes situações:

- grau de transferência de cargas nas juntas transversais, por meio de barras de transferência;
- os efeitos da existência ou não de acostamento de concreto;
- contribuição estrutural das sub-bases de solo melhorado ou de concreto pobre;
- ação de eixos tandem triplos.

Além dessas alterações, houve o acréscimo da ruptura da placa de concreto devida à erosão e escalonamento, além do critério de fadiga do método PCA/66.

No tocante aos critérios para determinação do coeficiente de segurança das ações do método de 1966, nenhuma alteração foi feita, havendo fator de segurança devido à imprecisão da estimativa do número de repetições das solicitações, em função da finalidade e do tipo de tráfego (OLIVEIRA, 2000).

Ainda segundo Balbo (2003), a modelagem de tensões para as cargas críticas de borda longitudinal foi realizada tendo em vista as considerações anteriores, obtendo-se assim em forma de tabela os valores de tensões para vários tipos de carga.

Igualmente ao método de 1966, o valor de suporte da fundação continua sendo o coeficiente de recalque k (item 2.2.2), e a resistência do concreto sendo os valores medidos aos 28 dias, uma vez que o método considera o aumento da resistência do concreto ao longo do tempo (OLIVEIRA, 2000).

2.4.1. Critério de fadiga

A teoria por detrás do método do dimensionamento da placa de concreto no PCA/66 é baseada exclusivamente no critério de fadiga, utilizando um parâmetro denominado consumo de resistência à fadiga, que corresponde à relação entre o número de repetições previstas e o número de repetições admissíveis de uma dada carga. Utiliza-se para representar essa relação uma curva de fadiga, que relaciona as tensões da placa, a saber a tensão de tração na flexão produzida por uma carga na e a resistência à tração do concreto utilizado na construção da placa. A análise da fadiga em pavimentos de concreto é bastante importante pois, mesmo em tensões abaixo da resistência característica do concreto, há a possibilidade de ruína da placa, havendo de se determinar o número de repetições de carga acima do qual o concreto pode romper devido a fadiga (RUFINO, 1997).

Rufino (1997) acrescenta ainda que o consumo de resistência à fadiga total para uma espessura-tentativa de um projeto é dado pela soma dos consumos de resistência à fadiga individuais de todas as cargas atuantes para cada tipo de eixo, admitindo um resultado igual de consumo total de até 125% para o método original, e 100% adotado no Manual do DNER de 1989.

Sendo assim, Balbo (2010) acrescenta que o critério de ruptura do pavimento por fadiga do concreto em flexão proposto em 1984 pela PCA e por Packard e Tayabji, é similar ao proposto em 1966, contando apenas com uma alteração no número N de repetições admissíveis de cargas de 5×10^5 para 10^7 que, segundo Rufino (1997) é gerado pela alteração da localização da tensão crítica, que passou a ser aquela produzida pela passagem da carga tangente à borda longitudinal e não à junta transversal como no método de 1966; além de outros dois modelos de ruína citados por Oliveira (2000), quais sejam por erosão e escalonamento.

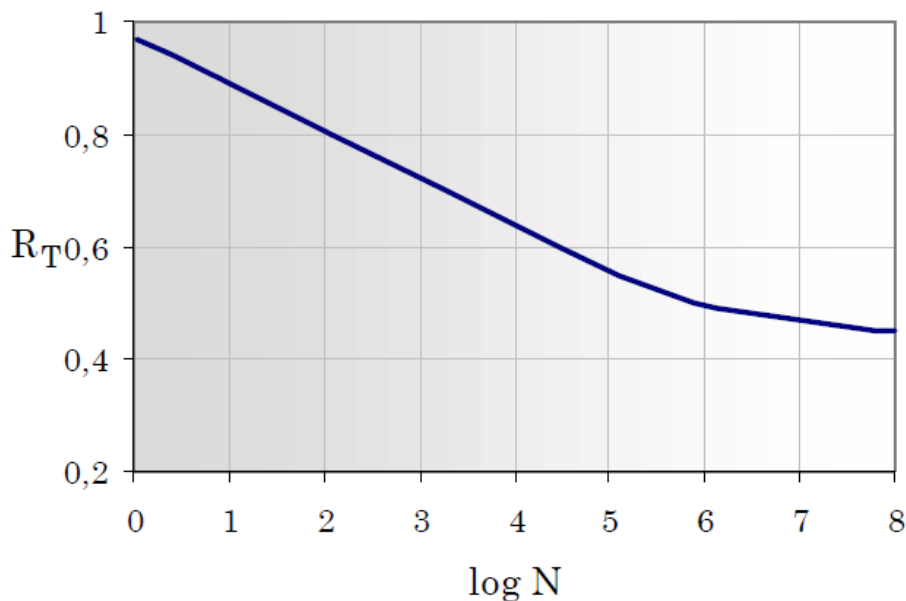
Cabe frisar também que, essa alteração no número de ciclo de repetições de cargas determinou um limite de fadiga, sendo esse modelo pioneiro e único entre os modelos existentes na literatura a considerar tal limite (BALBO, 2010). Esse número permissível de repetições para uma dada carga no eixo foi determinado baseado na relação entre tensões. Modelos de fadiga para relações entre tensões superiores a 0,55 e para valores variando entre 0,45 e 0,55 são obtidos através das equações a seguir, respectivamente:

$$\log N = 11,78 - 12,11 \left(\frac{\sigma}{f_{ct,f}} \right) \quad (2.7)$$

$$N = \left(\frac{4,2577}{\frac{\sigma}{f_{ct,f}} - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (2.8)$$

O limite de fadiga proposto é baseado na situação em que para relação entre tensões inferiores a 0,45, o número de repetições de ciclos seria ilimitado, qualquer que fosse a carga geradora daquela tensão (BALBO, 2010), sendo o PCA/1984 mais severo que seu predecessor. Esse modelo, igualmente no método PCA/1966, utiliza do conceito de dano acumulado, segundo a regra de Miner, sendo o consumo total máximo da resistência à fadiga igual a 100%, e é representado graficamente como na figura a seguir.

Figura 2.13 – Consumo de fadiga por dano acumulado



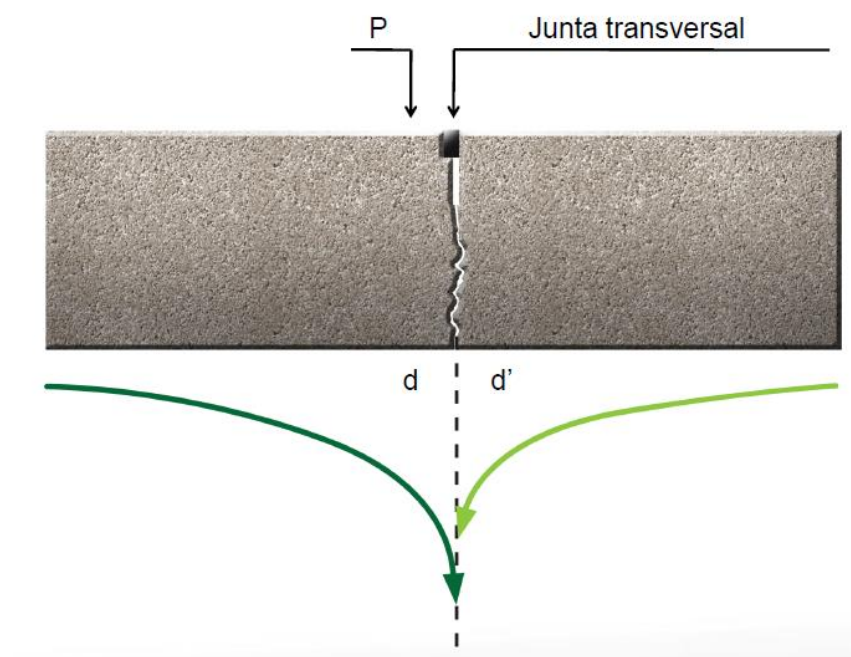
Fonte: Oliveira (2000)

2.4.2. Critério de erosão e escalonamento

Além da ruína por fadiga com as devidas alterações acrescentadas em relação ao PCA/66, também foi proposto em relação ao método anterior a ruína por erosão e

escalonamento. Erosão é a perda de material do topo da camada imediatamente sob a placa de concreto, que ocorre devido à ação combinada da água e da passagem de forças elevadas (OLIVEIRA, 2000). Essa formação de vazio gerado pela erosão acarreta o fenômeno de bombeamento na região inferior à placa, havendo o escalonamento das juntas transversais ou trincas que porventura existam, rompendo devido à deflexão gerada por esse fenômeno (RUFINO, 1997), como ilustra a figura a seguir.

Figura 2.14 – Deflexão causada pela erosão da região imediatamente inferior à placa



Fonte: ABCP (2016)

Rufino (1997) acrescenta que, de forma análoga, a análise de erosão também se utiliza do conceito de dano acumulado, que é dado pela equação a seguir:

$$D_{total} = \sum_i C_2 \frac{N_{sol,i}}{N_{adm,i}} \quad (2.9)$$

Onde:

D_{total} - danos causados pela erosão, que devem ser menores que 1;

m - número total de grupos de carga;

$N_{sol,i}$ - número previsto de repetições de carga para o i-ésimo grupo de carga;

$N_{adm,i}$ - número admissível de repetições de carga para o i-ésimo grupo de carga;

C_2 - 0,06 para pavimentos sem acostamento de concreto e 0,94 para pavimentos em acostamento de concreto a deflexão no canto é pouco sensível à localização do veículo e assim altos valores de C_2 são usados.

O número N que representa o número de repetições admissíveis, segundo o critério de erosão é dado pela expressão 2.10, que está em função de um coeficiente C_1 e uma variável denominada Fator de Erosão, representada pela letra P. Oliveira (2000) comenta que o parâmetro de erosão é chamado de potência, taxa de trabalho ou fator de erosão e é representado pela letra P, medindo o poder que certa força tem de produzir deformação vertical na placa. Através de fatores obtidos por correlações em pistas experimentais, obteve-se a expressão do fator P como se vê na equação 2.11.

$$\log N = 14,524 - 6,777 \cdot (C_1 \cdot P - 9,0)^{0,013} \quad (2.10)$$

Onde:

N – número admissível de passagens da força;

P – fator de erosão;

C_1 – constante de ajustamento relacionada ao tipo de sub-base, igual a 1,0 se granular e 0,9 se tratada com cimento.

$$P = \frac{268,7 \cdot p^2}{h \cdot k^{0,73}} \quad (2.11)$$

Onde:

P – fator de erosão;

p – pressão vertical exercida na fundação sob o canto da placa em psi;

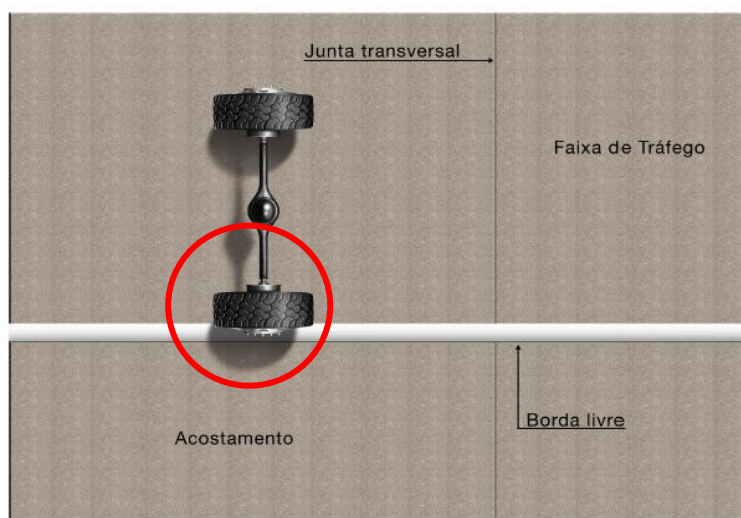
h – espessura da placa em polegadas;

k – coeficiente de recalque, em libras por polegada cúbica.

Oliveira (2000) endossa que a adoção da análise de ruptura devido à erosão se faz imprescindível, vez que o tráfego rodoviário em geral é composto em sua maioria por veículos de eixos tandem, que são os maiores responsáveis pelo dano por erosão. Ademais, a autora acrescenta que esse dano está intimamente ligado às condições climáticas regionais e à eficiência da drenagem, fatores que não são considerados no método. Sendo assim, o critério se torna uma referência ou diretriz básica, sendo mutável mediante os dados locais, como puvliosidade, tipo e eficácia da drenagem.

Oliveira (2000) conclui que a posição crítica na análise da erosão e do escalonamento é o canto da placa (figura 2.16), de forma que a existência de bons dispositivos de transferência de carga entre as placas possibilita redução da espessura final, pela menor tensão na região tangente à junta transversal e à borda longitudinal.

Figura 2.15 – Posição crítica da carga no critério de ruptura à erosão



Fonte: Adaptado de ABCP (2016)

2.4.3. Metodologia do cálculo

Rufino (1997) define os passos necessários para se obter o dimensionamento do pavimento utilizando uma tabela definida pela ABCP (tabela 2.5), quais sejam:

1. Definição dos parâmetros do dimensionamento:

- a. Adoção ou não de acostamento;
 - b. Sistema de transferência de carga;
 - c. Resistência característica à tração na flexão do concreto aos 28 dias;
 - d. Coeficiente de recalque da fundação (k);
 - e. Fator de segurança (FSC);
 - f. Número de repetições previstas para cada tipo de carga atuante, segundo cada tipo de eixo, ao longo do período analisado, mediante um levantamento de tráfego;
2. Adoção de uma espessura-tentativa e preenchimento do formulário padrão visto na tabela 2.5 com os dados obtidos no item número 1 acima.
3. Com o preenchimento dos dados na tabela, determinam-se as tensões equivalentes para cada tipo de eixo, através dos quadros para o cálculo da tensão equivalente, e divide-se essas tensões equivalentes pela resistência à tração na flexão do concreto, resultando na relação de tensões para cada tipo de eixo. Com isso, obtém-se o número admissível de repetição da carga devido à fadiga para cada nível de carga atuante em cada tipo de eixo.
4. Determinam-se os fatores de erosão para cada tipo de eixo, utilizando-se os quadros para o cálculo do fator de erosão constantes na tabela 2.5, e posteriormente obtém-se o número admissível de repetição da carga devido à erosão para cada nível de carga atuante com seu fator de segurança em cada tipo de eixo, através das respectivas colunas, considerando a existência de acostamento ou não.
5. Divide-se o número de repetições previstas pelo número de repetições admissíveis encontrados para todos os níveis de carga na ruptura à fadiga e à erosão, obtendo os respectivos consumos de resistência à fadiga individuais e os danos individuais causados pela erosão.
6. Obtém-se os danos totais em função da fadiga e da erosão através do somatório dos valores das respectivas colunas.
7. Caso o somatório das resistências à fadiga individual ou o somatório dos danos individuais causados pela erosão não ultrapassar 100%, a espessura adotada inicialmente pode ser executada, caso contrário, aumenta-se a espessura adotada e refaz-se os cálculos para se obter um consumo total menor que 100%. Em caso de valores de consumo próximos de zero ou pequenos, diminui-se a espessura adotada para

se chegar a valores próximos de 100%, mesmo satisfazendo as condições desejadas, pois está superdimensionada.

Tabela 2.5 – Formulário padrão do dimensionamento pelo método da PCA/84

Projeto:	Nome do projeto		
Espessura tentativa:	Valor da espessura tentativa (cm)		
k:	Valor de k no todo da fundação (MPa/m)		
Fsc:	Coeficiente de segurança adotado para o projeto		
Mr:	Valor do módulo de resistência da concreto (MPa)		
Juntas com barras de transferência	sim	_____	não _____
Acostamento de concreto	sim	_____	não _____
Período de Projeto	Período de projeto para o qual foi estimado o N_{sol}		

Peso por eixo (tf)	Peso por eixo . Fsc (tf)	N_{sol}	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			N_{adm}	Consumo de fadiga (%)	N_{adm}	Dano por erosão (%)
(1)	(2) = (1) . Fsc	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) = (6) / (5)

Eixos simples

8- Tensão equivalente: _____

9- Fator de fadiga: _____

10- Fator de erosão: _____

--	--	--	--	--	--	--

Eixos tandem duplos

11- Tensão equivalente: _____

12- Fator de fadiga: _____

13- Fator de erosão: _____

--	--	--	--	--	--	--

Eixos tandem triplos

14- Tensão equivalente: _____

15- Fator de fadiga: _____

16- Fator de erosão: _____

--	--	--	--	--	--	--

C_{total} :		D_{total} :	
---------------	--	---------------	--

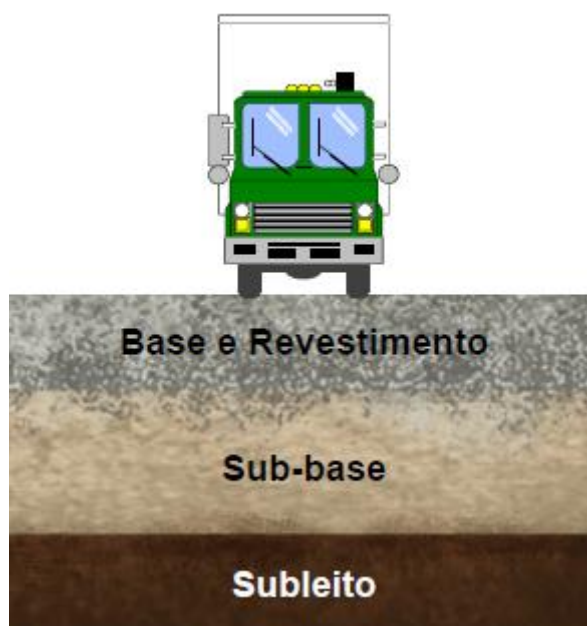
Fonte: Adaptado de Oliveira (2000)

2.5. PAVIMENTOS DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Em geral, classifica-se os pavimentos rodoviários em rígidos, semirrígidos e flexíveis. Atualmente, têm-se evitado utilizar dessas nomenclaturas, dividindo apenas em pavimentos de concreto de cimento Portland e pavimentos asfálticos

(BERNUCCI *et al.*, 2006). O pavimento de concreto é constituído pela placa de concreto na superfície, que atua como base e revestimento, seguida de uma sub-base, assentados sob uma fundação, o subleito (fig. 2.17).

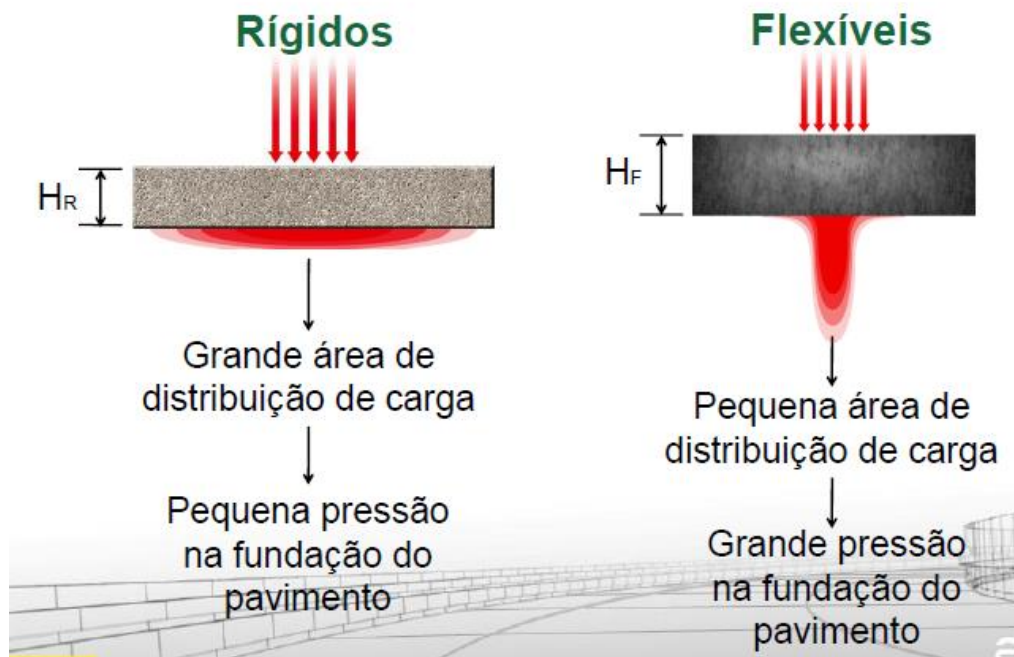
Figura 2.16 – Camadas do pavimento de concreto



Fonte: Adaptado de ABCP (2016)

De acordo com o DNIT (2006), o pavimento de concreto é aquele cujo revestimento tem uma elevada rigidez em relação as camadas subjacentes, absorvendo praticamente todo o carregamento solicitado, resultando em pouca pressão no subleito, sendo essa característica uma das diferenças entre os dois tipos de pavimentos, uma vez que no de asfalto, a distribuição de tensões se dá de forma mais proporcional entre as camadas, chegando grande pressão na camada de fundação, como se vê na ilustração abaixo. Ainda segundo Bernucci *et al.* (2006), define-se pavimento de concreto aquele que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, com espessura fixada em função da resistência a flexão das placas e das camadas subjacentes.

Figura 2.17 – Distribuição de tensões nos dois tipos de pavimento



Fonte: ABCP (2016)

Oliveira (2000) define os tipos de pavimentos rígidos sendo os construídos com concreto simples, armado, protendido, com adição de fibras, com concreto rolado ou com concreto de alta resistência. Quanto sua fundação, podem ser apoiados sobre o solo, sub-base, ou sobre pavimentos antigos, seja de concreto ou asfalto.

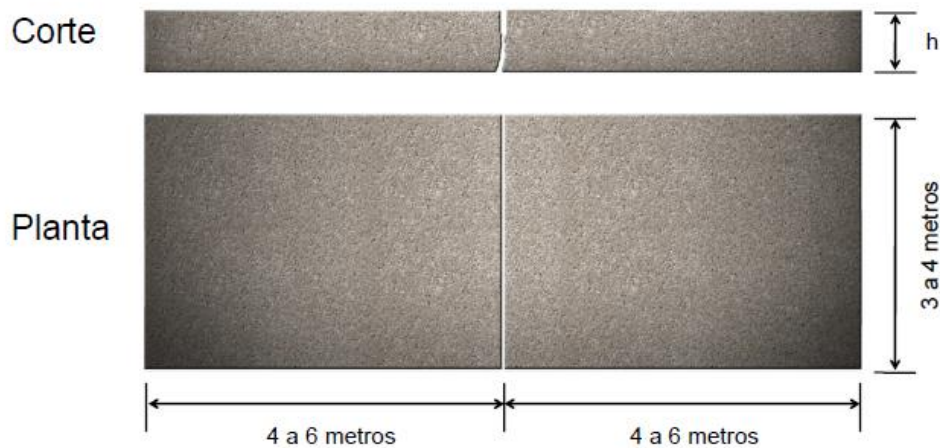
Segundo a ABCP (2016), os pavimentos de concreto possuem vantagens como ser um tipo de pavimento tradicional no Brasil; não promover aquaplanagem; possuir melhor visibilidade por reflexão, acarretando em economia de energia; grande durabilidade com pouca manutenção; não sofrer deformação plástica, buracos e trilhas de rodas; possuir menor distância de frenagem; economia de combustíveis; ter menor absorção de calor; conforto de rolamento; custo de construção competitivo e vantagens ambientais do concreto frente ao pavimento asfáltico.

De acordo com a Associação Brasileira de Pavimentação (2010, apud Almeida, 2015), o pavimento rígido é ideal para vias que apresentam como características tráfego intenso, pesado e repetitivo, características essas a qual a tipologia da pista de rolamento em estudo contempla. Sendo esse tipo de pavimento utilizado no projeto em execução, este tópico traz uma visão geral e noções acerca dos pavimentos de concreto de cimento Portland, ou simplesmente pavimentos de concreto, dando enfoque ao construído por concreto simples com barras de transferência, que é o caso do estudo.

2.5.1. Pavimentos de concreto simples

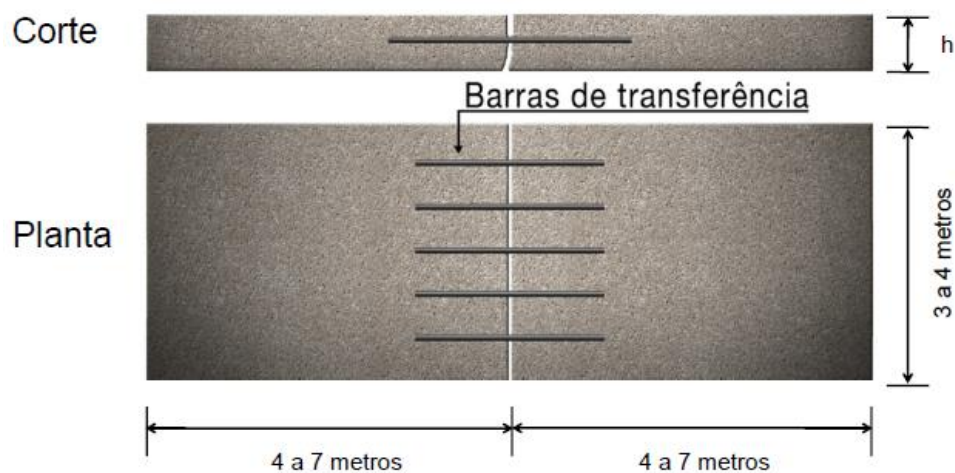
O pavimento de concreto simples, de acordo com Oliveira (2000), é constituído de placas de concreto de cimento Portland apoiados sobre a fundação, nos quais os esforços, tanto de compressão quanto de tração, são resistidos apenas pelo concreto. Dentro desse grupo estão dois tipos de pavimentos, quais sejam os sem barras de transferência e com barras de transferência, como ilustrado a seguir. Oliveira (2000) acrescenta que o controle da fissuração devida à retração, empenamento e dilatação térmica é realizado por meio da separação das placas através de juntas moldadas ou serradas.

Figura 2.18 – Pavimento de concreto simples sem barra de transferência



Fonte: ABCP (2016)

Figura 2.19 – Pavimento de concreto simples com barra de transferência



Fonte: ABCP (2016)

Senço (1997), citado por Silva e Carneiro (2014), comenta que o primeiro pavimento em concreto realizado foi na Inglaterra, no ano de 1865, seguido pelos Estados Unidos, em 1891. Já no Brasil, o primeiro pavimento de concreto foi executado no Caminho do Mar, que liga as cidades de São Paulo a Cubatão, somente em 1925. Posteriormente, em 1932, pavimentou-se em concreto a travessia de São Miguel Paulista, trecho pertencente à antiga estrada Rio-São Paulo. Internacionalmente, o Brasil se encontra muito aquém quanto a utilização de pavimentos de concreto, em comparação a países como a Alemanha e Estados Unidos, vez que essas nações possuem em média 80% de toda malha rodoviária em concreto. Oliveira (2000) comenta que no Brasil, os pavimentos rígidos com barras de transferência são utilizados com maior frequência, sendo os sem barra de transferência utilizados em vias com tráfego de pequeno volume e com cargas de pequena intensidade. Pode-se citar como casos de sucesso, a pista de rolamento da Rodovia dos Imigrantes (figura 2.21), ligando São Paulo à Baixada Santista, inaugurada em 1976 onde, dos seus 32 quilômetros de extensão, apenas 35 metros necessitaram-se de intervenções devido a problemas de drenagem (ABCP, 1998 apud OLIVEIRA, 2000).

Figura 2.20 – Rodovia Imigrantes, São Paulo



Fonte: Ecovias (2019)

As barras de aço que constituem esse tipo de pavimento de concreto, que podem ser empregados para a transferência de esforços entre as placas, não conferem função estrutural a placa, sendo assim chamado de concreto simples e

não armado. Em alguns casos, quando exigido em projeto, um pavimento de concreto simples pode ainda apresentar armadura em poucas placas isoladas para o combate à fissuração por retração devido à geometria irregular da placa (OLIVEIRA, 2000).

Quanto as dimensões, quando sem barras de transferência, o pavimento varia entre 15 e 20 cm de espessura, com dimensões da placa de 4 a 6 metros de comprimento e 3 a 4 metros de largura. É recomendável neste caso a execução de sub-base tratada com cimento ou concreto rolado, para minimizar os efeitos de erosão na região de encontro entre placas. Quanto ao concreto com barras de transferência, utiliza-se espessura de placa entre 16 e 45 cm de espessura e dimensões podendo chegar a 7 metros.

Por se encontrar com grande área exposta ao ar, Oliveira (2000) acrescenta que as placas de concreto estão sujeitas a grandes variações de umidade e temperatura. Vez que somente o concreto atua nas solicitações aplicadas, deve-se obter um concreto que venha a sofrer o mínimo de retração possível, conciliando isso a uma resistência suficiente para vencer as solicitações de projeto. Sendo assim, o concreto tem de obter elevada resistência de tração na flexão, combatendo o momento fletor, o que conseqüentemente resulta no aumento do consumo de cimento. Além de aumentar o custo, o aumento do consumo de cimento torna o concreto mais retrátil. Sendo assim, há de se equilibrar a quantidade de cimento afim de obter resistência adequada e amenizar a retração da placa, através da utilização de um baixo fator água/cimento. Oliveira (2000) conclui afirmando que as condições de concretagem exigem em geral um concreto duro e de consistência seca, mas também com certa trabalhabilidade, garantindo a homogeneidade, densidade e impermeabilidade adequadas.

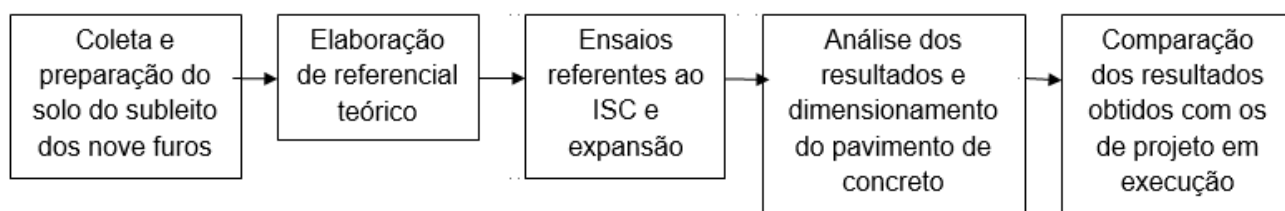
3. METODOLOGIA

Neste capítulo, está compreendida a sequência metodológica que foi executada para cumprir os objetivos propostos. Sendo assim, aplicando o referencial que contempla o capítulo 2 deste trabalho, analisou-se as características geotécnicas do material do subleito da pista de rolamento, a fim de obter sua característica de suporte necessária para dimensionar as espessuras. As informações referentes à coleta e caracterização do material foram retiradas do trabalho de Machado *et al.* (2018), que coletaram o material in-loco e realizaram os respectivos ensaios.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), para se dimensionar de forma adequada uma estrutura de pavimento, há de se ter conhecimento suficiente das propriedades dos materiais que a compõem, como resistência, permeabilidade e deformabilidade, diante da repetição de carga e efeitos climáticos sob a estrutura. Nesse sentido, o enfoque geotécnico do trabalho consiste na resistência do pavimento, visto que se busca ao final seu dimensionamento. Assim, o ensaio que se relaciona à essa característica se tratando do solo de fundação é o ISC, cujo procedimento experimental foi realizado e está mostrado e detalhado neste capítulo.

Primeiramente, está a obtenção de referencial teórico para a fundamentação do trabalho. Realizou-se busca em livros, pesquisas, trabalhos e artigos acadêmicos acerca do sistema de BRT, bem como a mecânica dos solos utilizada na pavimentação e as teorias que fundamentam o método de dimensionamento de pavimentos de concreto utilizado. Posteriormente, realizou-se os ensaios das amostras coletadas referentes ao ISC, obtendo o respectivo valor de coeficiente de recalque da camada do subleito para assim dimensionar a estrutura da pista de rolamento através do método de dimensionamento da PCA/84.

Figura 3.1 – Fluxograma da sequência metodológica do trabalho

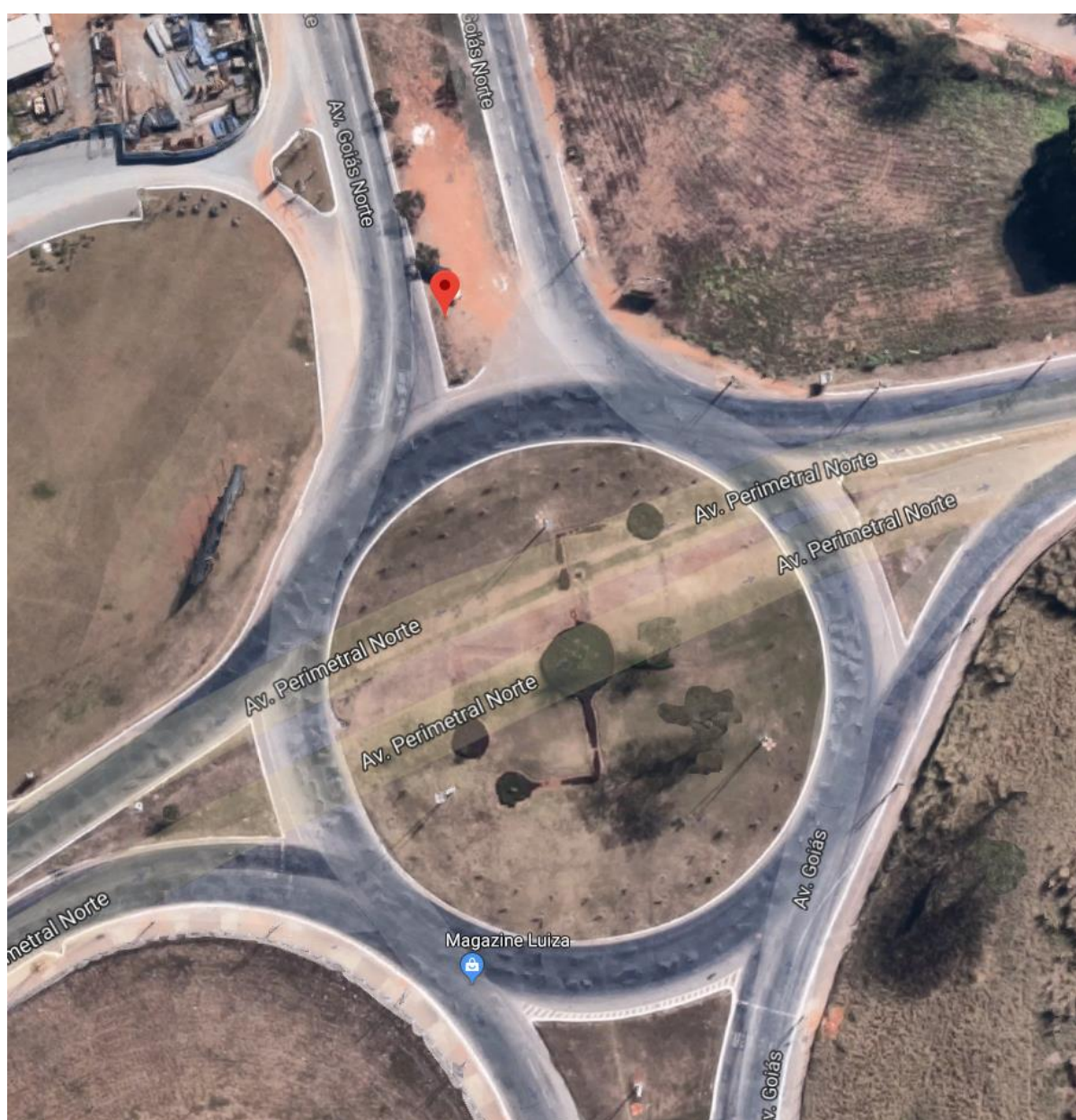


Fonte: Autoria própria (2019)

3.1. COLETA DAS AMOSTRAS

Como já mencionado, a etapa de coleta e caracterização completa do solo em estudo foi realizada por Machado *et al.* (2018). Segundo os autores, foi coletado o solo proveniente do subleito da pista de rolamento do BRT Norte-Sul de Goiânia, no trecho do cruzamento das avenidas Goiás-Norte e Perimetral-Norte, mais precisamente na coordenada 16°37'44.4"S 49°16'22.8"W (figuras 3.2 e 3.3).

Figura 3.2 – Local do primeiro ponto coletado



Fonte: Google Maps (2019)

Figura 3.3 – Local do primeiro ponto coletado



Fonte: Google Maps (2019)

O ponto inicial analisado está localizado lateralmente ao pavimento de concreto já implantado, no canteiro central esquerdo (Machado *et al.* 2018). A partir deste, através das recomendações da IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias) 739, foram feitos furos a cada 200 m. Uma vez que o trecho estudado possui 1,6 km de extensão, fez-se nove furos para coleta. Em cada ponto de sondagem coletou-se cerca de 90 kg de material, à profundidade de 50 cm, desprezando-se a camada superficial, que possui geralmente matéria orgânica ou alterações. Ensacaram-se as amostras e estas foram levadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Câmpus Goiânia (Machado *et al.*, 2018). Por fim, preparou-se as amostras, secando-as ao ar, sendo quarteadas e acondicionadas em sacos plásticos até o momento de serem utilizadas.

Figura 3.4 – Coleta do material: (a) local do primeiro ponto de coleta, (b) amostras ensacadas e identificadas



Fonte: Machado *et al.* (2018)

3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Após feito os ensaios de caracterização e compactação por Machado, Menezes e Vale (2018), com o restante das amostras, fez-se os procedimentos para a execução dos ensaios de Compactação Proctor na umidade ótima da curva de compactação e na energia normal e os referentes ao Índice de Suporte Califórnia (ISC). Os ensaios foram realizados norteados por suas respectivas normas ABNT NBR, conforme mostrado a seguir. Ademais, a preparação das amostras para o ensaio de compactação, como a determinação do teor de umidade, foi realizada com base na ABNT NBR 6457 (2016).

Tabela 3.1 – Normas referentes aos ensaios realizados

Ensaio	Método
Solo – Ensaio de compactação	ABNT NBR 7182 (2016)
Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio	ABNT NBR 9895 (2016 – VERSÃO CORRIGIDA 2017)

Fonte: Autoria própria (2019)

3.2.1. Moldagem dos corpos-de-prova/Compactação Proctor

Realizou-se o ensaio de compactação Proctor na energia intermediária e umidade ótima, umidade essa previamente obtida por Machado, Menezes e Vale (2018), para cada um dos nove furos.

Primeiramente, para cada furo, separou-se 7.000 g de amostra. Por proporção, calculou-se a quantidade de parte fina (x_f) e grossa (x_g) para a quantidade de solo supracitado, a partir da granulometria por peneiramento obtida por Machado, Menezes e Vale (2018). Considerou-se “fino” o material passante na peneira Nº 4 e “grosso” o retido. Feito os cálculos, separou-se material fino e grosso em sacos plásticos diferentes, e reservou-os até que prosseguissem os ensaios. A seguir, mostra-se o procedimento realizado utilizando como exemplo o furo 01, procedendo de forma análoga o cálculo para todos os outros oito furos restantes, obtendo como resultado os dados contidos na tabela 3.3.

Tabela 3.2 – Granulometria do furo 01, com a porcentagem de material passante e retido na peneira Nº4 em destaque

Peneiramento Fração Grossa (Entre 60,00 e 2,00 mm)						
Peneira (Série ABNT)	Abertura mm	Material Retido			Material que Passa (g)	% Passa Amostra Total ⑧
		Massa (g)	% do total ⑦	% Acumulado		
3"	76	0	0.00	0.00	967.75	100.00
2"	50	0	0.00	0.00	967.75	100.00
1.1/2"	38	0	0.00	0.00	967.75	100.00
1"	25	0	0.00	0.00	967.75	100.00
3/4"	19	0	0.00	0.00	967.75	100.00
3/8"	9.5	2.83	0.29	0.29	964.92	99.71
Nº 4	4.8	42.41	4.38	4.67	922.51	95.33
Nº 10	2.0	86	8.89	13.56	836.51	86.44

Fonte: Adaptado de MACHADO, MENEZES e VALE (2018)

Figura 3.5 – Cálculo das amostras retidas (a) e passantes (b) na peneira Nº 4 para amostra total de 7.000 g



Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 3.3 –Material passante e retido na peneira N°4 de todos os furos

FURO	XF (g)	XG (g)
1	6678.00	322.00
2	5988.50	1011.50
3	6400.80	599.20
4	7000.00	0.00
5	7000.00	0.00
6	7000.00	0.00
7	7000.00	0.00
8	6332.90	667.10
9	6681.50	318.50

Fonte: Autoria própria (2019)

Também foi determinada a umidade higroscópica de cada uma das nove amostras, como prescreve a NBR 6457:2016, antes da realização do ensaio de compactação.

Figura 3.6 – Determinação da umidade higroscópica



Fonte: Autoria própria (2019)

Para se obter a quantidade de água a acrescentar para se chegar na umidade ótima, seguiu-se os passos a seguir, para cada furo:

- Misturadas e homogeneizadas as partes finas e grossas previamente porcionadas, determina-se através da equação 3.1 a quantidade de solo seco para a capacidade de volume do cilindro.

$$m_s = V \times \rho_{dm\acute{a}x.} \quad (3.1)$$

Onde:

m_s – massa de solo seco, em gramas;

V – volume do solo seco no cilindro, em gramas;

$\rho_{dm\acute{a}x.}$ – densidade seca máxima do solo, em g/cm³.

- Com a quantidade de massa seca, determina-se a quantidade de solo com umidade higroscópica através da equação 3.2.

$$m_{whig} = m_s \times [(1 + (w_{hig}/100))] \quad (3.2)$$

Onde:

m_{whig} – massa de solo na umidade higroscópica, em gramas;

m_s – massa do solo seco, em gramas;

$w_{hig.}$ – teor de umidade higroscópica, em %.

- Posteriormente, pela expressão 3.3, determina-se a quantidade de solo na umidade ótima calculada por Machado, Menezes e Vale (2018).

$$m_{w\acute{o}t} = m_s \times [(1 + (w_{\acute{o}t}/100))] \quad (3.3)$$

Onde:

$m_{w\acute{o}t}$ – massa de solo na umidade ótima, em gramas;

m_s – massa do solo seco, em gramas;

$w_{hót.}$ – teor de umidade ótima, em %.

- Por fim, subtraindo o resultado da equação 3.3 pela 3.2, resulta na quantidade de água para acrescentar a fim de se obter o material a se utilizar no ensaio.

$$h = m_{wót} - m_s \quad (3.4)$$

Onde:

h – água a acrescentar para se chegar na umidade ótima, em gramas;

$m_{wót}$ – massa de solo na umidade ótima, em gramas;

m_s – massa do solo seco, em gramas;

De posse de todas as quantidades em massa e em porcentagem necessárias para se moldar o corpo de prova, realizou-se a umidificação do material para que este atinja a umidade ótima de compactação. Para a realização da umidificação, utilizou-se de uma bandeja circular grande, colher de jardineiro, colher de pedreiro, desempenadeira, espátulas e becker graduado de plástico (figura 3.7).

Primeiramente, separou-se o material de acordo com os resultados das expressões acima, ensacando-os de forma a não perder umidade. Depois, as amostras foram despejadas na bandeja e homogeneizadas com auxílio da colher de pedreiro. Após homogeneizada, acrescentou-se através de um becker plástico a quantidade necessária de água destilada para se obter o solo na umidade ótima ($w_{ót}$). Acrescentada toda a água com movimentos circulares, de dentro para fora, homogeneizou-se o material com o auxílio da desempenadeira e espátula, de forma que todos os grãos da amostra se umidifiquem por igual. Terminado o processo, ensacou-se todo o material contido na bandeja em sacos plásticos devidamente identificados (figura 3.9) e reservou-os por no mínimo 24h, a fim de umedecer todas as partículas do solo por igual. Todo processo está resumido na figura 3.8 a seguir.

Figura 3.7 – Materiais utilizados para umidificação das amostras



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 3.8 – Umidificação da amostra na umidade ótima (w_{ot})



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 3.9 – Amostras na umidade ótima ensacadas



Fonte: Autoria própria (2019)

Com as amostras preparadas, procedeu-se para a realização do ensaio de Compactação Proctor. Utilizou-se o cilindro grande e a energia normal, que compreende 12 golpes do soquete por camada, totalizando 5 camadas. Além dos materiais utilizados na etapa anterior, fez-se uso do cilindro grande, bem como seu colarinho, disco espaçador, soquete do tipo grande, filtro de papel, régua biselada e pincel. A sequência do ensaio foi realizada segundo as etapas a seguir:

- a. Montou-se o molde cilíndrico à sua base e acoplar seu colarinho (fig. 3.10a), adicionando no fundo disco espaçador, com filtro de papel cilíndrico sob este (fig 3.10b);

Figura 3.10 – Molde cilíndrico grande montado, disco espaçador, soquete grande e papel filtro



Fonte: Autoria própria (2019)

- b. Espalhou-se e homogeneizou-se o material sob a bandeja;

Figura 3.11 – Amostras na umidade ótima homogeneizadas



Fonte: Autoria própria (2019)

- c. Pesou-se cada camada conforme calculado;

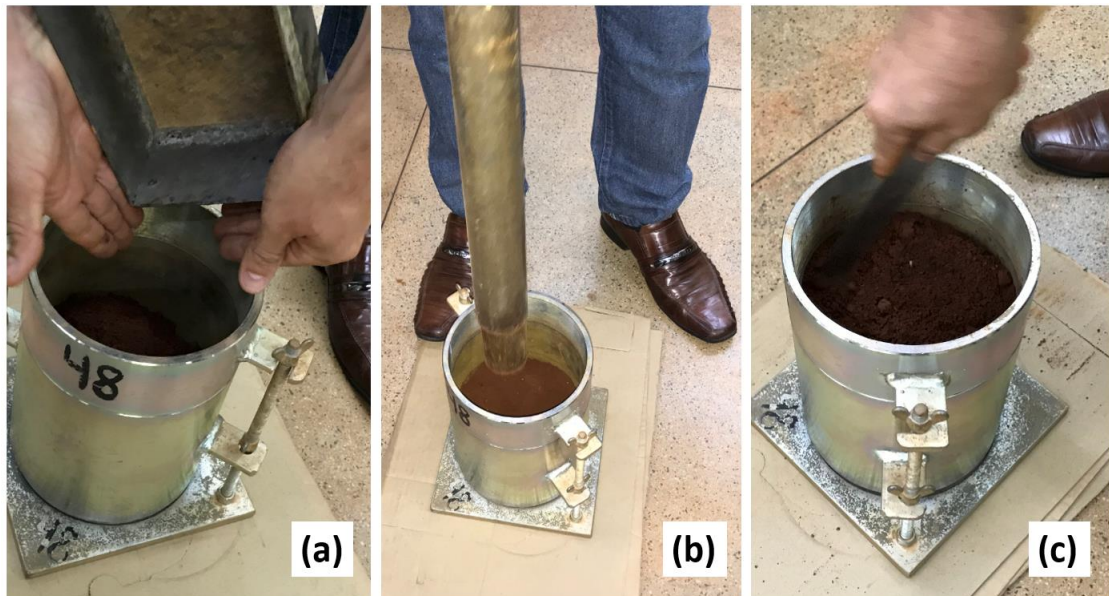
Figura 3.12 – Pesagem das camadas



Fonte: Autoria própria (2019)

- d. Compactou-se cada camada de forma uniforme seguido de ligeira escarificação da camada subjacente;

Figura 3.13 – Colocação do solo no cilindro (a), compactação (b) e escarificação da camada (c)



Fonte: Autoria própria (2019)

- e. A determinação da umidade foi feita a partir de uma porção de amostra da bandeja, retirada após a compactação da segunda camada de acordo com a NBR 6457;

Figura 3.14 – Determinação do teor de umidade



Fonte: Autoria própria (2019)

- f. Após compactada a última camada, foi feita a escarificação do material em contato com a parede do colarinho. Após escarificado, retirou-se o

colarinho do molde, havendo excesso acima do cilindro, tolerável até 10 mm de altura. Esse excesso deve ser removido e rasado com o auxílio de régua biselada.

Figura 3.15 – Escarificação e remoção do colarinho (a) e (b), retirada de material em excesso (c) e limpeza do cilindro (d)



Fonte: Autoria própria (2019)

- i. Por fim, retirou-se o cilindro de sua base, limpando com o auxílio do pincel toda partícula que não esteja contida no corpo de prova, pesando o conjunto corpo-de-prova-cilindro ao final, obtendo assim a massa úmida do solo compactado.

Figura 3.16 – Pesagem do conjunto



Fonte: Autoria própria (2019)

3.2.2. Expansão

Executados os ensaios referentes à compactação das amostras, partiu-se definitivamente para os ensaios tocantes ao suporte do solo. Para o ensaio de expansão, retirou-se o disco espaçador de cada corpo-de-prova, invertendo-os e fixando-os em suas respectivas bases, como mostrado na figura a seguir.

Figura 3.17 – Molde invertido para embebição



Fonte: Autoria própria (2019)

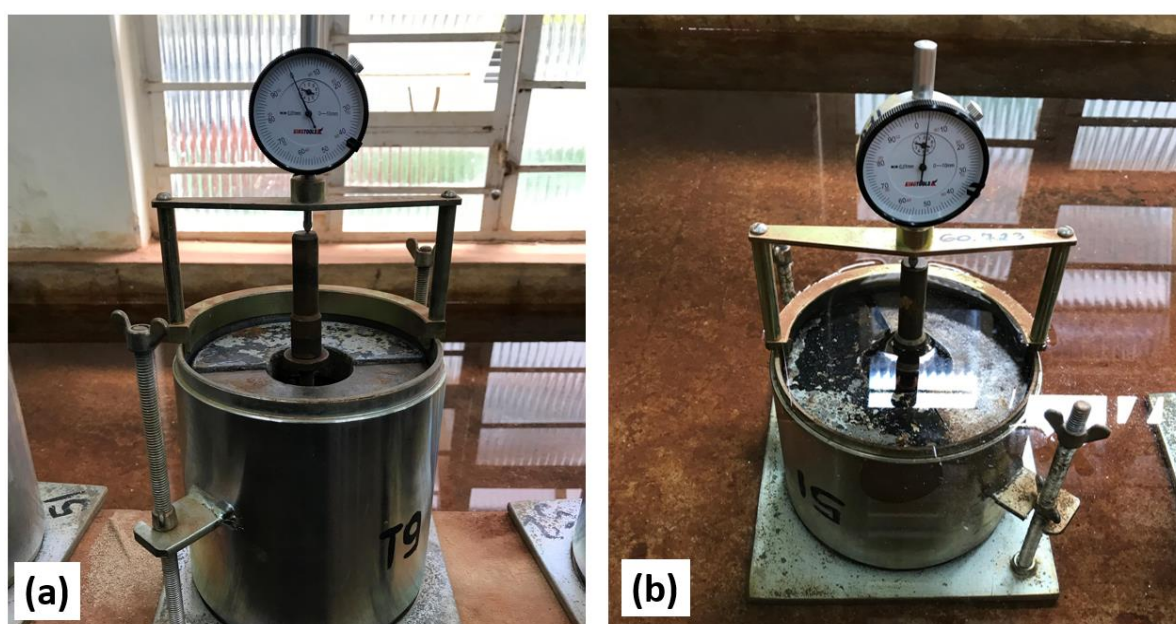
No espaço deixado pelo disco espaçador (fig. 3.18a), colocou-se o prato perfurado com a haste de expansão e sobre ele dois discos anelares (fig. 3.18b). Após isso, colocou-se o porta-extensômetro sobre o molde, colocando sobre ele o extensômetro, com sua haste apoiada na haste de expansão do prato perfurado (fig. 3.18c e 3.19a). Com o conjunto devidamente montado e ajustado, anotou-se a leitura inicial e imergiu-se os cilindros no tanque, ficando em imersão no mínimo durante quatro dias (fig. 3.19b). As leituras do extensômetro foram realizadas de 24 em 24 horas, tendo o ensaio uma duração de quatro dias.

Figura 3.18 – Execução do ensaio de expansão



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 3.19 – Cilindro pronto para submersão (a) e submerso (b)



Fonte: Autoria própria (2019)

As leituras diárias foram realizadas de acordo com o Quadro 1 da NBR 9895, como mostra a figura a seguir:

Figura 3.20 – Quadro 1 da NBR 9895:2016

QUADRO 1

Tempo decorrido (dias)	Data	Hora	Leitura no extensômetro (mm)	Diferença de leitura no extensômetro (mm)
início				
1				
2				
3				
4				
Altura inicial do corpo-de-prova (mm)				

Fonte: ABNT (2016)

Terminado o período de embebição, retirou-se os cilindros deixando a água escoar por aproximadamente 15 minutos, como mostrado na figura 3.21, a fim de estar preparado para o ensaio de penetração.

Figura 3.21 – Cilindro escoando água

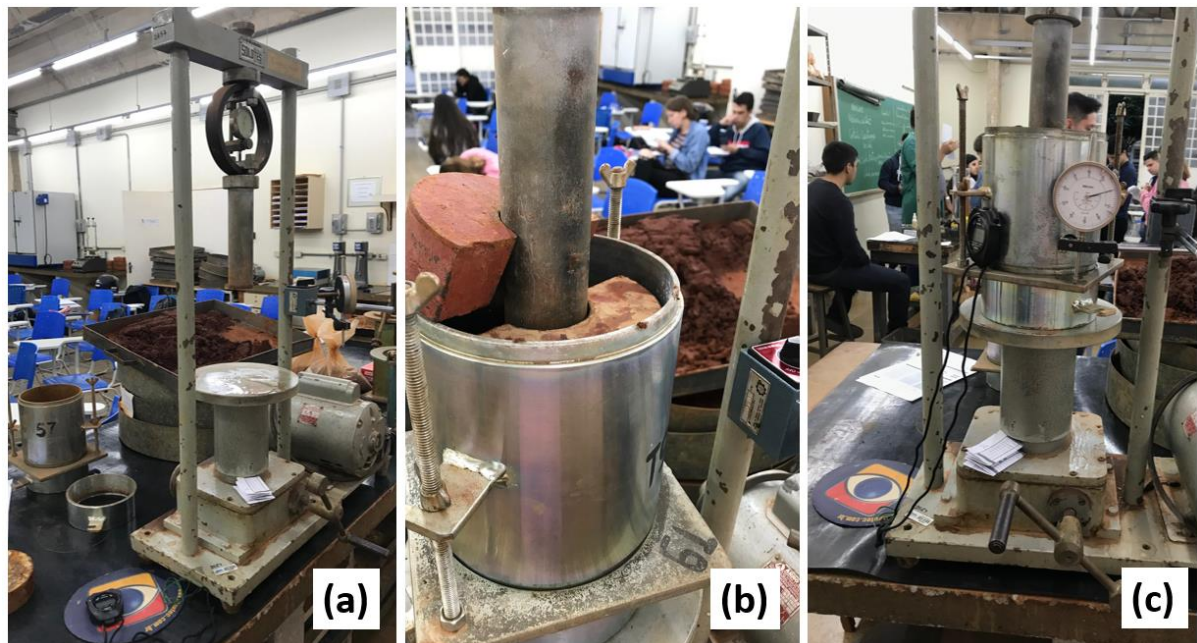


Fonte: Autoria própria (2019)

3.2.3. Penetração

Após retirado o corpo de prova da submersão e deixado escoando por no mínimo 15 minutos, procedeu-se o ensaio de penetração na prensa de ISC (figura 3.22a). Para a execução do rompimento, colocou-se as mesmas sobrecargas que foram utilizadas no ensaio de expansão sobre cada corpo-de-prova, dentro do cilindro (figura 3.22b). Após isso, acomodou-se o molde cilíndrico no prato da prensa apoiado sobre o seu colarinho e ajustou-se os extensômetros do anel dinamométrico e o que mede a penetração do pistão no solo, zerando-os para que possa iniciar o ensaio (figura 3.22c).

Figura 3.22 – Montagem do ensaio de penetração



Fonte: Autoria própria (2019)

Então, concomitantemente inicia-se a contagem do tempo no cronômetro e o acionamento da manivela da prensa, que deve manter uma velocidade de 1,27 mm/min. Cada leitura no anel da prensa deve ser função de uma penetração do pistão no solo e de um tempo especificado, como é mostrado no quadro 2 da NBR 9895:2016. Não foram realizadas as leituras correspondentes ao tempo de 2,5 min, 3,5 min, 7 min e 9 min.

Figura 3.23 – Quadro 2 da NBR 9895:2016

QUADRO 2

Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,5	0,63			
1,0	1,27			
1,5	1,90			
2,0	2,54			
2,5	3,17			
3,0	3,81			
3,5	4,44			
4,0	5,08			
5,0	6,35			
6,0	7,62			
7,0	8,89			
8,0	10,16			
9,0	11,43			
10,0	12,70			

Fonte: ABNT (2016)

Feitas as leituras, terminou-se o ensaio e extraiu-se os corpos-de-prova do molde cilíndrico, com o auxílio de um extrator (figura 3.24)

Figura 3.24 – Extração dos corpos-de-prova



Fonte: Autoria própria (2019)

4. RESULTADOS E DIMENSIONAMENTO DA PISTA DE ROLAMENTO

Neste capítulo, apresenta-se os resultados obtidos dos ensaios realizados através da metodologia apresentada no capítulo 3, os quais serão utilizados para o dimensionamento do pavimento de concreto de cimento Portland do trecho da Avenida Goiás Norte de estudo.

4.1. RESULTADOS

A seguir estão compreendidos os resultados das experimentações laboratoriais realizadas, a saber, os ensaios de Índice de Suporte Califórnia dos nove furos de estudo.

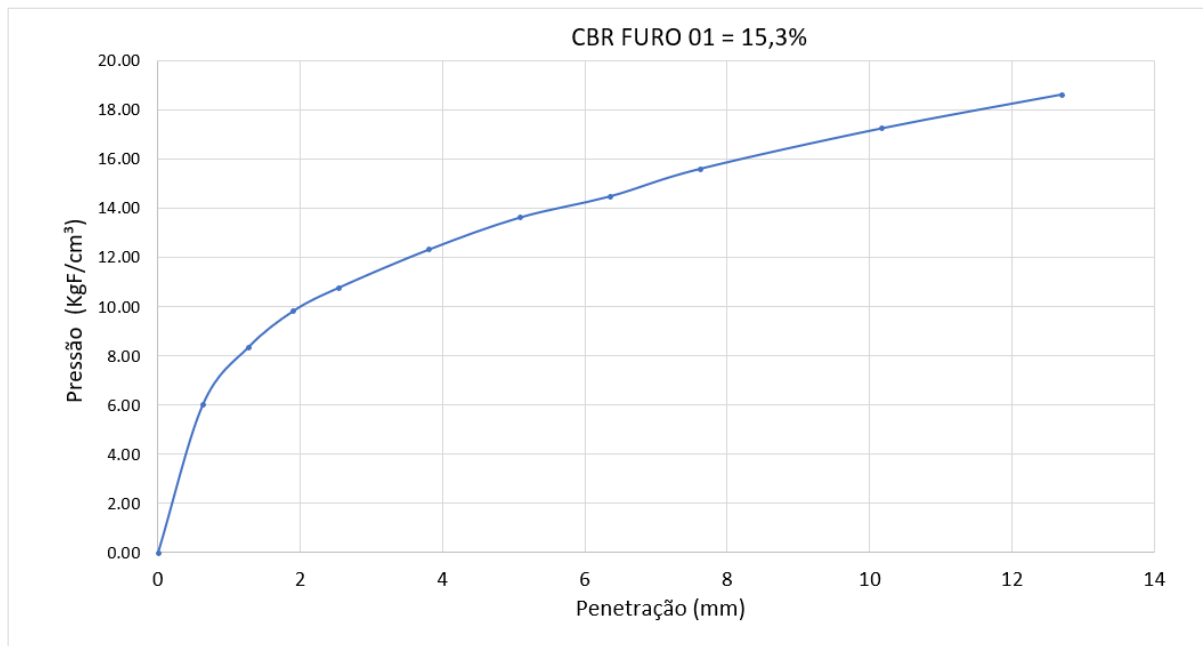
Primeiramente, na compactação, obteve-se o valor do teor de umidade dos corpos-de-prova, os quais foram moldados no teor de umidade ótima obtido por Machado, Menezes e Vale (2018). Posteriormente, após a moldagem dos corpos-de-prova, realizou-se a imersão e os seguintes valores de expansão foram obtidos durante as 96 horas imersos. Por fim, através da prensa mecânica, realizou o ensaio de penetração, obtendo os seguintes valores de CBR, seguidos de sua curva característica:

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de CBR

FURO	UMIDADE CBR (%)	Δh (mm)	I.S.C (%)
1	15.84	0.03	15.3
2	17.37	0.06	12.8
3	17.90	0.07	8.9
4	20.53	0.03	10.4
5	20.71	0.16	9.8
6	19.02	0.14	9.7
7	20.67	0.07	10.5
8	16.45	0.10	8.6
9	16.07	0.13	6.7

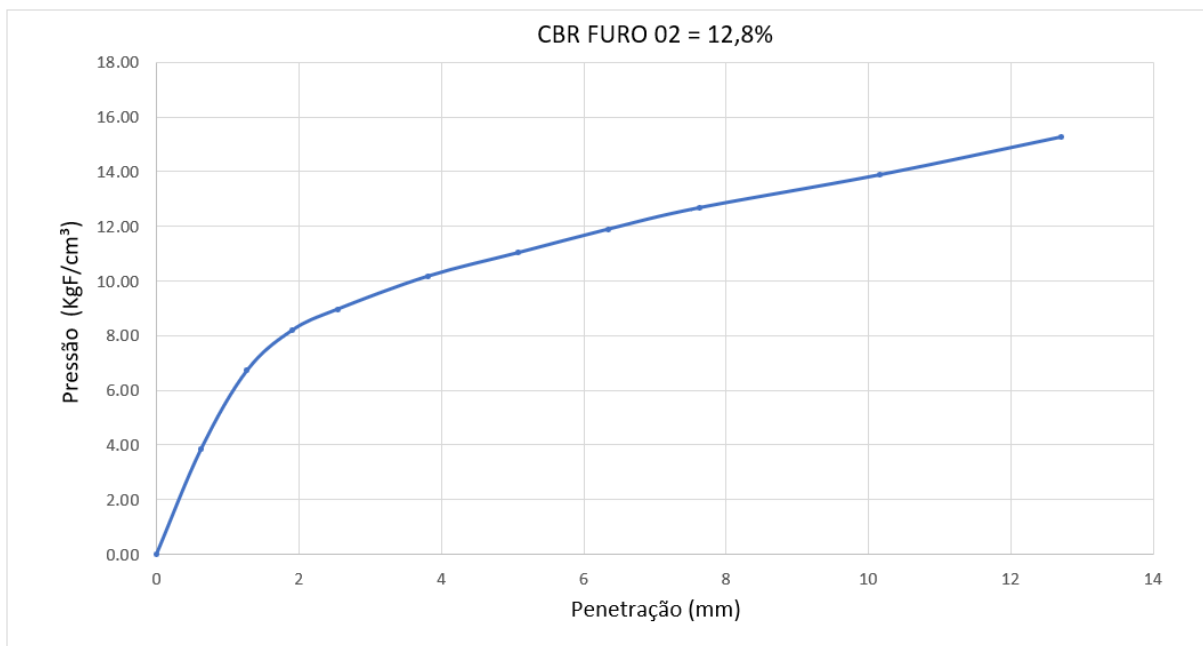
Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.1 – Curva CBR furo 01



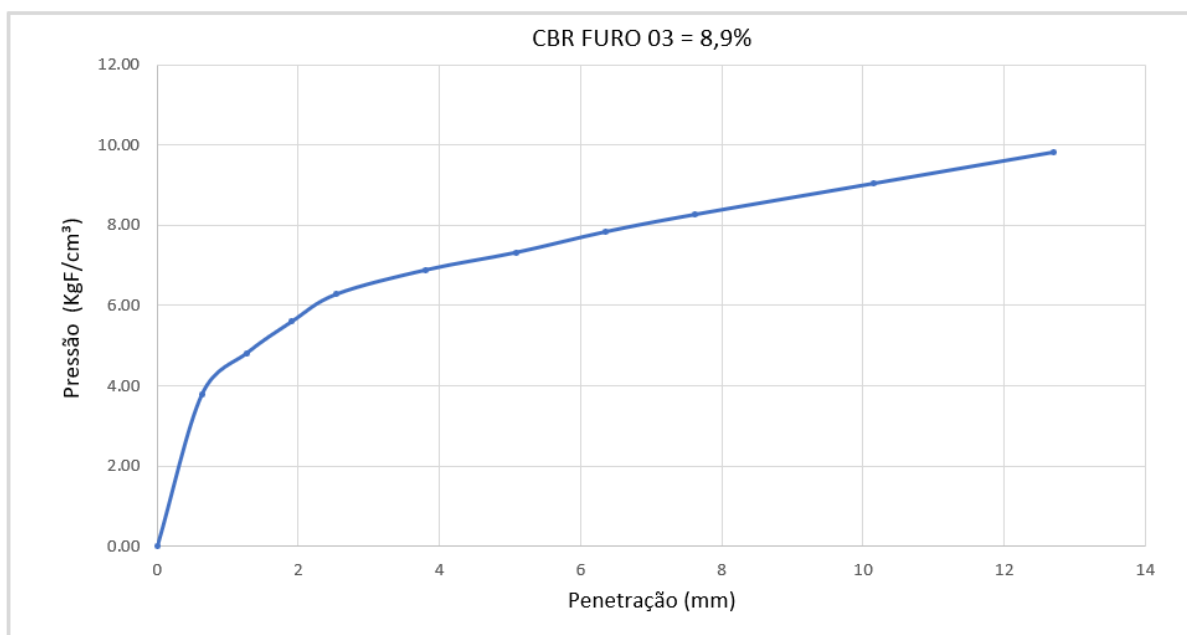
Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.2 – Curva CBR furo 02



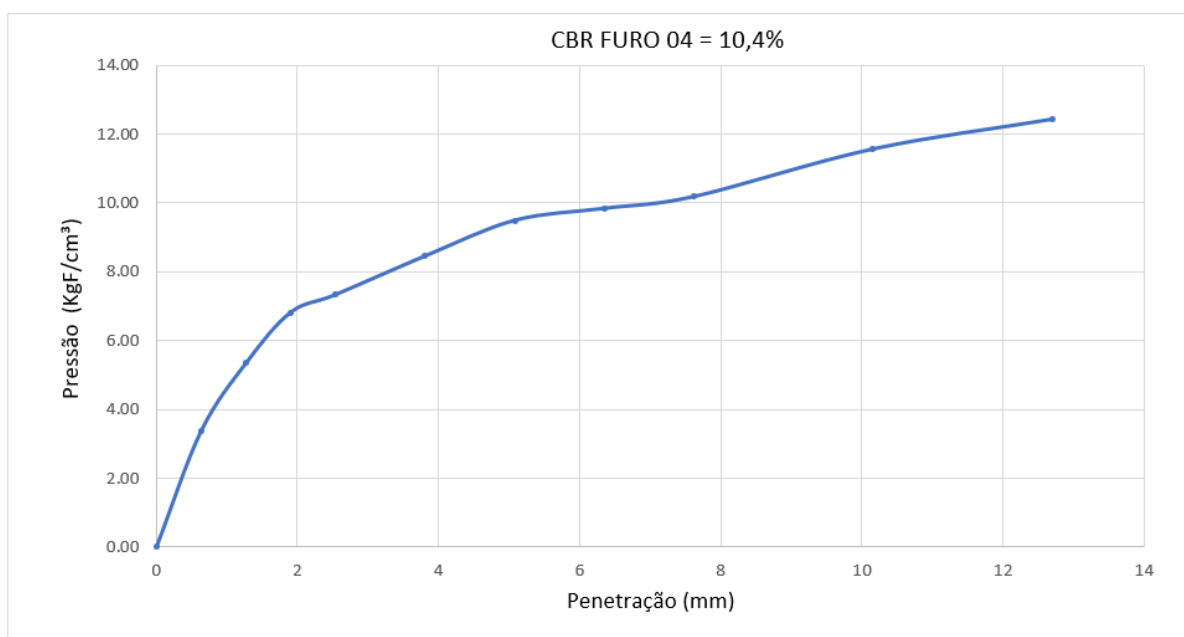
Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.3 – Curva CBR furo 03



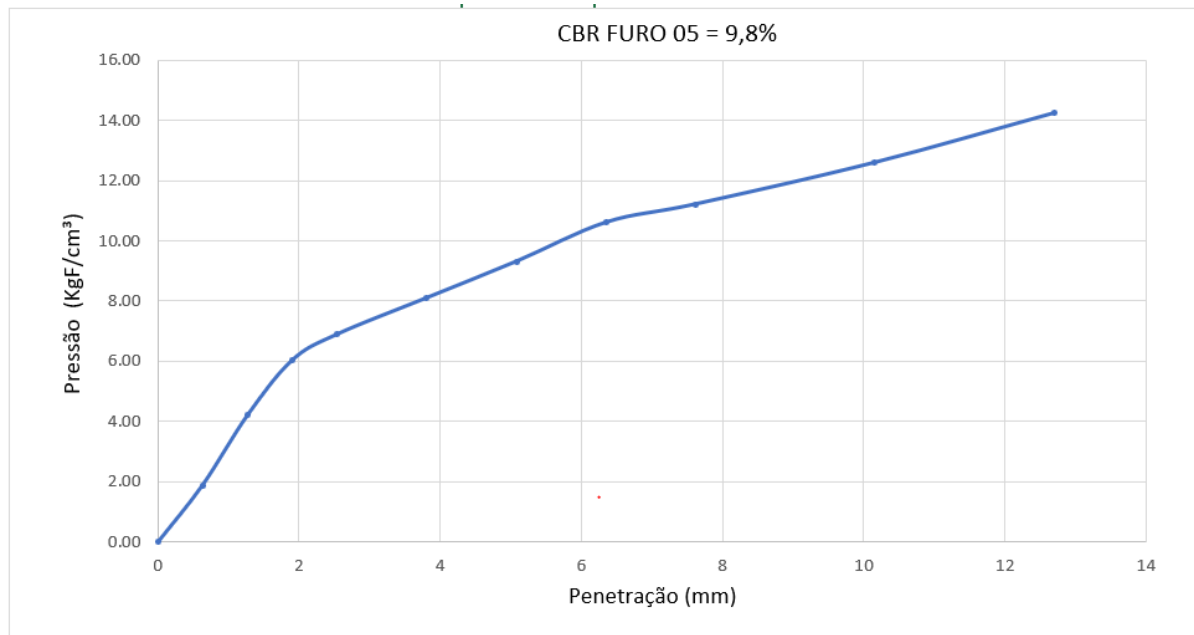
Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.4 – Curva CBR furo 04



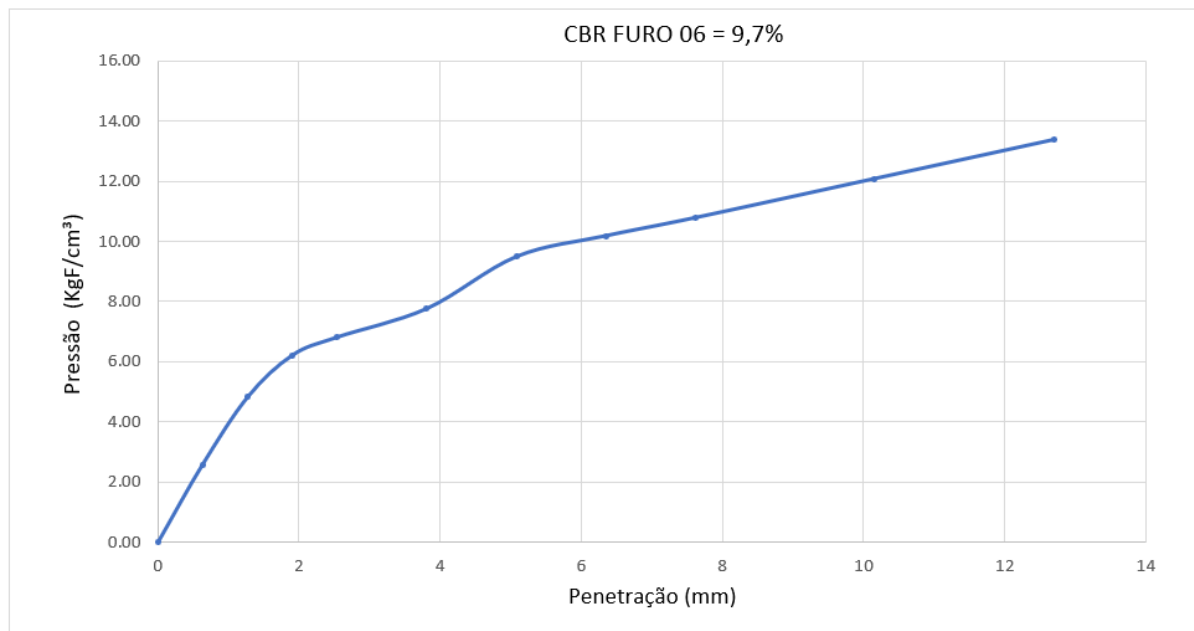
Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.5 – Curva CBR furo 05



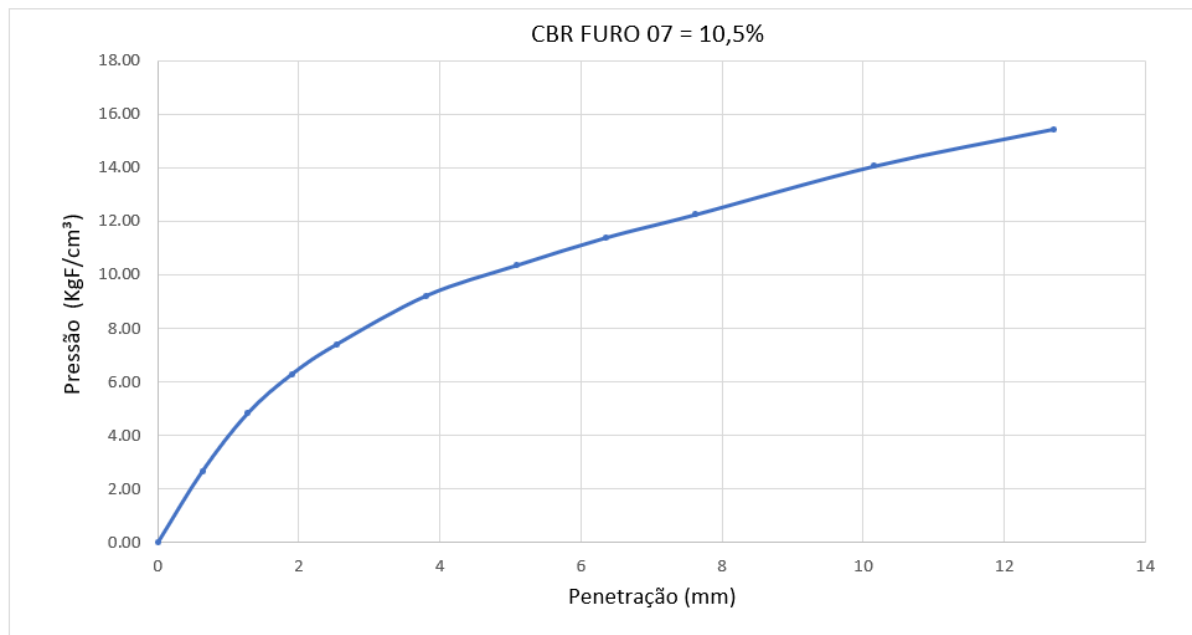
Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.6 – Curva CBR furo 06



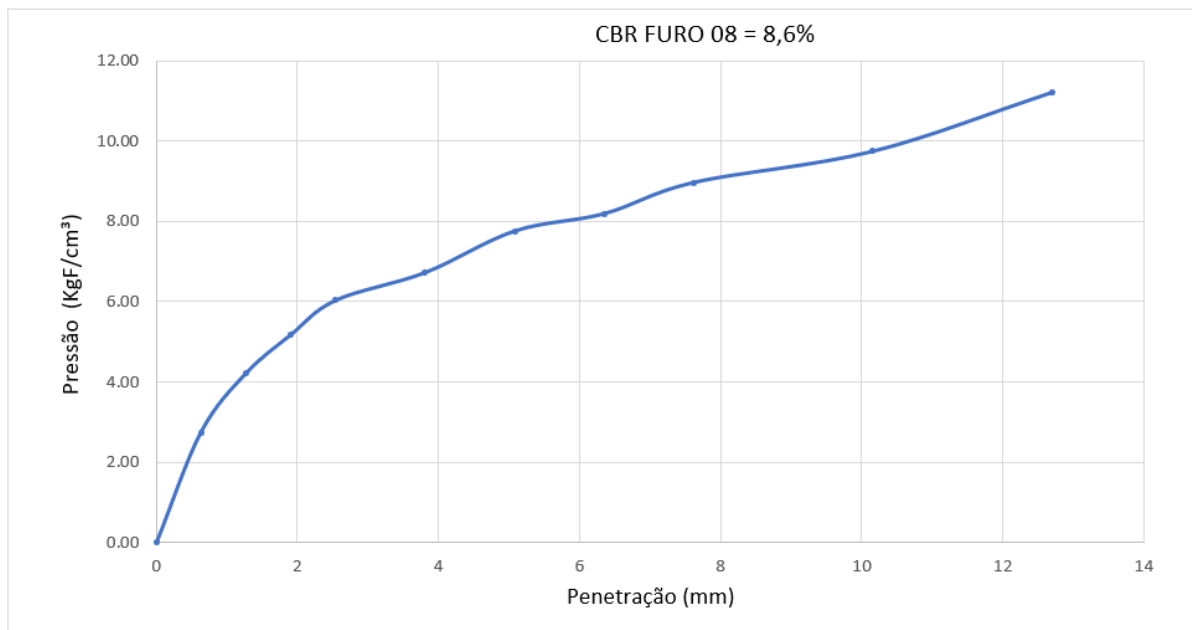
Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.7 – Curva CBR furo 07



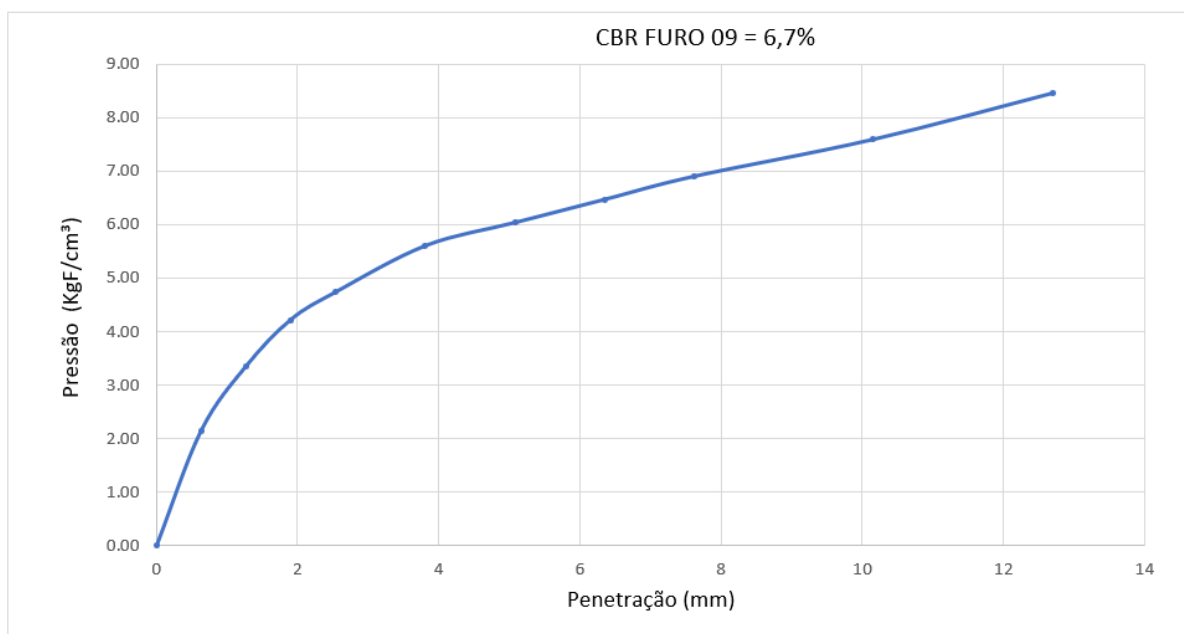
Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.8 – Curva CBR furo 08



Fonte: Autoria própria (2019)

Gráfico 4.9 – Curva CBR furo 09



Fonte: Autoria própria (2019)

Na tabela a seguir estão contidos os parâmetros geotécnicos referentes aos nove furos analisados, que foram utilizados para o dimensionamento do pavimento no próximo capítulo.

Tabela 4.2 – Resumo dos ensaios

DENSIDADE MÁXIMA SECA (g/cm³)	UMIDADE ÓTIMA (%)	UMIDADE HIGROSCÓPICA (%)	UMIDADE CBR (%)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA CBR (g/cm³)	Δh (mm)	I.S.C (%)	EXPANSÃO (%)
1.76	17.2	3.63	15.84	1.702	0.03	15.3	0.026
1.66	19.5	12.26	17.37	1.592	0.06	12.8	0.052
1.69	20.0	9.40	17.90	1.615	0.07	8.9	0.061
1.77	21.4	7.80	20.53	1.595	0.03	10.4	0.026
1.73	21.8	6.82	20.71	1.600	0.16	9.8	0.140
1.71	20.8	13.33	19.02	1.599	0.14	9.7	0.122
1.68	22.2	4.72	20.67	1.610	0.07	10.5	0.061
1.77	17.2	4.98	16.45	1.695	0.10	8.6	0.087
1.82	16.9	4.18	16.07	1.648	0.13	6.7	0.114

Fonte: Autoria própria (2019)

A fim de se obter resultados que possam ser comparáveis da maneira mais fidedigna, buscou-se utilizar das mesmas metodologias que foram utilizadas no projeto executivo. Desta forma, para o cálculo do CBR, utilizou-se de métodos estatísticos para se obter o valor de cálculo, assim como foi feito no projeto

executivo do BRT. Assim, determinou-se o valor característico de projeto pelo método dos mínimos quadrados, como mostrado a seguir:

$$I.S.C._{PROJ} = \bar{x} - \frac{1,29 \times \delta}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Onde:

$\bar{x}$ - média aritmética dos valores de ISC (eq. 4.2);

x - ISC de cada ponto;

n - nº de pontos;

δ - desvio padrão (eq 4.3).

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (4.2)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.3)$$

Através das equações, obtém-se o seguinte valor para o ISC de projeto a se utilizar:

Tabela 4.3 – Comparação dos resultados obtidos com os em execução na obra

PARÂMETROS DO ISC		
	OBTIDOS	EM EXECUÇÃO
MÉDIA	9.8	10.2
DESVIO PADRÃO	0.754	1.87
Nº AMOSTRAS	9	41
ISC PROJ	9.48	9.82
ISC MÁX	15.33	11.10
ISC MÍN	6.73	8.55

Fonte: Autoria própria (2019)

4.2. DIMENSIONAMENTO DA PISTA DE ROLAMENTO

Através dos dados geotécnicos pertinentes ao subleito obtidos no item anterior e dos parâmetros dos materiais da sub-base e de tráfego utilizados no projeto do consórcio do BRT, dimensionou-se a pista de rolamento de concreto de cimento Portland.

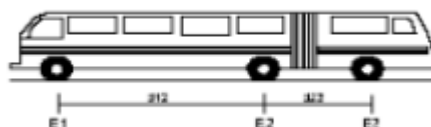
4.2.1. Tráfego

As características do tipo e volume de tráfego são fundamentais para o dimensionamento das estruturas do pavimento, uma vez que são essas características que vão gerar os esforços internos no pavimento (CMTC, 2012).

De acordo com a CMTC (2012), o estudo de tráfego partiu do fornecimento do volume médio diário de ônibus que irão trafegar por dia no corredor, que totaliza 1.200 ônibus. Com o volume diário para o ano de implantação, projeta-se este para o período de 20 anos, com taxa de crescimento de 3,0% ao ano.

O veículo segundo o padrão do DNIT que irá trafegar pelo corredor é o ônibus do tipo 2SB1 (Ônibus Urbano Articulado), conforme mostrado na figura a seguir.

Figura 4.1 – Ônibus Urbano Articulado 2SB1



Fonte: CMTC (2012)

Como se vê na figura, o ônibus é composto por 3 eixos, sendo o eixo dianteiro de roda simples de 6 tf de carga e os dois eixos restantes simples de roda dupla, com 10 tf de carga cada. Com esses dados de tráfego e de crescimento, obtém-se a distribuição de eixos ao longo dos 20 anos de projeto (CMTC, 2012).

Considerando o exposto e que 100% dos veículos estão com sua carga máxima legal, obteve-se os seguintes valores para a distribuição de eixos:

Tabela 4.4 – Determinação da Distribuição de Eixos

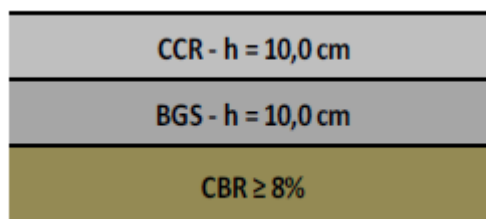
Ano	Volume Médio Diário por sentido	Acumulado no ano
1	1200	438.000
2	1236	451.140
3	1273	464.674
4	1311	478.614
5	1351	492.973
6	1391	507.762
7	1433	522.995
8	1476	538.685
9	1520	554.845
10	1566	571.491
11	1613	588.635
12	1661	606.294
13	1711	624.483
14	1762	643.218
15	1815	662.514
16	1870	682.390
17	1926	702.861
18	1983	723.947
19	2043	745.666
20	2104	768.036
Total Acumulado		
Eixo Simples Roda Simples		11.769.224
Eixo Simples Roda Dupla		23.538.448

Fonte: CMTC (2012)

4.2.2. Infraestrutura e sub-base

Optou-se por utilizar uma infraestrutura de concreto compactado a rolo (CCR) imediatamente abaixo da placa de concreto, apoiados sobre sub-base de brita graduada simples (BGS), segundo as características ilustradas a seguir:

Figura 4.2 – Infraestrutura do pavimento de concreto de cimento Portland



Fonte: CMTC (2012)

A CMTC (2012) estabelece as características que a infraestrutura deve seguir.

A camada de CCR deve possuir:

- Espessura mínima da camada acabada de 10 cm;
- Resistência característica à compressão simples (f_{ck}), medida aos 7 dias, igual a 5,0 MPa;
- Resistência característica à tração na flexão ($f_{ctM,k}$), medida aos 28 dias, igual a 1,3 MPa;
- Consumo de cimento compreendido entre 85 kg/m³ e 130 kg/m³;
- Dimensão máxima do agregado graúdo ($D_{máx}$) igual a 32 mm;
- Grau de compactação mínimo de 100% considerada a energia normal de compactação.

A camada de BGS de sub-base deve possuir:

- Espessura mínima acabada de 10 cm;
- Índice de Suporte Califórnia (CBR) maior ou igual a 100%;
- Grau de compactação mínimo de 100% na energia intermediária de compactação.

Ademais, é recomendado que o material esteja numa das faixas granulométricas mostradas a seguir:

Tabela 4.5 – Faixas granulométricas que o material deve se enquadrar

#	Porcentagem passando, em massa (%)	
(mm)	A	B
50	100	100
25	-	75 - 95
9,5	30 - 65	40 - 75
4,75	25 - 55	30 - 60
2	15 - 40	20 - 45
0,425	8 - 20	15 - 30
0,075	2 - 8	5 - 20

Fonte: CMTC (2012)

4.2.3. Placa de concreto

Como visto no capítulo sobre o modelo das placas de concreto utilizado no PCA/84, os critérios de ruína são regidos pela fadiga da camada de concreto e os danos por erosão das camadas subjacentes. A espessura necessária da placa é resultado do comportamento previsto da estrutura durante o período de projeto, em função desses dois critérios (CMTC, 2012). Acrescenta-se às considerações do dimensionamento, o tráfego, o uso ou não de barras de transferência e presença ou não de acostamento. Como já mencionado, no Brasil, utiliza-se a metodologia da ABCP adaptada da PCA/84.

O fator de segurança de cargas (F_{sc}) utilizado pela CMTC (2012) foi de 1,3, por se tratar de tráfego pesado e canalizado.

Tabela 4.6 – Fatores de segurança para cargas (FSC)

Tipo de Pavimento	FSC
– estradas rurais, ruas residenciais e vias em geral, submetidas a tráfego leve de caminhões	1,0
– rodovias e vias urbanas, submetidas a tráfego de caminhões pesados	1,1
– auto-estradas, rodovias com mais de duas faixas por pista, ou em qualquer projeto para tráfego ininterrupto ou de grande volume de caminhões pesados	1,2

Fonte: DNIT (2005)

Também como visto no método de dimensionamento da PCA/84, a posição crítica da carga na análise da fadiga é a borda longitudinal da placa, que é a região onde há maiores tensões. Na erosão, a posição crítica é o canto da placa, onde ocorre maiores deflexões na fundação (CMTC, 2012).

Quanto às características do concreto utilizado na confecção da placa, o consórcio executor adotou a resistência característica de ruptura à tração na flexão ($f_{ctM,k}$) de 4,5 MPa, medida aos 28 dias. Além disso, o concreto deve ter consistência e trabalhabilidade compatíveis com o equipamento vibroacabador que se utilizará na obra (CMTC, 2012).

O coeficiente de recalque k no topo da sub-base granular ($k_{granular}$) de 10 cm de espessura, em função do valor de índice de suporte Califórnia (CBR) do subleito igual a 9,48% se dá através da tabela 2.2 e é igual a 52 MPa/m.

4.2.4. Cálculo das espessuras

Para o dimensionamento da estrutura, utilizou-se o método visto no capítulo 3 deste trabalho, a saber o método da PCA/84, através da planilha de cálculo desenvolvida pela ABCP e pelas tabelas e gráficos para a determinação da tensão equivalente e o fator de erosão, bem como o número de repetições admissíveis, desenvolvidos pelo DNIT (2005). Seguindo a metodologia do item 2.4.3, obteve-se a espessura teórica ideal para o pavimento, como será mostrado a seguir.

Iniciou-se o cálculo com uma espessura tentativa de 27 de placa de concreto de cimento Portland.

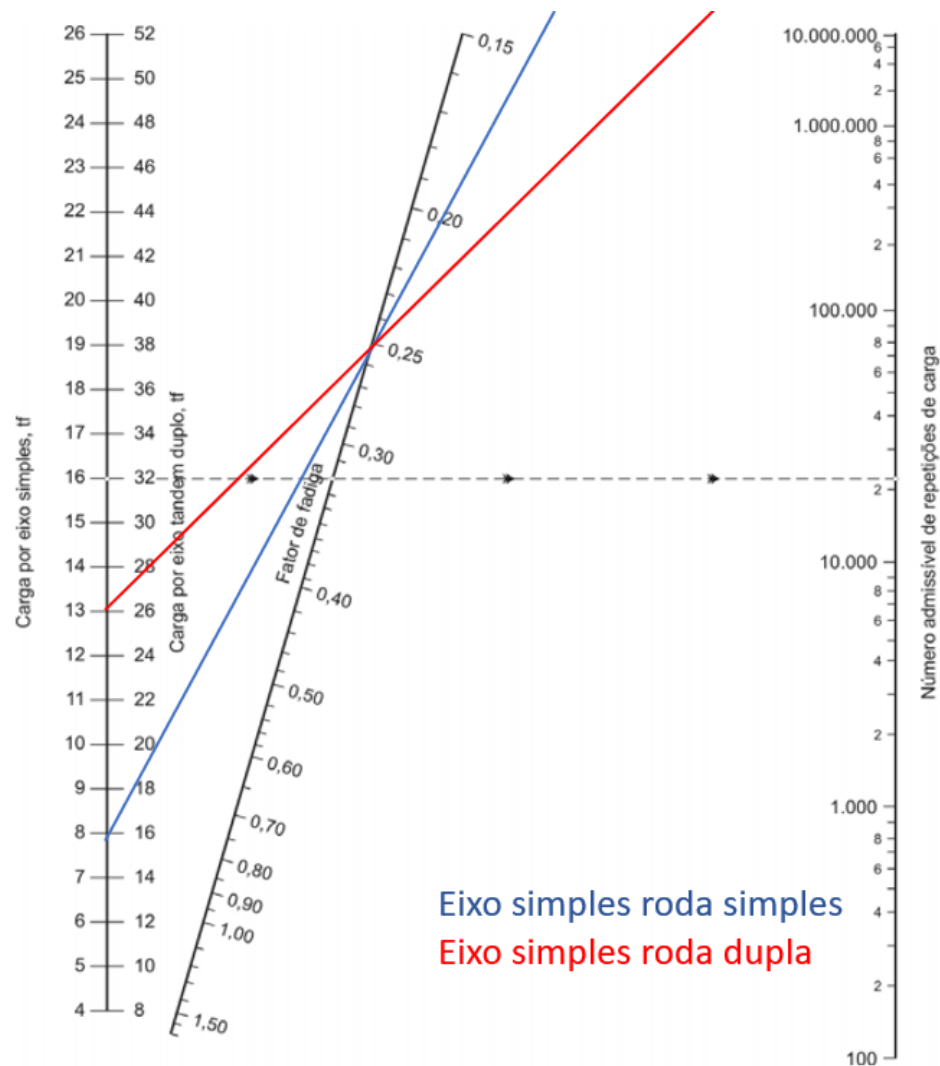
Primeiramente, determinou-se a tensão equivalente, através da tabela 4.7. Para um coeficiente $k = 52$ MPa/m, há de se fazer a interpolação para se encontrar o valor mais próximo de tensão para o determinado k .

Após isso, através da simples divisão entre a tensão equivalente e a resistência do concreto de projeto ($f_{ctm,K}$), obtém-se o fator de fadiga para as correspondentes cargas de eixo simples de roda simples e eixo simples de roda dupla.

Através da tabela 4.8, determina-se o fator de erosão, utilizando também a interpolação dos valores de 40 e 60 MPa/m, para se obter maior precisão.

Com o valor de fator de fadiga e o valor de carga por eixo, obtém-se o número de repetições admissíveis, como visto na figura 4.3 a seguir

Figura 4.3 – Análise de fadiga para eixos simples de roda simples e dupla

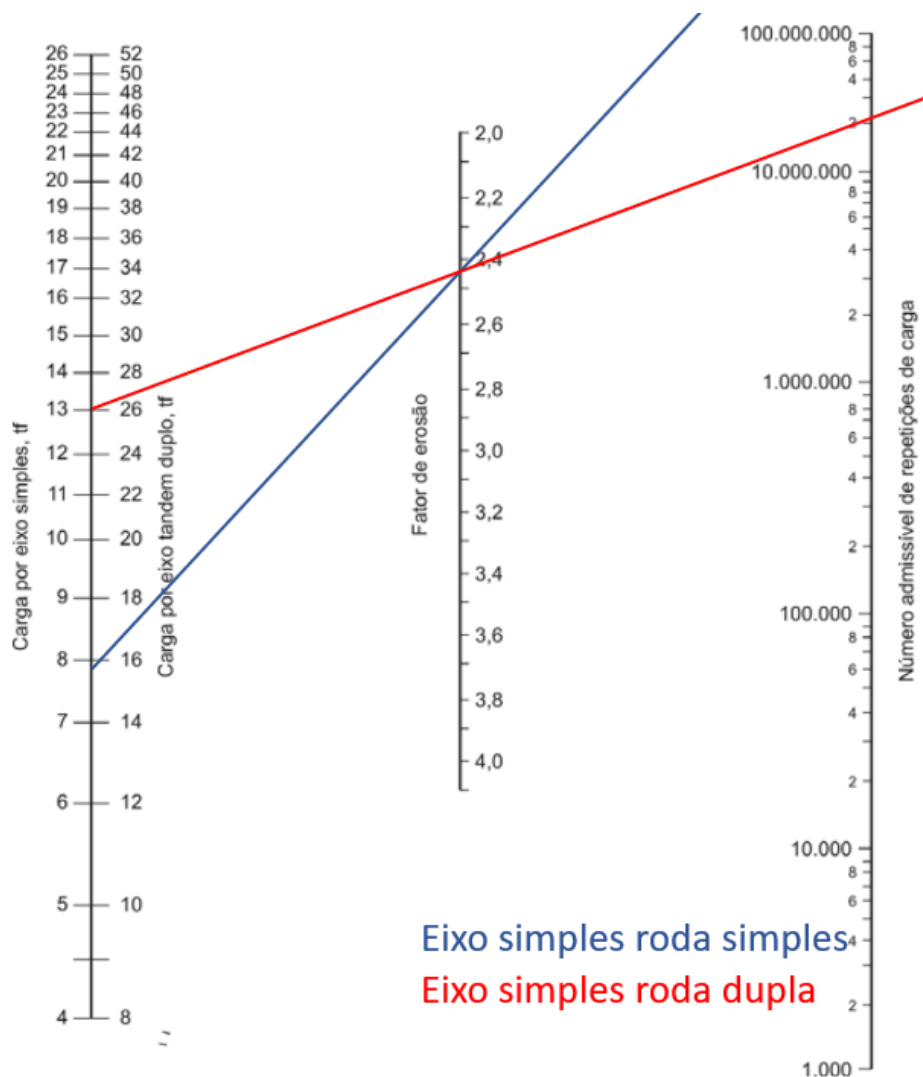


Fonte: Adaptado do DNIT (2005)

A partir do valor de carga por eixo, traça-se uma curva cruzando a reta do fator de fadiga no respectivo valor de fator de fadiga encontrado, fazendo a curva cruzar a a reta que corresponde o valor de número admissível de repetições. Caso cruze acima do valor máximo de 10.000.000, considera-se ilimitado o número admissível de repetições. Como pode-se ver, para a carga de um eixo simples de roda simples (7,8 tf) e eixo simples de roda dupla (13 tf), obteve-se número de repetições admissíveis ilimitados.

O procedimento para se obter o número de repetições admissíveis na análise da erosão se dá de maneira análoga, alterando-se somente a curva do fator de fadiga para o fator de erosão, como visto na figura a seguir:

Figura 4.4 – Análise de erosão para eixos simples de roda simples e dupla



Fonte: Adaptado do DNIT (2005)

Como se vê, para o eixo simples de roda simples, obtém-se número admissível de repetições ilimitado. Já para o eixo simples de roda dupla obtém-se valor de número de repetição admissível igual a 20.000.000.

Com estes dados, utiliza-se a tabela a seguir para obter-se o consumo de fadiga e os danos por erosão, que não devem ultrapassar 100% e são obtidos dividindo o número de repetições previstas pelo número de repetições admissíveis para as análises de fadiga e erosão.

Para a espessura tentativa de 27 cm obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 4.7 – Dimensionamento da placa de concreto para espessura de 27 cm

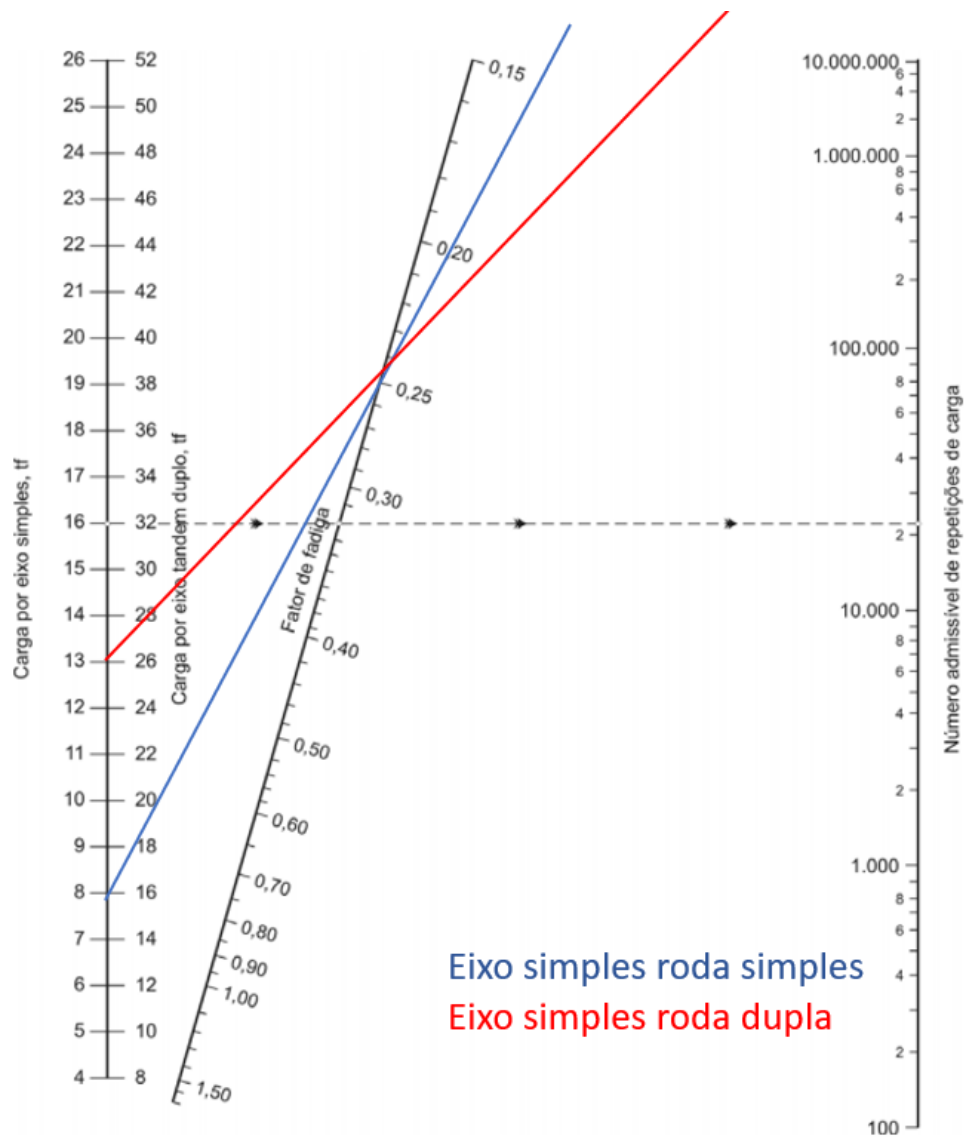
PROJETO		Corredor Norte-Sul BRT Goiânia						
ESPESSURA		27 cm						
Ksistema		52 Mpa/m						
RESISTENCIA CARACT. À TRAÇÃO NA FLEXÃO, fctmk		4.5		Mpa				
JUNTAS COM BT		sim		x		não		x
ACOSTAMENTO DE CONCRETO		sim				não		
PERIODO DE PROJETO		20		anos				
FATOR DE SEGURANÇA DE CARGAS				Fsc		1.3		
Cargas por eixo (t)	Cargas por eixo x FSC (t)	Número de repetições previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão			
			Número de repetições admissíveis	Consumo de fadiga (%)	Número de repetições admissíveis	Danos por erosão		
1	2	3	4	5	6	7		
EIXO SIMPLES			8 - Tensão equivalente		1.162			
			9 - Fator de fadiga		0.258			
			10 - Fator de erosão		2.44			
6	7.8	11769224	ilimitado	0	ilimitado	0		
10	13	23538448	ilimitado	0	20000000	1.1769224		
			TOTAL	0.0%	TOTAL	117.7%		

Fonte: Autoria própria (2019)

Uma vez que para uma espessura de 27 cm a análise de erosão ultrapassa o valor de 100%, faz-se necessário realizar os mesmos procedimentos para outra espessura tentativa.

Então, para uma espessura tentativa de 28 cm e analogamente ao procedimento realizado para a espessura de 27 cm, obtém-se os seguintes resultados.

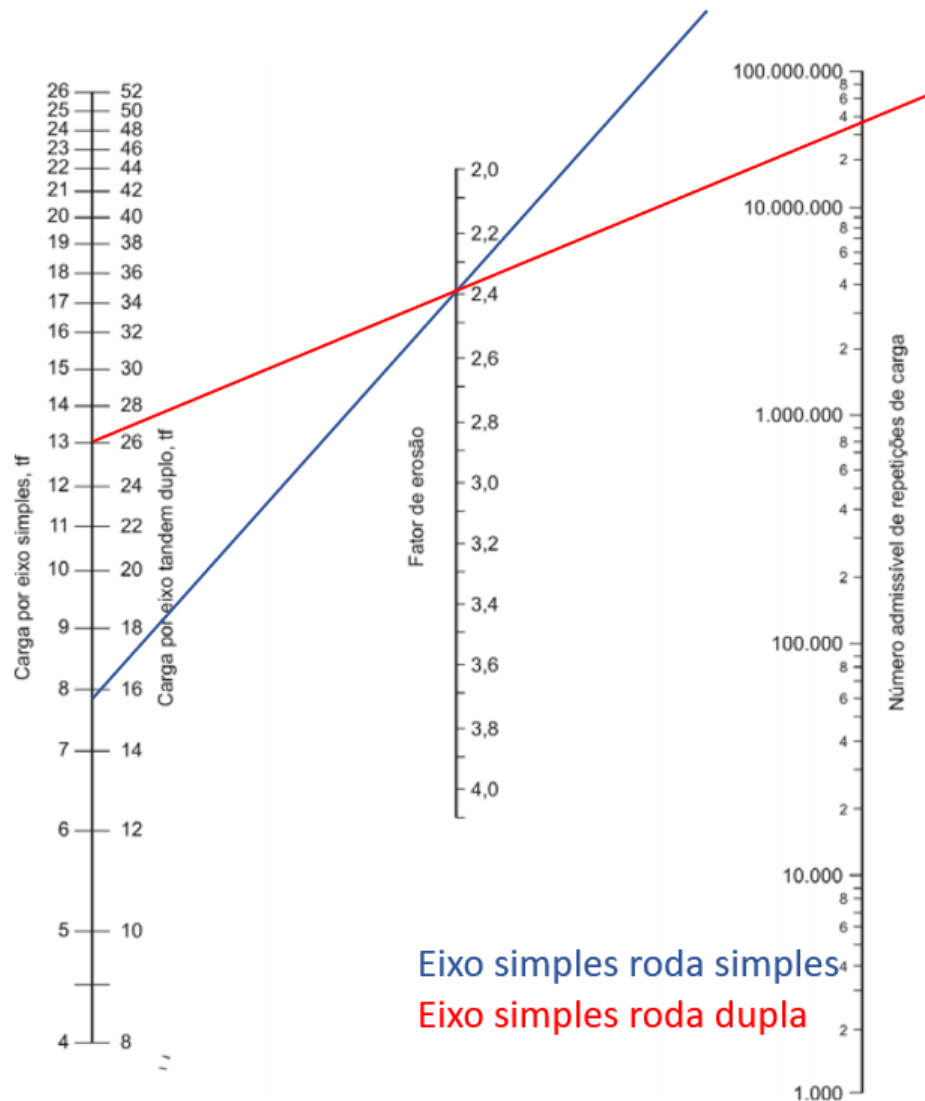
Figura 4.5 – Análise de fadiga para eixos simples de roda simples e dupla



Fonte: Adaptado do DNIT (2005)

Assim como para espessura de 27 cm, obteve-se número admissível de repetições ilimitado para as duas cargas na análise de fadiga.

Figura 4.6 – Análise de erosão para eixos simples de roda simples e dupla



Fonte: Adaptado do DNIT (2005)

Para a carga de eixo simples de roda simples obteve-se o mesmo resultado da espessura tentativa anterior. Já para a carga de eixo simples de roda dupla, alterou-se o número de repetições admissíveis de 20.000.000 para 35.000.000.

Tabela 4.8 – Dimensionamento da placa de concreto para espessura de 28 cm

PROJETO		Corredor Norte-Sul BRT Goiânia				
ESPESSURA		28 cm				
Ksistema		52 Mpa/m				
RESISTENCIA CARACT. À TRAÇÃO NA FLEXÃO, fctmk		4.5		Mpa		
JUNTAS COM BT		sim	x	não		x
ACOSTAMENTO DE CONCRETO		sim		não		
PERIODO DE PROJETO		20		anos		
FATOR DE SEGURANÇA DE CARGAS			Fsc	1.3		
Cargas por eixo (t)	Cargas por eixo x FSC (t)	Número de repetições previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Número de repetições admissíveis	Consumo de fadiga (%)	Número de repetições admissíveis	Danos por erosão
1	2	3	4	5	6	7
EIXO SIMPLES			8 - Tensão equivalente		1.102	
			9 - Fator de fadiga		0.245	
			10 - Fator de erosão		2.394	
6	7.8	11769224	ilimitado	0	ilimitado	0
10	13	23538448	ilimitado	0	35000000	0.672527086
			TOTAL	0.0%	TOTAL	67.3%

Fonte: Autoria própria (2019)

Conclui-se através da tabela de dimensionamento acima, que para a espessura igual a 28 cm, as análises de fadiga e erosão são satisfatoriamente aprovadas.

4.2.4.1. Espessura necessária

A PCA/84 possui um procedimento a parte para pavimentos rígidos sobre infraestrutura de concreto rolado como é o caso, reconhecendo que a camada contribui efetivamente na diminuição dos valores de tensões e deformações no pavimento (CMTC, 2012), considerando que as camadas são completamente separadas, como sendo um pavimento de concreto com sub-base de concreto rolado, não monolítico. Logo, a espessura total resultante da soma das espessuras das duas camadas é equivalente a única camada de concreto calculado anteriormente de 28 cm.

Através do ábaco contido no método da PCA/84, obtém-se a espessura necessária da placa de concreto para as características do pavimento, resultando na diminuição da espessura da placa de 28 para 23 cm.

Figura 4.7 – Dimensionamento final obtido



Fonte: Adaptado de CMTC (2012)

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho, que compreende a análise do suporte do solo do subleito para fins de pavimentação, através de estudo de caso do trecho da Avenida Goiás Norte do BRT Norte-Sul, atingiu seus objetivos de forma satisfatória, uma vez que o resultado do dimensionamento proposto foi semelhante ao que foi projetado e está em execução.

Embora os resultados de classificação obtidos por Machado *et al.* (2018) tenham definido o solo como regular a mau para atuar como subleito de pavimento, as análises da resistência do solo (CBR) realizadas neste trabalho, demonstraram comportamento muito satisfatórios para sua atuação como fundação de pista de rolamento, pois verificou-se ser um solo bastante resistente e pouco expansivo.

O valor de ISC obtido para o dimensionamento foi semelhante ao que fora utilizado para o cálculo das espessuras do corredor em execução, mesmo os pontos de análise terem sido diferentes no trecho de estudo, o que mostra que as características do solo durante a extensão estudada são constantes na camada de subleito. Assim sendo, o dimensionamento final do pavimento foi igual ao projetado que está em execução.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo estão listadas sugestões para trabalhos futuros, a fim de complementar o tema estudado:

- Análise do solo do subleito e dimensionamento do pavimento do BRT Norte-Sul trecho Avenida Goiás-Norte através do Método da Resiliência;
- Análise comparativa da resistência do solo para subleito de pista de rolamento através do Método da Resiliência.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Cimento Portland. (1996). **Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84**. ET-97, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (Distrito Federal) (Ed.). **O que é BRT?** 200-?. Disponível em: <<http://www.brtbrasil.org.br/index.php/brt/oquebrt>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (Distrito Federal). **Estudos de BRT no Brasil**. 2012. Disponível em: <<http://www.fetranspordocs.com.br/downloads/28EstudosBRTBrasil.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

BENEDETTI, Marco; CARVALHO, Willer Luciano; GULARTE, Juliana Gomes. **BRT X VLT ANÁLISE ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DO EIXO ANHANGUERA DA CIDADE DE GOIÂNIA**. 2013. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013. Cap. 3. Disponível em:

<[https://www.eec.ufg.br/up/140/o/BRT_X_VLT_ANALISE_ECONÔMICA_DA_SUBSTITUIÇÃO_DO_SISTEMA_DE_TRANSPORTE PÚBLICO_DO_EIXO_ANHANGUE](https://www.eec.ufg.br/up/140/o/BRT_X_VLT_ANALISE_ECONOMICA_DA_SUBSTITUICAO_DO_SISTEMA_DE_TRANSPORTE_PUBLICO_DO_EIXO_ANHANGUERA_DA_CIDADE_DE_GOIANIA.pdf)
[RA_DA_CIDADE_DE_GOIÂNIA.pdf](https://www.eec.ufg.br/up/140/o/BRT_X_VLT_ANALISE_ECONOMICA_DA_SUBSTITUICAO_DO_SISTEMA_DE_TRANSPORTE_PUBLICO_DO_EIXO_ANHANGUERA_DA_CIDADE_DE_GOIANIA.pdf)>. Acesso em: 23 jun. 2018.

BERTI, Carolina. **AValiação da capacidade de suporte de solos “IN SITU” EM OBRAS VIÁRIAS ATRAVÉS DO CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA ESTUDO EXPERIMENTAL**. 2005. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258212/1/Berti_Carolina_M.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2019.

BIANCHI, Flavia Regina; BRITO, Isis Raquel Tacla; CASTRO, Veronica Amanda Brombley. **COMPARATIVO ENTRE O COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO RÍGIDO E FLEXÍVEL RÍGIDO E FLEXÍVEL PARA A AVENIDA FERNANDO FERRARI PARA A AVENIDA FERNANDO FERRARI**. 2008. Disponível em:

BRASIL. Controladoria Geral da União. Ministério das Cidades. **Relatório Nº 201504940: Corredor BRT Norte-Sul Goiânia/Go**. Goiânia, 2015. 48 p.

CARVALHO, Marcos Dutra de. **PREMISSAS DE PROJETO DO PAVIMENTO DE CONCRETO: Pavimentação com Sustentabilidade**. 2013. Disponível em: <[https://www.feb.unesp.br/Home/Departamentos343/EngenhariaCivil/gustavogarcia](https://www.feb.unesp.br/Home/Departamentos343/EngenhariaCivil/gustavogarcia/manzato/premissas-de-projeto---feb.pdf)
[manzato/premissas-de-projeto---feb.pdf](https://www.feb.unesp.br/Home/Departamentos343/EngenhariaCivil/gustavogarcia/manzato/premissas-de-projeto---feb.pdf)>. Acesso em: 16 mar. 2019.

CHRISTAN, Priscila de. **Estudo da interação solo-estaca sujeito a carregamento horizontal em ambientes submersos**. 2012. 192 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba, 2012.

COOPER, Miguel. **Física do solo: Granulometria e textura do solo**. 2015. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/576877/mod_resource/content/1/Aula 1 - Granulometria e Textura do Solo.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/576877/mod_resource/content/1/Aula_1_-_Granulometria_e_Textura_do_Solo.pdf)>. Acesso em: 28 jun. 2018.

CRISPIM, Flavio A.. **DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO: Peso Específico dos Sólidos e Granulometria**. 2011. Disponível em: <http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_2815apostila_mes_gu_n.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRÂNSITO. **IPR - 714: Manual de Pavimentos Rígidos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Ipr, 2005. 234 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR 739: Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários / instruções para acompanhamento e análise**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010. 564 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/739_diretrizes_basicas-instrucoes_para_acompanhamento.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2018.

DISTRITO FEDERAL. Lloyd Wright. Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana (Ed.). **Manual de BRT - Bus Rapid Transit: Guia de Planejamento**. 2008. Disponível em: <<https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/6.-Manual-de-BRT-em-Portuguese-Intro.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

FERREIRA, Carla de Castro. **Aspectos do coeficiente de recalque de solos da formação Guabirotuba**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. doi:10.11606/D.18.2016.tde-02032016-141913. Acesso em: 2019-04-23.

GOIÂNIA. PREFEITURA DE GOIÂNIA. (Ed.). **História: História de Goiânia**. 2012. Disponível em: <<http://www4.goiania.go.gov.br/portal/goiania.asp?s=2&tt=con&cd=1964>>. Acesso em: 23 maio 2018.

GONÇALVES, Heloisa Helena Silva; MARINHO, Fernando A M.; FUTAI, Marcos Massao. **MECÂNICA DOS SOLOS E FUNDAÇÕES - PEF 522: NOTAS DE AULAS REVISADAS** - 2014. 2014. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/pef0522/PEF0522-Notas de Aula.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

HOLANDA JÚNIOR, Osvaldo Gomes de. **INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA PARA EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO SOBRE FUNDAÇÕES DIRETAS**. 1998. 195 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. Disponível em:

<http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1998ME_OsvaldoGomesdeHolan daJunior.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2019.

INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO (Rio de Janeiro) (Ed.). **Avaliação BRT Eixo Anhanguera**. 2016. Disponível em: <<http://itdpbrasil.org.br/avaliacao-brt-eixo-anhanguera/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

MACHADO, Isabela Cristina Mesquita; MENEZES, Wesley Pimenta de; VALE, Sandro Borges. **EXECUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO SOLO DO SUBLEITO UTILIZADO NA PAVIMENTAÇÃO DA PISTA DE ROLAMENTO DO BRT NORTE-SUL DE GOIÂNIA – TRECHO AVENIDA GOIÁS NORTE**. 2018. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas Iii, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2018.

NETTO, Wilson Rodrigues Lourinho. **ANÁLISE DE INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA APLICADA À GALERIAS DE CONCRETO ARMADO**. 2014. 152 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro,, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010861.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2019.

OLIVEIRA, Patrícia Lizi de. **PROJETO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS E DE PISOS INDUSTRIAIS DE CONCRETO**. 2000. 246 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Cap. 10.

PAULA RESENDE (Goiânia). G1. **Após quase um ano paralisada, obra do BRT é retomada em Goiânia**. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/go/goias/transito/noticia/apos-quase-um-ano-paralisada-obra-do-brt-e-retomada-em-goiania.ghtml>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**: Em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

Portland Cement Association (1966). **Thickness design for concrete pavements**. IS 010.03P. Skokie, Illinois;

Portland Cement Association. (1984). **Thickness design for concrete highway and street pavements**. EB 109.01P, Illinois.

RIO DE JANEIRO. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão). **População**: População no último censo. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/goiania/panorama>>. Acesso em: 23 maio 2018.

RODRIGUES, Galtieri. **Eixo Anhanguera: 40 anos de muita história para contar**. 2017. Disponível em: <<https://www.opopular.com.br/editorias/cidades/eixo-anhanguera-40-anos-de-muita-historia-para-contar-1.1203489>>. Acesso em: 26 maio 2018.

RUFINO, Dulce Maria Saraiva. **ESTUDO DOS PROCEDIMENTOS DE DIMENSIONAMENTO E DOS NOVOS PROGRAMAS DE ANÁLISE DE TENSÕES EM PAVIMENTOS DE CONCRETO**. 1997. 436 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe/ufrrj, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <file:///C:/Users/Edgar/Downloads/Dulce%20Maria%20Saraiva%20Rufino.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2019.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**: Volume 1. São Paulo: Pini, 1997. 746 p. 1 v.

SILVA, José Eudes Marinho da; CARNEIRO, Luiz Antonio Vieira (Ed.). PAVIMENTOS DE CONCRETO: HISTÓRICO, TIPOS E MODELOS DE FADIGA. **Revista Militar de Artigos Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 31, p.14-33, 01 set. 2014. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/revistas/RMCT_3_tri_2014.pdf>. Acesso em: 26 maio 2019.

SILVA, Luzilene Souza et al. Análise comparativa entre as técnicas construtivas de pavimentação empregadas no sistema Bus Rapid Transit (BRT) - Belém - PA versus Fortaleza - CE. **Rct - Revista de Ciência e Tecnologia**: Expandindo as fronteiras do conhecimento, Belém, v. 4, n. 6, p.1-25, 26 maio 2019. Disponível em: <<https://revista.ufrr.br/rct/article/view/4956>>. Acesso em: 25 maio 2019.

SISTEMA Anchieta-Imigrantes. 2019. Disponível em: <<https://www.ecovias.com.br/institucional/sistema-anchieta-imigrantes>>. Acesso em: 15 jun. 2019

SOUZA, Ricardo Andrade de. **ESTUDO COMPARATIVO DOS ENSAIOS DE CBR E MINI-CBR PARA OS SOLOS DE UBERLÂNDIA-MG**. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14236/1/RASouzaDISPRT.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2019.

V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo. **Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples**. São Paulo: Epusp, 2003. 20 p.

APÊNDICE A – TABELAS

Tabela A.1 - Tensão equivalente para eixos simples e tandem duplo (MPa) para pavimento sem acostamento de concreto

Espessura da Placa (cm)	K – Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		180	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	4,30	3,56	3,78	3,01	3,51	2,81	3,31	2,68	3,17	2,57	2,91	2,43	2,74	2,35
13	3,84	2,33	3,38	2,73	3,14	2,53	2,97	2,40	2,84	2,30	2,61	2,16	2,46	2,08
14	3,46	2,96	3,05	2,49	2,83	2,29	2,68	2,16	2,56	2,08	2,37	1,94	2,23	1,85
15	3,14	2,72	2,27	2,29	2,57	2,09	2,44	1,97	2,33	1,88	2,16	1,75	2,04	1,67
16	2,87	2,52	2,53	2,12	2,35	1,93	2,23	1,81	2,13	1,73	1,97	1,60	1,87	1,52
17	2,63	2,35	2,33	1,97	2,16	1,79	2,05	1,67	1,96	1,60	1,81	1,47	1,72	1,39
18	2,43	2,20	2,15	1,84	1,99	1,66	1,89	1,55	1,81	1,48	1,68	1,36	1,59	1,28
19	2,25	2,07	1,99	1,72	1,85	1,56	1,75	1,45	1,68	1,38	1,56	1,26	1,48	1,19
20	2,10	1,95	1,85	1,62	1,72	1,46	1,64	1,36	1,56	1,29	1,45	1,18	1,38	1,11
21	1,96	1,85	1,73	1,53	1,61	1,38	1,52	1,29	1,46	1,22	1,36	1,11	1,28	1,04
22	1,83	1,75	1,62	1,45	1,50	1,31	1,42	1,22	1,37	1,15	1,28	1,05	1,20	0,98
23	1,72	1,67	1,52	1,38	1,41	1,24	1,33	1,15	1,28	1,09	1,20	0,99	1,13	0,92
24	1,62	1,59	1,43	1,31	1,33	1,18	1,25	1,10	1,21	1,04	1,13	0,94	1,07	0,88
25	1,53	1,52	1,35	1,25	1,26	1,12	1,19	1,05	1,14	0,99	1,07	0,89	1,01	0,83
26	1,45	1,45	1,28	1,20	1,19	1,07	1,13	1,00	1,08	0,94	1,01	0,85	0,95	0,80
27	1,83	1,39	1,21	1,15	1,13	1,03	1,07	0,95	1,03	0,90	0,95	0,81	0,90	0,76
28	1,31	1,34	1,15	1,10	1,07	0,99	1,02	0,91	0,98	0,86	0,90	0,78	0,86	0,73
29	1,25	1,29	1,10	1,06	1,02	0,95	0,97	0,88	0,93	0,83	0,86	0,75	0,82	0,69
30	1,19	1,24	1,05	1,02	0,97	0,91	0,92	0,85	0,89	0,80	0,82	0,72	0,78	0,66
31	1,13	1,20	1,00	0,99	0,93	0,88	0,88	0,81	0,84	0,77	0,78	0,69	0,74	0,64
32	1,09	1,16	0,96	0,95	0,89	0,85	0,84	0,78	0,80	0,74	0,75	0,67	0,71	0,62
33	1,04	1,12	0,92	0,92	0,85	0,82	0,80	0,76	0,77	0,71	0,72	0,64	0,68	0,60
34	1,00	1,08	0,88	0,89	0,81	0,79	0,77	0,73	0,73	0,69	0,69	0,62	0,66	0,58

Fonte: DNIT (2005)

Tabela A.2 - Fator de Erosão para eixos simples e tandem duplo com juntas sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto

Espessura da Placa (cm)	K – Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		200	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,51	3,61	3,50	3,57	3,49	3,54	3,48	3,52	3,48	3,51	3,47	3,49	3,45	3,47
13	3,41	3,53	3,39	3,48	3,39	3,45	3,38	3,43	3,38	3,41	3,37	3,39	3,35	3,37
14	3,32	3,45	3,30	3,39	3,29	3,36	3,28	3,34	3,28	3,33	3,27	3,30	3,25	3,28
15	3,23	3,45	3,21	3,31	3,20	3,28	3,19	3,26	3,19	3,24	3,18	3,22	3,16	3,20
16	3,15	3,37	3,12	3,24	3,12	3,21	3,10	3,18	3,10	3,17	3,09	3,14	3,08	3,12
17	3,07	3,30	3,05	3,17	3,04	3,14	3,02	3,11	3,02	3,10	3,01	3,07	3,00	3,04
18	2,99	3,24	2,97	3,11	2,96	3,07	2,95	3,05	2,94	3,03	2,93	3,00	2,92	2,97
19	2,93	3,18	2,90	3,05	2,89	3,01	2,88	2,98	2,87	2,97	2,86	2,93	2,85	2,91
20	2,86	3,12	2,83	3,00	2,83	2,95	2,81	2,92	2,80	2,91	2,79	2,87	2,79	2,84
21	2,80	3,06	2,77	2,93	2,76	2,89	2,74	2,86	2,74	2,85	2,73	2,81	2,72	2,78
22	2,74	3,01	2,71	2,88	2,70	2,84	2,68	2,81	2,68	2,80	2,67	2,76	2,66	2,73
23	2,68	2,96	2,65	2,83	2,64	2,79	2,62	2,76	2,62	2,74	2,61	2,70	2,59	2,67
24	2,63	2,91	2,60	2,78	2,59	2,74	2,57	2,71	2,56	2,69	2,55	2,65	2,54	2,62
25	2,58	2,87	2,54	2,74	2,54	2,69	2,52	2,67	2,51	2,65	2,50	2,60	2,49	2,57
26	2,53	2,83	2,50	2,70	2,49	2,65	2,47	2,62	2,46	2,61	2,45	2,56	2,44	2,53
27	2,48	2,79	2,45	2,66	2,44	2,61	2,42	2,58	2,41	2,57	2,40	2,52	2,39	2,49
28	2,43	2,75	2,40	2,63	2,39	2,57	2,37	2,54	2,37	2,53	2,35	2,48	2,34	2,45
29	2,39	2,72	2,36	2,59	2,35	2,54	2,33	2,51	2,32	2,49	2,31	2,44	2,30	2,41
30	2,43	2,69	2,31	2,56	2,30	2,50	2,28	2,47	2,28	2,45	2,26	2,41	2,25	2,37
31	2,30	2,65	2,27	2,52	2,26	2,47	2,24	2,43	2,24	2,43	2,22	2,37	2,21	2,34
32	2,26	2,62	2,23	2,49	2,22	2,43	2,20	2,40	2,19	2,38	2,18	2,33	2,17	2,30
33	2,22	2,59	2,19	2,46	2,18	2,40	2,16	2,47	2,15	2,35	2,14	2,30	2,13	2,27
34	2,18	2,56	2,15	2,43	2,14	2,37	2,12	2,33	2,12	2,32	2,10	2,27	2,09	2,24

Fonte: DNIT (2005)