

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO DE ENGENHARIA DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA**

DANIEL PEDROSO DE ALMEIDA

**SOLUÇÃO DO PROJETO DE PAVIMENTO RÍGIDO
Estudo de caso: corredor de ônibus do binário das Ruas
Dr. João Colin e Blumenau – Joinville/SC**

Joinville – SC

2015

DANIEL PEDROSO DE ALMEIDA

SOLUÇÃO DO PROJETO DE PAVIMENTO RÍGIDO
Estudo de caso: corredor de ônibus do binário das Ruas
Dr. João Colin e Blumenau – Joinville/SC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Heidemann

Joinville – SC

2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Almeida, Daniel Pedroso

Solução do projeto do pavimento rígido : estudo de caso:
corredor de ônibus do binário das Ruas Dr. João Colin e
Blumenau / Daniel Pedroso Almeida ; orientador, Breno
Salgado Barra ; coorientador, Marcelo Heidemann. -
Joinville, SC, 2015.

104 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.
Graduação em Engenharia de Infraestrutura.

Inclui referências

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Corredor de ônibus .
3. Pavimento rígido. 4. Dimensionamento. 5. Portland Cement
Association (1984). I. Barra, Breno Salgado. II.
Heidemann, Marcelo . III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia de Infraestrutura. IV.
Título.

SOLUÇÃO DO PROJETO DE PAVIMENTO RÍGIDO
Estudo de caso: corredor de ônibus do binário das Ruas
Dr. João Colin e Blumenau – Joinville/SC

Este trabalho foi julgado para obtenção do título de graduado em Engenharia de Infraestrutura pela banca examinadora, perante o curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville.

Prof^a. Valéria Bennack.
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)
Coordenadora do Curso Engenharia de Infraestrutura

Data: __ / __ / ____

Nota: _____

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Orientador
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)

Prof. Dr. Marcelo Heidemann
Co-orientador
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)

Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a minha família, principalmente ao meu pai, Elder Pedroso de Almeida, a minha mãe Rosmeiry Aparecida Prado Almeida e aos meus irmãos Danilo Prado Pedroso de Almeida e Murilo Pedroso de Almeida. Não foram fáceis esses meses de árduo trabalho e dedicação, e sei que pude com todos vocês em todos os momentos, obrigado pela compreensão.

À minha namorada e futura esposa Fernanda Ruon Maestri, por estar sempre ao meu lado, me aconselhando, me escutando, me distraíndo nos momentos oportunos e principalmente incentivando no processo de elaboração do trabalho de conclusão de curso, que como ela bem sabe, privou nosso tempo em algumas ocasiões.

À esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro com este trabalho, assim como o total apoio, confiança e ética aqui presente.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), pela disponibilidade dada para o uso do laboratório de geotecnia e pavimentação, e em especial para o responsável pelo laboratório, John Neves Braga Santos, me transmitindo conhecimentos essenciais para determinadas etapas do trabalho.

Ao meu orientador, Professor Breno Salgado Barra, pela dedicação, companheirismo e confiança durante a elaboração do presente trabalho.

Aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina, pelos ensinamentos transmitidos, conselhos e disponibilidade para dúvidas que tive ao longo do caminho, em especial ao meu

Aos colegas de curso e de laboratório, em especial Rodrigo Machado e Ramon Fernandes, pelo auxílio e companheirismo sempre demonstrados.

Aos órgãos colaboradores, em especial à equipe do IPPUJ, SEINFRA, ITTRAN, CELESC, Águas Joinville e SC Gás, que não mediram esforços em fornecer informações e ferramentas importantes para a pesquisa.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram em parte para minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho visa dimensionar o pavimento do corredor exclusivo de ônibus dos binários das ruas Dr. João Colin e Blumenau, umas das principais vias da cidade de Joinville-SC, que fazem a ligação entre o terminal Norte e o terminal Central do município. O transporte público coletivo, imprescindível para a vitalidade econômica e social das cidades modernas, vem se mostrando de fundamental importância nos grandes centros urbanos, funcionando como uma alternativa ao transporte particular, visto que o trânsito caótico faz que os condutores percam demasiado tempo trafegando nas vias. No entanto, para que a população opte por este modal, deve-se garantir um transporte eficiente, seguro e com bom nível de conforto, em que se destacam os veículos utilizados e principalmente a condição do pavimento. Nesse contexto, o procedimento adotado para dimensionamento da estrutura será a metodologia americana do Portland Cement Association (PCA), de 1984, consagrado mundialmente no campo da pavimentação. Visando-se obter uma estrutura apta a receber os esforços provenientes do tráfego, foi retirada uma amostra do solo do subleito das vias para um estudo geotécnico, assim como foram estudados materiais provenientes das jazidas da região de Joinville, para compor a estrutura do pavimento. A caracterização dos materiais constituintes da solução de pavimentação foi realizada por meio de ensaios laboratoriais, tais como o de granulometria, compactação Proctor, índice de suporte Califórnia, limites de consistência e massa específica real dos grãos. A compilação dos dados referentes ao estudo e composição do tráfego foram obtidos em parceria com um órgão da Prefeitura de Joinville. Os resultados obtidos indicam que embora haja limitações provenientes da metodologia utilizada, se os princípios de concepção forem adotados corretamente, o pavimento rígido é a alternativa mais viável, perante o aspecto técnico, em pavimentos de corredores de ônibus, resultando numa estrutura capaz de garantir as características básicas do conforto, segurança e economia de custos com a operação dos veículos.

Palavras-chave: Corredores de ônibus. Pavimento rígido. Dimensionamento. Portland Cement Association (1984). Estudos geotécnicos.

ABSTRACT

This study aims to dimensioning the pavement of an exclusive bus lane on the binary of the streets Dr. João Colin and Blumenau, one of the mains streets in the city of Joinville-SC, which makes the connection between the city's North Station and Central Station. The public transportation by bus, essential for the economic and social vitality of modern cities, has proved to be of fundamental importance in major urban centers, acting as an alternative for the particular transport, since the chaotic transit makes the drivers lose a lot of time driving on the streets. However, for the population to choose for this modal, it must ensure an efficient transport, safe and with a good level of comfort, in which highlight the vehicles used for transport and mainly the condition of the pavement. In this context, the procedure adopted for the dimensioning of the structure was the American methodology of the Portland Cement Association (PCA), created in 1894 and globally established in the field of paving. Aiming to obtain a structure that is able to receive the efforts from the traffic, it was taken out a sample of the soil from the subgrade in the street for a geotechnical study, it was also studied materials from deposits in locations surrounding Joinville, with the purpose of compose the structure of the pavement. The characterization of the materials included in the paving solution was made by means of laboratorial tests, such as particle size distribution test, Proctor compaction, California Bearing Ratio, Atterberg limits tests and specific gravity of grains. The compilation of data for the local traffic and the vehicles fleet were obtained in partnership with an organization of the Joinville City Hall. The results shows that although there are limitations on the methodology used, the concrete pavement, if the conceptual principles were correctly adopted, it is the most viable alternative, by the technical aspect, in the pavement of the bus lanes, resulting in a structure that is able to ensure a trilogy of comfort, safety and economy with the operation of the vehicles.

Keyword: Bus lanes. Rigid pavement (Concrete pavement). Dimensioning. Portland Cement Association (1984). Geotechnical studies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Sequência de passos para dimensionamento do pavimento	19
Figura 1.2	- Mapa de Joinville, com o binário destacado a direita	21
Figura 2.1	- Estrutura de um pavimento rígido	26
Figura 2.2	- Absorção dos carregamentos no pavimento flexível e rígido	27
Figura 2.3	- Número de cidades com corredores de ônibus e BRT's por país	28
Figura 2.4	- Tipos de pavimentos rígidos de concreto simples	31
Figura 2.5	- Placa de concreto simples sem barras de transferência	31
Figura 2.6	- Placa de concreto simples com barras de transferência	32
Figura 2.7	- Placa de concreto simples armado descontinuamente	32
Figura 2.8	- Placa de concreto simples armado continuamente	33
Figura 2.9	- Sistema de moldagem sobreposta (a) ou encaixada (b) do pavimento WTUD	35
Figura 2.10	- Tipos de juntas	37
Figura 2.11	- Junta longitudinal de articulação com encaixe macho-fêmea	37
Figura 2.12	- Junta longitudinal de articulação com barras de ligação e encaixe macho-fêmea	38
Figura 2.13	- Junta transversal de retração	39
Figura 2.14	- Junta transversal de retração com barras de transferência	40
Figura 2.15	- Critério de fadiga adotado pelo método PCA/84	42
Figura 2.16	- Curva de desempenho do pavimento segundo método da AASHTO	43
Figura 2.17	- Abordagem fundamental do método Francês	44
Figura 3.1	- Situação de degradação do pavimento dos corredores de ônibus das ruas Blumenau (esquerda) e João Colin (direita)	48
Figura 3.2	- Fluxograma das atividades descritas no capítulo	49
Figura 3.3	- Localização do poço de sondagem	51
Figura 3.4	- Processo de coleta do solo do subleito	52
Figura 3.5	- Solo do subleito	53
Figura 3.6	- Estratigrafia do solo do subleito no poço de sondagem	53
Figura 3.7	- Curva granulométrica do subleito	54

Figura 3.8	- Curva de compactação do subleito na energia normal (a) e intermediária (b)	57
Figura 3.9	- Curva CBR do subleito (Energia Normal)	59
Figura 3.10	- Curva CBR do subleito (Energia Intermediária)	59
Figura 3.11	- Solo argiloso	60
Figura 3.12	- Curva granulométrica do solo argiloso	61
Figura 3.13	- Limite de Liquidez do solo argiloso	62
Figura 3.14	- Mistura do solo argiloso com areia descartada de fundição	65
Figura 3.15	- Curva granulométrica da mistura argila-ADF	66
Figura 3.16	- Limite de liquidez da mistura argila-ADF	67
Figura 3.17	- Saibro arenoso	71
Figura 3.18	- Curva granulométrica do saibro com a faixa granulométrica A do DNIT	72
Figura 3.19	- Fibra de Polipropileno	77
Figura 4.1	- Esquema da estrutura do pavimento	82
Figura 4.2	Seção transversal do pavimento da rua Blumenau	85
Figura 4.3	- Análise de fadiga (número de repetições admissível em função do fator de fadiga, com ou sem acostamento)	88
Figura 4.4	- Análise de erosão (número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão, sem acostamento de concreto)	89
Figura 4.5	- Estrutura final do pavimento rígido	90
Figura 4.6	Esquema das placas de concreto	91
Figura 4.7	- Juntas de encontro (a) e junta transversal de retração com barras de transferência (b)	93
Figura 4.8	Forma do reservatório do selante	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Espaçamento recomendado entre as juntas transversais	39
Tabela 3.1	- Massa específica real dos grãos do subleito	56
Tabela 3.2	- Especificações do ensaio de compactação Proctor	56
Tabela 3.3	- Resultado da compactação Proctor do solo do subleito	58
Tabela 3.4	- Resultado da expansão do solo do subleito para energia normal e intermediária	58
Tabela 3.5	- Resultado do CBR do subleito	59
Tabela 3.6	- Limite de plasticidade do solo argiloso	62
Tabela 3.7	- Índice de plasticidade do solo argiloso	63
Tabela 3.8	- Massa específica real dos grãos do solo argiloso	63
Tabela 3.9	- Resultado da compactação, CBR e expansão do solo argiloso	64
Tabela 3.10	- Limite de plasticidade da mistura argila-ADF	67
Tabela 3.11	- Índice de plasticidade da mistura argila-ADF	68
Tabela 3.12	- Massa específica real dos grãos da mistura argila-ADF	68
Tabela 3.13	- Resultado da compactação, CBR e expansão do solo argiloso e mistura de argila com ADF para energia intermediária de compactação Proctor	69
Tabela 3.14	- Faixas granulométricas recomendadas para sub-bases granulares	71
Tabela 3.15	- Massa específica real dos grãos do saibro	73
Tabela 3.16	- Resultado da compactação, CBR e expansão do saibro	74
Tabela 3.17	- Classificação TRB dos solos - AASHTO	75
Tabela 3.18	- Resultados dos ensaios de ruptura dos corpos de prova aos 28 dias	78
Tabela 4.1	- Frota de ônibus do transporte coletivo em Joinville	80
Tabela 4.2	- Determinação do número N (Rua Blumenau)	81
Tabela 4.3	- Aumento de k devido à presença de sub-base granular	83
Tabela 4.4	- Fatores de segurança para as cargas	84
Tabela 4.5	- Resultado do N° de repetições previstas e da carga por eixo	85
Tabela 4.6	- Dimensionamento do pavimento de Concreto (PCA/84)	86
Tabela 4.7	- Especificações para barra lisa de transferência (Aço CA-25)	92

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	- Areia Descartada de Fundição
ANTT	- Agência Nacional de Transporte Terrestre
ASTM	- American Society for Testing and Materials
BGS	- Brita Graduada Simples
BRT	- Bus Rapid Transit
CA	- Concreto Asfáltico
CBR	- California Bearing Ratio
CCR	- Concreto compactado com rolo
CNT	- Confederação Nacional dos Transportes
DENATRAN	- Departamento Nacional de Trânsito
DER/SP	- Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FC/FE/FR	- Fator de Carga, Fator de Eixo e Fator Climático Regional
FSc	- Fator de Segurança de Carga
FWD	- Falling Weight Deflectometer
HRB	- Highway Research Board
IPPUJ	- Instituto de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de Joinville
IDm	- Índice de Desgaste após Compactação Marshall sem Ligante
IG	- Índice de Grupo
IP	- Índice de Plasticidade
ISC	- Índice de Suporte Califórnia
ITDP	- Institute for Transport and Development Policy
ITTRAN	- Instituto de Trânsito e Transporte de Joinville
LCPC	- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LL	- Limite de Liquidez

LP	- Limite de Plasticidade
N	- Número de Operações do Eixo Padrão
NP	- Não Plástico
NBR	- Norma Brasileira
PAC	- Programa de Aceleração do Crescimento
PCA/84	- Portland Cement Association 1984
PIB	- Produto Interno Bruto
PP	- Polipropileno
PSI	- Present Serviceability Index (Índice de Serventia)
PR	- Paraná
SC	- Santa Catarina
SEINFRA	- Secretaria de Infraestrutura Urbana
SETRA	- Sérvíce d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
TRB	- Transportation Research Board
UDESC	- Universidade do estado de Santa Catarina
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
VMDA	- Volume Médio Diário Anual
WTUD	- Whitetopping Ultra Delgado

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	-	Centímetro
$F_{ctm,k}$	-	Resistência característica do concreto à tração na flexão
G	-	Massa específica real dos grãos
g	-	Gramas
MPa	-	Mega Pascal
m	-	Metro
mm	-	Milímetro
k	-	Coefficiente de recalque
R_t	-	Relação de tensões
T	-	Temperatura
t	-	Espessura
ton	-	Tonelada
W	-	Peso
w	-	Umidade
y_D	-	Massa específica máxima
y_T	-	Massa específica da água (g/cm^3)

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xii

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	16
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	18
1.4. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA.....	20
1.5. PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	22
1.6. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	24

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS DO PAVIMENTO RÍGIDO	25
2.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CORREDORES DE ÔNIBUS	27
2.2.1. Sistema atual dos corredores de ônibus em Joinville-SC.....	30
2.3. TIPOS DE PAVIMENTO RÍGIDO	31
2.3.1. Concreto simples de cimento Portland.....	31
2.3.2. Whitetopping	33
2.3.3. Whitetopping Ultradelgado de concreto (WTUD)	35
2.3.4. Macadame Cimentado	36
2.3.5. Tipos de juntas	36

2.4. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO	41
2.4.1. PCA 1984	41
2.4.2. Método AASHTO 1993	43
2.4.3. Método Francês	44
2.5. PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS DO PAVIMENTO RÍGIDO	45

CAPÍTULO 3

MATERIAIS ESTUDADOS E MÉTODOS.....	47
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	47
3.2. MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS	47
3.2.1. Subleito	51
3.2.1.1. Procedimento de Coleta e Armazenamento do solo	51
3.2.1.2. Granulometria do solo	54
3.2.1.3. Limites de Consistência (LL e LP).....	55
3.2.1.4. Massa Específica Real dos Grãos.....	55
3.2.1.5. Ensaio de Compactação (Proctor)	56
3.2.1.6. Índice de Suporte Califórnia e Expansão	58
3.2.2. Argila (Reforço)	60
3.2.2.1. Granulometria do solo	60
3.2.2.2. Limites de Consistência (LL e LP).....	61
3.2.2.3. Massa Específica Real dos Grãos	63
3.2.2.4. Compactação Proctor, CBR e expansão do solo	63
3.2.2.5. Considerações à utilização do solo argiloso.....	64
3.2.3. Mistura de Argila com Areia Descartada de Fundação (Reforço)	65
3.2.3.1. Granulometria do solo	65
3.2.3.2. Limites de Consistência (LL e LP).....	66
3.2.3.3. Massa Específica Real dos Grãos	68
3.2.3.4. Compactação Proctor, CBR e expansão do solo	68
3.2.3.5. Considerações à utilização do solo argiloso.....	69
3.2.4. Saibro Arenoso (Sub-base)	70
3.2.4.1. Granulometria do solo	71
3.2.4.2. Limites de Consistência (LL e LP)	73
3.2.4.3. Massa Específica Real dos Grãos	73
3.2.4.4. Compactação Proctor, CBR e expansão do solo	74

3.2.4.5. Considerações acerca do saibro	74
3.3. CLASSIFICAÇÃO TRB DOS SOLOS	75
3.4. CONCRETO (REVESTIMENTO)	76
3.4.1. Traço do concreto	77

CAPÍTULO 4

DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO	79
4.1 ESTUDO DO TRÁFEGO.....	79
4.2. DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DO PAVIMENTO RÍGIDO	82
4.2.1. Revestimento (Concreto de Cimento Portland)	83
4.3. PROJETO DE JUNTAS.....	91
4.3.1. Selagem das juntas.....	93

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO	95
------------------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
---	----

ANEXOS	101
---------------------	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde a criação das cidades e conglomerados populacionais, sempre foi de grande importância para a sociedade os deslocamentos entre diferentes regiões como forma de sobrevivência, integração social, questão econômica, cultural e política. Um dos principais meios pelos quais são realizados esses deslocamentos é pelo intermédio de estradas, sendo o pavimento uma forma de aprimorar essas estradas e conseqüentemente o transporte rodoviário.

Como todo sistema de transporte, o rodoviário necessita de certa infraestrutura para ser utilizado, que se traduz na construção de estradas e vias urbanas que possibilitem o seu uso pelos veículos, garantindo os deslocamentos diários da população com bons níveis de conforto e segurança.

A tecnologia empregada a estes pavimentos é intensamente relevante com relação a qualidade e aos custos derivados do mesmo. Dentro deste contexto o trabalho foca no pavimento dos corredores exclusivos de ônibus utilizando a solução em pavimento rígido, num binário na cidade de Joinville-SC, responsável diariamente por movimentar um grande número de pessoas.

Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO (2010), o pavimento rígido é ideal para vias que apresentam como características tráfego intenso, pesado e repetitivo, caso dos corredores de ônibus. Com base em dados da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2012), conhecida como ABCP, na cidade de São Paulo-SP, há mais de 190 quilômetros de corredores de ônibus construídos com pavimento de concreto, o maior valor considerando todas as cidades Brasileiras. Já em Curitiba-PR, uma cidade reconhecida mundialmente pela sua eficiência no transporte urbano coletivo, com sistema integrados e BRT's, esse valor passa da casa dos 90 quilômetros.

Estes dados, embora significantes, não representam a preferência deste tipo de pavimento no Brasil em relação aos demais. De acordo com MESQUITA (2001), os pavimentos de concreto têm sido amplamente utilizados nas estradas de primeira

categoria e em vias urbanas de alto tráfego de muitos países, como Japão, Alemanha, Itália e Inglaterra, em que aproximadamente 50% das estradas são de concreto. Enquanto que no Brasil, conforme relatório da ANTT (2014), as estradas de concreto não representam nem 5% do total.

Ainda de acordo com MESQUITA (2001), no Brasil os pavimentos de concreto não tiveram um desenvolvimento contínuo, com um crescimento no início dos anos 90 e um estancamento relativo entre 1960-1990, com pouco desenvolvimento e utilização do mesmo. Já nos últimos anos houve novamente um crescimento considerável, motivado, entre outros fatores, pelo aumento do preço de petróleo.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é realizar um projeto de pavimentação com uso da metodologia americana do Portland Cement Association (PCA 1984) de pavimentos rígidos, compreendendo um estudo de caso aplicado aos corredores de ônibus do binário das ruas Dr. João Colin e Blumenau, na cidade de Joinville, Santa Catarina. O intuito é dimensionar a estrutura do pavimento necessária para que o mesmo suportar as cargas solicitantes de projeto.

1.2.2 Objetivos específicos

Para o alcance do objetivo geral deste trabalho são traçados os seguintes objetivos específicos:

- Reconhecimento da via que será objeto de estudo neste trabalho, definindo suas características, condições do pavimento atual e possíveis locais para se realizar a prospecção do solo natural;
- Realizar os estudos de caracterização geotécnica do subleito existente;
- Adquirir informações com os órgãos competentes sobre o tráfego presente na via, com o objetivo de determinar o número de operações do eixo padrão (N);

- Verificar a existência de solos (jazidas) presentes na região do estudo com potencial para ser utilizado no projeto do pavimento, por meio de comprovação da sua aceitação no projeto via ensaios laboratoriais e de caracterização;
- Dimensionar a estrutura do pavimento, utilizando como solução o pavimento rígido, tendo como referências o método da Portland Cement Association, de 1984, que é um modelo mundialmente consagrado na área de pavimentação;
- Repassar os resultados obtidos neste estudo para a Prefeitura de Joinville-SC, visando auxiliar a mesma e oferecer uma possível alternativa para o dimensionamento do pavimento da via em questão.

1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS

Para o dimensionamento do pavimento do corredor de ônibus, primeiramente foi definido o local o qual se realizaria o mesmo, assim como possíveis pontos abertura de poços de sondagem, afim de realizar um estudo geotécnico dos elementos do solo, cujo os objetivos principais são reconhecimento do subleito e estudo de ocorrências de materiais para pavimentação.

O conhecimento do solo é indispensável num projeto de um pavimento rodoviário, e o mesmo deve ser muito bem caracterizado, identificado e quantificado de acordo com suas características físicas e mecânicas, visto que a espessura final do pavimento, assim como os tipos de materiais a serem empregados são função das condições do subleito.

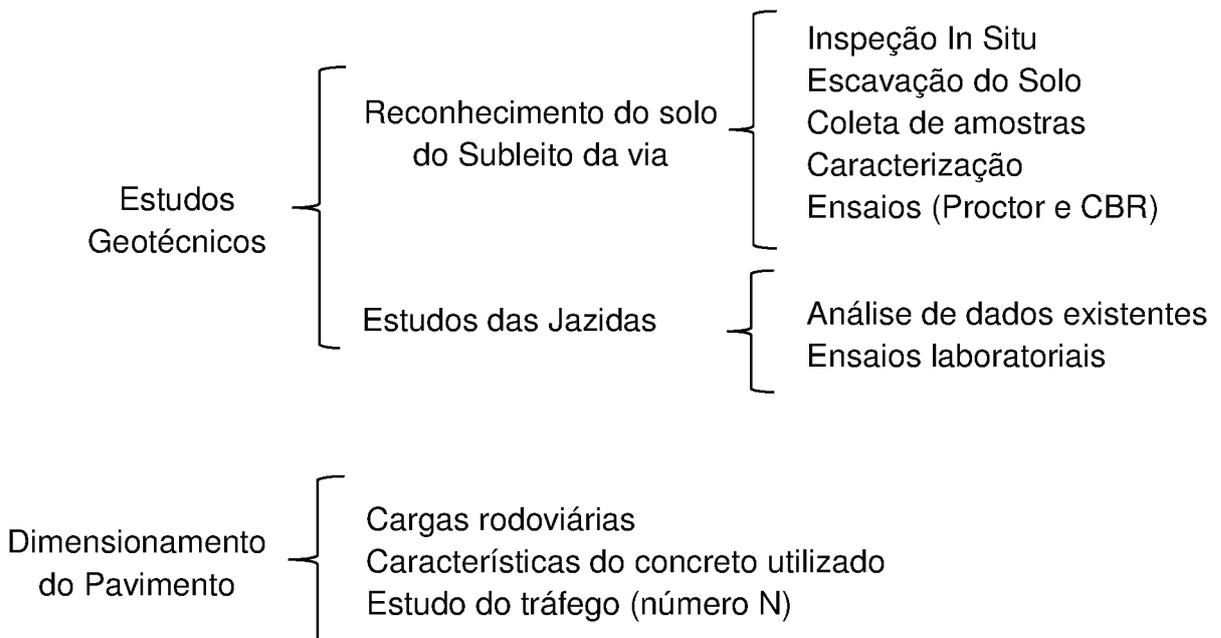
Para a caracterização do solo da via de estudo, inicialmente foram utilizados métodos in situ, com análise tátil visual, com a escavação e a coleta de amostras, que posteriormente foram levadas ao laboratório, onde foram realizados ensaios de Compactação Proctor, Índice de Suporte California (CBR), limites de consistência, granulometria e massa específica dos grãos. Com os estudos finalizados, foi possível a obtenção de dados pertinentes para o solo de fundação, que serão utilizados no projeto de dimensionamento do pavimento.

Com o conhecimento das características do subleito da via, o próximo passo foi o estudo das ocorrências de materiais para pavimentação, onde foram feitos estudos específicos nas jazidas da região próxima a construção da via, sendo analisado seu

possível emprego na construção das camadas do pavimento (regularização do subleito, reforço, sub-base, base e revestimento). A verificação dos materiais dos materiais foi feita a partir de dados geotécnicos e ensaio laboratoriais pertinentes, de acordo com as normas do DNIT (2010), DNER (1996), ABCP (2010) e PCA (1984). A escolha de materiais competentes, que se localizem em jazidas próximas a região da obra pode causar um grande impacto financeira na obra de pavimentação, diminuindo os custos da movimentação e do transporte destes solos.

O último passo é o dimensionamento do pavimento, que envolve alguns parâmetros importantes que precisam ser calculados, como as características do concreto (principalmente a resistência a tração na flexão) a ser utilizado e o estudo do tráfego, que é utilizado para determinação do número de operações do eixo padrão (N), além de outros estudos referentes as cargas transmitidas dos veículos para o pavimento. De posse de todos os parâmetros efetuou-se o dimensionamento do pavimento rígido do corredor de ônibus, utilizando o método PCA 1984, especificando os materiais utilizados e as espessuras finais das camadas. A figura 1.1 mostra a seqüência de passos utilizados para atingir o objetivo.

Figura 1.1 – Sequência de passos para dimensionamento do pavimento



Fonte: Autor

1.4. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

Para o trabalho em questão foi firmado um convênio com o IPPUJ (Fundação Instituto de pesquisa e planejamento para o desenvolvimento sustentável de Joinville), visto que o mesmo já tem projetos propostos para implantação e melhorias em corredores de ônibus para vários trechos da cidade de Joinville. O convênio prevê o fornecimento de dados, parâmetros e projetos desses corredores, afim viabilizar o dimensionamento do pavimento do mesmo.

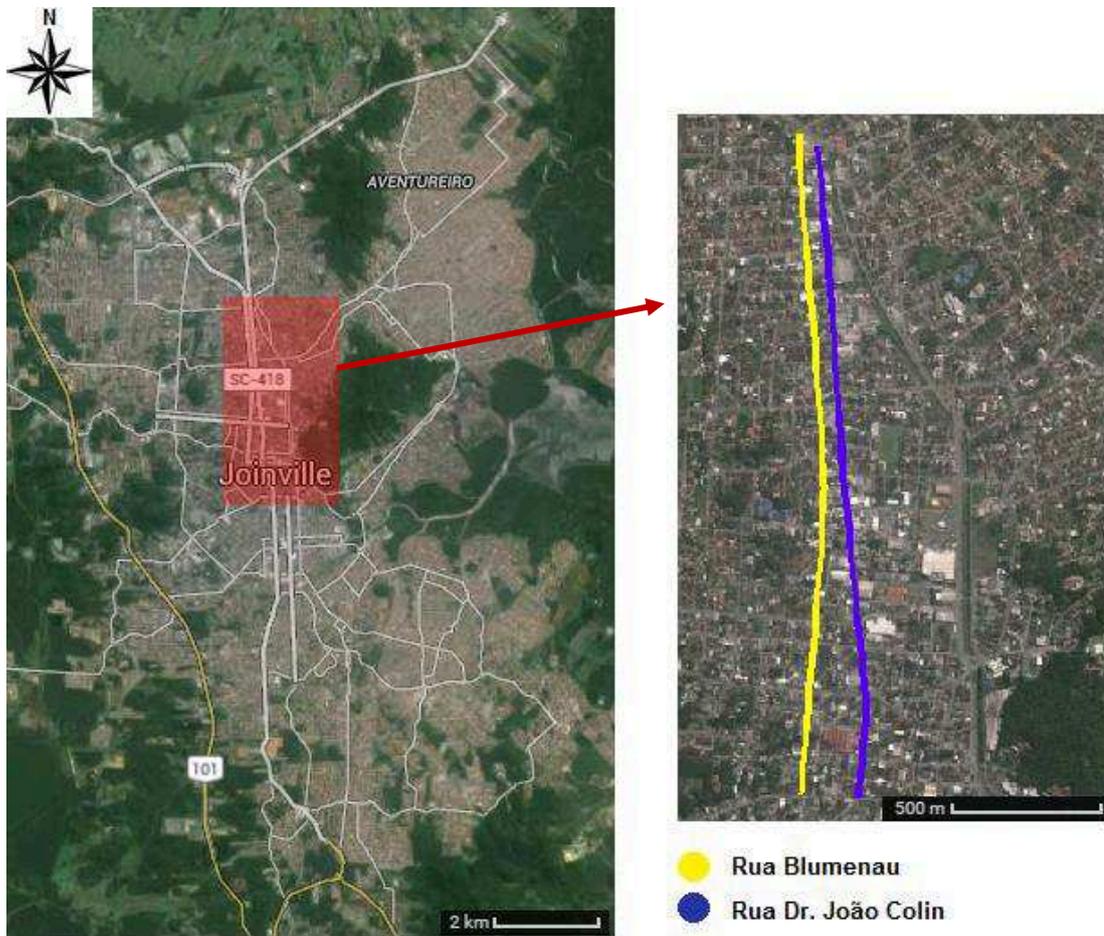
Em conjunto com o órgão foi determinado que o local será o binário das ruas João Colin e Blumenau, na cidade de Joinville, visto que essas ruas são duas das principais da cidade, fazendo ligação do eixo Norte-Centro do município. Segundo o novo projeto do IPPUJ, este binário é o único da cidade em que se prevê a utilização de pavimento rígido para toda a extensão das vias.

Com a via já definida, o próximo passo foi a escolha do local onde seria feita a investigação do solo, com a escavação e retirada de amostras do subleito. Visto que o binário são duas das principais vias da cidade, e o trânsito no local é intenso durante praticamente todo o dia, foi definido junto com o IPPUJ, ITTRAN (Instituto de trânsito e transporte de Joinville) e SEINFRA (Secretaria de infraestrutura urbana de Joinville) a abertura de um único ponto no pavimento para investigação do solo. O ponto escolhido foi o cruzamento das ruas Blumenau e Humberto Campos, na zona norte de Joinville, na lateral da pista, com intuito de causar a menor interferência possível no trânsito e no comércio local.

De acordo com os órgãos da prefeitura citados anteriormente, este ponto seria suficiente para fazer a caracterização do solo do binário, já que, segundo estes órgãos, em estudos anteriores, foi comprovado que não existem grandes alterações no solo no decorrer da extensão de ambas as vias.

Como foi necessário a remoção do pavimento flexível existente no local para investigação do solo, foram consultadas algumas empresas da cidade de Joinville, como a CELESC, Águas Joinville e SC Gás, afim de se ter um conhecimento sobre tubulações e fiações existentes na estrutura abaixo da via, aonde seria escavado o pavimento. A figura abaixo mostra o mapa da cidade de Joinville-SC, onde está destacado a direita o binário das ruas Dr. João Colin e Blumenau.

Figura 1.2 – Mapa de Joinville, com o binário destacado a direita



Fonte: Autor

Os outros materiais estudados e utilizados no projeto do pavimento são provenientes de jazidas e empresas de pavimentação localizadas na região Metropolitana de Joinville, além de solos previamente estocados no laboratório de mecânica dos solos da UFSC, Campus Joinville, os quais foram utilizados em outros estudos desta Universidade. A pedido dos responsáveis, não foram citados nominalmente neste trabalho o nome dessas empresas que cederão os solos, atendo-se em denomina-los de acordo com o tipo do material, como argila, saibro, areia descartada de fundição etc.

Os ensaios pelos quais os materiais provenientes das jazidas foram submetidos, para verificação das características e aceitação na solução de pavimentação, foram realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), ambas na cidade de Joinville.

1.5. PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA DO TEMA

O pavimento é uma estrutura constituída de diversas camadas de diversos materiais em um espaço semi-infinito, cujo principal objetivo é resistir as ações contínuas aplicadas ao mesmo, além de ações externas causadas pelo meio ambiente (DNIT, 2006). O bom desempenho dessa estrutura do pavimento deve garantir as características básicas de conforto, segurança e economia.

O grande problema associado não somente aos corredores e faixas exclusivas de ônibus nos centros urbanos, como nas vias em geral, é a má qualidade dos pavimentos, resultando, entre outros, na perda da segurança e obras de reparo e manutenção não previstas.

Segundo o relatório anual da pesquisa da CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (2013) acerca das rodovias brasileiras, dos pouco mais de 96 mil quilômetros avaliados, verificou-se que 53,1% dos trechos pesquisados apresentam condições satisfatórias (ótimo ou bom) em relação ao estado geral do pavimento. Ainda de acordo com o estudo, apenas 34,9% apresentaram condição da superfície do pavimento totalmente perfeito, sendo a maioria da malha (65,1%) já desgastada, com trincas e remendos ou totalmente deterioradas.

Corredores e faixas exclusivas de ônibus muitas vezes são implantados a partir de vias destinadas anteriormente para tráfego normal de veículos, ou seja, os veículos de passeio segundo a classificação do DNIT (2006), sem nenhum reforço do pavimento ou do subleito. Deve-se levar em consideração o fato de veículos pesados, como ônibus, solicitarem mais o pavimento, devido ao seu maior peso por eixo, necessitando de camadas de base e revestimento mais espessas do que camadas destinadas ao tráfego de veículos de passeio.

Outra questão que merece atenção é o fato da metodologia utilizada para dimensionamento de pavimentos no Brasil ser antiga e baseada em formulações empíricas, em que os ensaios realizados no laboratório não representam o que acontece no campo. Como resultado de um mal dimensionamento, perde-se as características básicas do pavimento. As patologias presentes na estrutura podem provocar acidentes, afetando a segurança da via, além de causar gastos com reparo e manutenção dos veículos.

No Brasil muito pouco foi desenvolvido a respeito de pavimentos rígidos e flexíveis, se comparados a países como a França, que é uma das referências na área. A metodologia nacional é baseada e adaptada do modelo dos Estados Unidos, principalmente da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). A objeção em relação a utilização do modelo americano no Brasil é o fato de o país da América do Norte possuir diferentes tipos de solo, relevo, condições climáticas (períodos com neve por exemplo) e frota veicular, se comparado ao nosso país, resultando em pavimentos que podem não ser os ideais para o determinado local o qual ele foi implantado.

Pela questão técnica, este trabalho irá analisar a escolha do pavimento rígido para um corredor de ônibus em via específica, podendo os resultados servirem como base para outros estudos em regiões semelhantes. No Brasil, apesar de existir uma alta tendência histórica pelo uso de pavimentos flexíveis, o uso do concreto nas vias tem crescido na última década e se mostrado uma boa alternativa para vias de tráfego lento e pesado, como é o caso dos corredores de ônibus.

O tema também se mostra importante pelo fator econômico, devido aos altos custos envolvidos na área de infraestrutura urbana e pavimentação de vias. Com o dimensionamento e a execução da obra realizadas de forma correta, garante-se uma longa vida útil sem necessidade de gastos com reparo e manutenção, que podem representar até 80% do custo total da obra.

A economia em manutenção, tanto do pavimento, quanto dos veículos utilizados, está entre as principais vantagens ao usuário com relação a uma pavimentação de qualidade, visto que os recursos para implantação e manutenção das vias vem de impostos cobrados do mesmo (NETO, 2011). Portanto, como resultado de vias bem construídas, a sociedade usufrui de mais segurança, conforto e economia, aumentando assim a qualidade de vida do país.

1.6. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

- Capítulo 1** - Introduz o tema, abordando aspectos gerais do mesmo, além de apresentar o esqueleto do trabalho, de forma a manter o leitor integrado a respeito do objetivo da pesquisa.
- Capítulo 2** - Aborda toda a fundamentação teórica julgada necessária para a formatação do trabalho, como considerações gerais do pavimento rígido, tipos de pavimento rígido, tipos de juntas, métodos de dimensionamento do pavimento rígido, procedimentos executivos e outros. Também está presente no capítulo as características gerais dos corredores de ônibus, assim como a situação atual dos mesmos e do transporte coletivo em Joinville-SC.
- Capítulo 3** - Discorre sobre os materiais e métodos utilizados, abordando os estudos realizados na via escolhida para se dimensionar o pavimento, como os ensaios executados para a caracterização do solo e a verificação de dados pertinentes acerca do solo natural do local. Neste capítulo também são analisados os potenciais materiais provenientes de jazidas que podem ser utilizados na solução de pavimentação, mediante aceitação dos mesmos nos ensaios, e também estudos sobre o concreto utilizado para dimensionamento.
- Capítulo 4** - Este capítulo é destinado ao dimensionamento da solução de pavimentação, empregando a metodologia do PCA 1984, onde serão determinados parâmetros necessários para o dimensionamento, como o estudo do tráfego relacionado à frota circulante na via em estudo, para fins de determinação do número de operações do eixo padrão (N) e parâmetros do concreto. O capítulo também aborda o detalhamento das juntas e do reservatório de selante na estrutura.
- Capítulo 5** - Apresenta ao leitor as conclusões provenientes da pesquisa, assim como recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS DO PAVIMENTO RÍGIDO

Segundo o DNIT (2006), o pavimento de uma rodovia é uma superestrutura constituída de sistema de camadas de espessura finita, assentes sobre uma camada teoricamente infinita, a qual é designada de subleito. Já de acordo com SANTANA (1993), pavimento é uma estrutura executada sobre uma outra obtida pelos serviços de terraplenagem, com a função de fornecer segurança e conforto para o usuário, que devem ser obtidos pela engenharia, ou seja, com o melhor custo benefício possível. A estrutura deverá estar apta a receber os esforços proveniente do tráfego e distribuí-los através de suas camadas até o subleito.

O pavimento rodoviário tradicionalmente é classificado entre três tipos: rígidos, semirrígidos e flexíveis. Mais recentemente há uma tendência em usar a nomenclatura de concreto de cimento Portland (ou ainda concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, para indicar qual tipo de revestimento é o utilizado (BERNUCCI *et al.*, 2008). Destes pavimentos, apenas o rígido será tratado neste trabalho.

O pavimento rígido é, conforme DNIT (2006), aquele que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores, absorvendo praticamente todo carregamento imposto a estrutura. Segundo PITTA (1989), esta nomenclatura tem sido empregada para denominar uma placa de concreto simples, com ou sem barras de ligação, ou mesmo de concreto armado, com alta resistência, que distribui ao subleito os carregamentos provenientes das cargas aplicadas na superfície, tendo como elemento de contribuição uma camada intermediária denominada sub-base, com características estruturais semelhantes a base de um pavimento flexível.

Ainda de acordo com BERNUCCI *et al.* (2008), os pavimentos de concreto cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto em cimento Portland, com a espessura fixada em função da resistência a flexão das placas e das resistências das camadas subjacentes. No Brasil, além da rodovia estadual Anchieta (SP-150), uma das principais rodovias do país com revestimento rígido, que liga a cidade de São Paulo à baixada santista, um outro exemplo relevante atual de via de

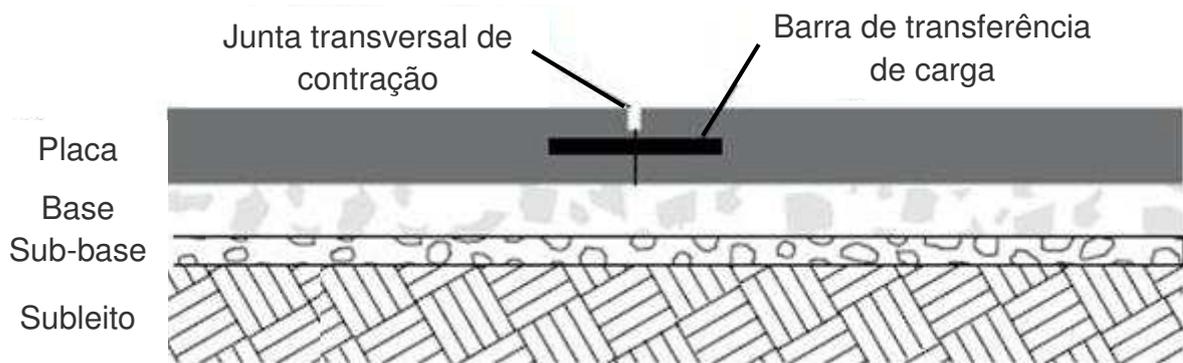
concreto é o Rodoanel da cidade de São Paulo, que será uma via expressa com 161 quilômetros de extensão e duas pistas de 3 a 4 faixas de rolamento por sentido. A obra ainda está em andamento e prevista para encerrar em 2016.

O uso de concreto na pavimentação de vias está se tornando cada vez mais comum, visto suas vantagens em relação ao flexível para tráfegos pesado e intenso. De acordo com BAUER (1995), a flexibilidade da estrutura dos pavimentos flexíveis com o carregamento sujeita a deformações permanentes, por isso as rodovias e vias urbanas com tráfego intenso ou tráfego pesado e lento devem ser construídas de concreto, porque não deformam.

O concreto oferece maior aderência dos pneus em relação ao asfalto, diminuindo a possibilidade de acidentes, além de ser impermeável, impedindo a infiltração de água e formação de buracos na estrutura (MESQUITA, 2001).

Em relação a estrutura do pavimento, as vias de concreto típicas apresentam base, subleito e as placas de concreto, com juntas transversais e longitudinais, cuja função é a transferência de carga de uma placa para a outra. A figura 2.1 mostra o esquema típico deste tipo de pavimento.

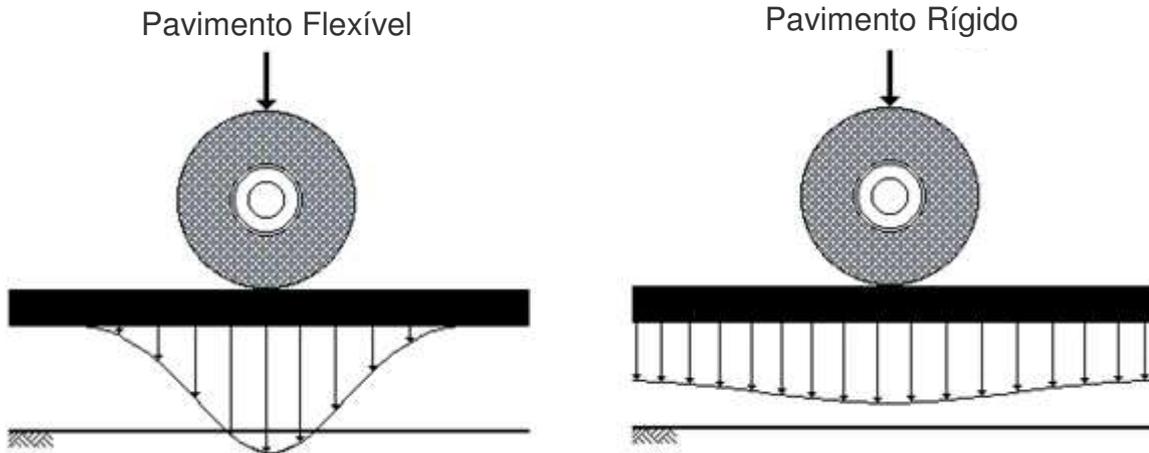
Figura 2.1 - Estrutura de um pavimento rígido.



FONTE: BALBO (2009, p.120).

Conforme a CANADIAN CEMENT ASSOCIATION (2000), o pavimento rígido reage de forma diferente ao flexível à carga imposta pelo pneu em relação a distribuição nas camadas. No pavimento rígido, as placas de concreto absorvem quase todo carregamento, sendo o subleito estruturalmente menos vulnerável a cargas pesadas, assim como mostrado na figura 2.2.

Figura 2.2 – Absorção dos carregamentos no pavimento flexível e rígido



Fonte: BALBO (1993 apud SIAN, 2007, p.10)

De acordo com um compilado de informações de MESQUITA (2001), as principais características dos pavimentos rígidos são:

- Matéria prima em abundância na natureza e com características bem definidas;
- Grande vida útil (mais de 20 anos), com pouca manutenção até esse período;
- Qualidade do pavimento é mantida ao longo dos anos;
- É praticamente impermeável, e tem um melhor escoamento da água superficial;
- Boa reflexão da luz, com maior distância de visibilidade horizontal.

2.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CORREDORES DE ÔNIBUS

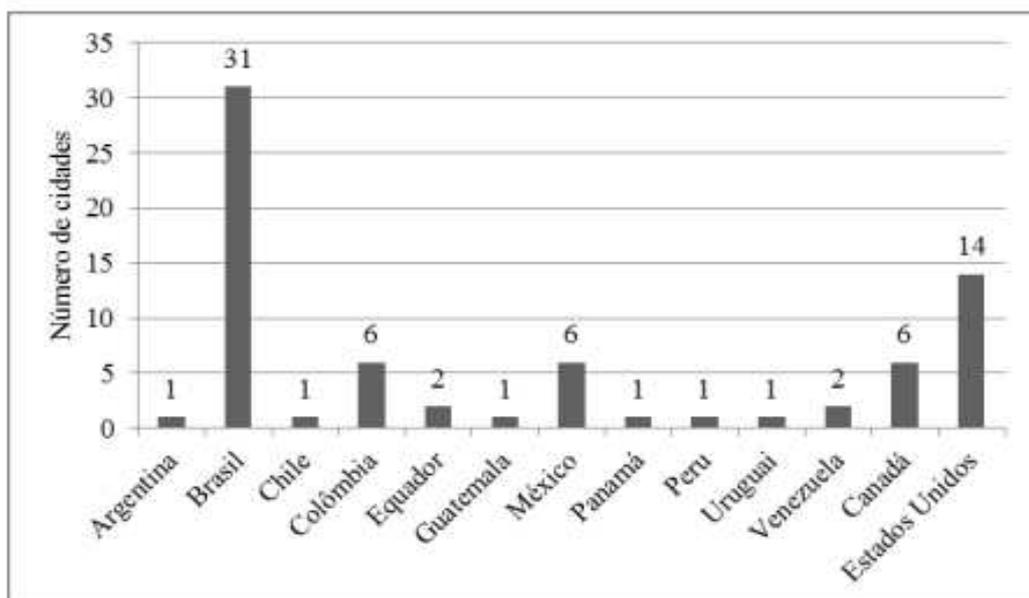
Devido aos problemas com engarrafamentos e trânsito caótico enfrentado por grandes centros urbanos, um transporte público eficiente é vital para o desenvolvimento. Significativa parte da população tem no transporte público a única maneira para acessar o emprego, educação e serviços públicos. Segundo pesquisa da ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES URBANOS (2013), apenas 0,11% do sistema viário recebe qualquer tipo de tratamento no sentido de priorizar o transporte público por ônibus, fato este que pode explicar em parte os grandes congestionamentos nas médias e grandes cidades.

É importante ressaltar as diferenças entre os sistemas que dão certo nível de prioridade aos ônibus, onde se destacam os corredores de ônibus e os BRT's (Bus Rapid Transit). Corredores de ônibus são faixas destinadas a circulação exclusiva e em período integral, incluindo desde as localizadas no centro da pista até as paralelas ao meio fio delimitadas por pintura (LINDAU *et al.*, 2013).

Já o BRT é um sistema de transporte de massa por meio do ônibus que proporciona mobilidade e conforto com um custo eficiente, aliando a qualidade do transporte ferroviário, devido ao número elevado de passageiros, com a flexibilidade do sistema de ônibus, onde os corredores se encontram na parte central da via, separados das vias destinadas ao tráfego comum (WRIGHT e HOOK, 2008). Os corredores de ônibus muitas vezes são precedentes dos BRT's. O BRT conta com velocidades mais altas, sistemas de pré-pagamento de tarifas, faixas que permitam ultrapassagem e corredores na parte central da via, garantindo mobilidade ao sistema.

O primeiro BRT completo no mundo foi o sistema de Curitiba, que teve origem com corredores de ônibus segregados (1974), e após instalação de sistema de pré-pagamento de tarifas e adoção de ônibus articulados, se tornou um sistema completo em 1992, servindo de modelo à várias outras cidades no mundo (WRIGHT e HOOK, 2008). Apesar da má qualidade do pavimento, o Brasil se destaca no número de cidades com sistemas prioritários a ônibus, como mostrado na figura a seguir.

Figura 2.3 - Número de cidades com corredores de ônibus e BRT's por país



FONTE: (LINDAU, et al., p.5, 2013)

A literatura que mais se destaca a nível nacional em relação ao planejamento do transporte coletivo é o Manual do BRT, publicado em língua portuguesa em uma parceria entre Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana e o *Institute for Transport and Development Policy* (ITDP). O material serve como um guia de planejamento para sistemas eficientes de ônibus, os BRT'S, de forma a detalhar os passos para planejamento e realização de um sistema bem-sucedido.

Essas áreas de planejamento incluem a preparação do projeto, projeto operacional, projeto físico, integração, plano de implementação e avaliação e implementação. Abaixo encontra-se um trecho do manual do BRT, que pode ser considerado um guia de planejamento de vias para corredores de ônibus e BRT's.

Este Manual de BRT se concentrará, na maior parte, sobre sistemas atendendo aos padrões descritos para "BRT" com o objetivo de promover sistemas de "BRT's completos". Entretanto, também se reconhece que existem sistemas de transportes de qualidade que não alcançam completamente a definição de um BRT. Há cidades que implementaram corredores básicos de vias de ônibus que, embora não alcancem o padrão de desempenho e conforto de um BRT, ajudam a melhorar os tempos de viagens dos residentes. Em muitos casos, esses sistemas de faixas exclusivas antecederam o BRT e contribuíram imensamente para o desenvolvimento do conceito BRT (WRIGHT e HOOK, 2008, p.18).

Para o dimensionamento dos pavimentos rígidos, são usadas comumente duas metodologias para o dimensionamento da estrutura, o PCA 84 (Portland Cement Association) e o AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Ambos métodos são utilizados independentemente dos tipos de veículos, entretanto em vias exclusivas de ônibus a espessura das camadas, como da placa de concreto, tendem a ser maior se comparado a um pavimento destinado ao tráfego normal de veículos de passeio, assim como sua resistência.

A diferença entre o dimensionamento de estruturas destinadas ao tráfego comum, por exemplo, é em relação ao valor do número N. Segundo DNIT (2006) o pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo simples, tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido. Como o peso de um ônibus por eixo é superior ao peso do eixo de um veículo de passeio, o número (N) vai ser conseqüentemente maior, resultando em uma maior espessura das camadas, e conseqüentemente da estrutura do pavimento.

2.2.1. Sistema atual dos corredores de ônibus em Joinville-SC

A cidade de Joinville, localizada no norte do Estado de Santa Catarina, tem uma população de pouco mais de 546 mil habitantes, segundo dados do IPPUJ (2014), sendo portanto considerada a maior cidade do estado, e uma das maiores do sul do Brasil. Devido aos problemas de mobilidade, típicos de cidades brasileiras de médio e grande porte, e de programas de incentivo do governo, como o PAC mobilidade, a cidade vem investindo em corredores de ônibus, ciclo faixas e sistemas integrados.

De acordo com o CIDADE EM DADOS, do IPPUJ (2014), 26,48% dos deslocamentos na cidade de Joinville são feitos por ônibus de linha, a qual conta com 10 estações, operadas por 226 linhas regulares. Em relação ao pavimento, cerca de 95% dos itinerários já ocorrem sobre vias pavimentadas, totalizando mais de 44 milhões de passageiros transportados no ano de 2013.

Ainda referente aos dados do IPPUJ (2014), a cidade de Joinville tem cerca de 14,3 quilômetros de vias exclusivas para ônibus, sendo que 151 ônibus (43% da frota total) já trafegam nessas faixas exclusivas, transportando cerca de 110 mil passageiros por dia (73% do total). A implantação dessas faixas de ônibus no município aumentou a velocidade média dos mesmos de 12 para 25 km/h nas horas de pico nos eixos e de 4 para 20 km/h na área central da cidade.

Acerca do futuro próximo para a cidade, o projeto PAC 2 Mobilidade Médias Cidades, criado pelo governo Federal para melhorar o trânsito nas cidades com população entre 250 mil e 700 mil habitantes, foi aprovado em março de 2013 para obras de melhoria do sistema e implantação de faixa exclusivas de ônibus, com conclusão prevista para 2016 (JORNAL ANOTÍCIA, 10/12/2013).

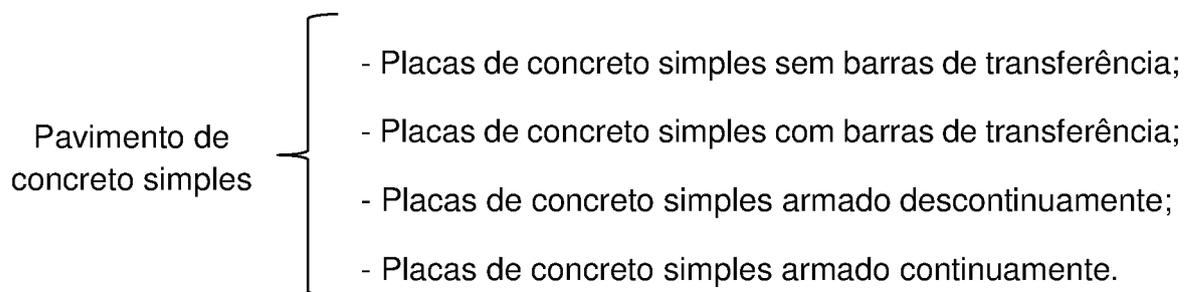
Ainda conforme IPPUJ (2014), o projeto do PAC 2 Mobilidade prevê a ampliação dos corredores e faixas exclusivas, que atualmente conta com 14,3 quilômetros, para aproximadamente 55 quilômetros. O projeto prevê duas propostas, sendo a primeira referente ao eixo Norte/Sul lado Leste, e a segunda ao eixo Norte/Sul lado Oeste. Dentro deste contexto se encontra o binário das ruas Dr. João Colin e Blumenau, objeto de estudo do trabalho, que faz parte da ligação do eixo Norte-Sul do município no lado oeste, conforme o projeto da Prefeitura.

2.3. TIPOS DE PAVIMENTO RÍGIDO

2.3.1 Concreto simples de cimento Portland

O pavimento de concreto de cimento Portland, também chamado de pavimento de concreto simples, 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 (OLIVEIRA, 2000). A figura abaixo apresenta os tipos de pavimento de concreto simples de cimento Portland.

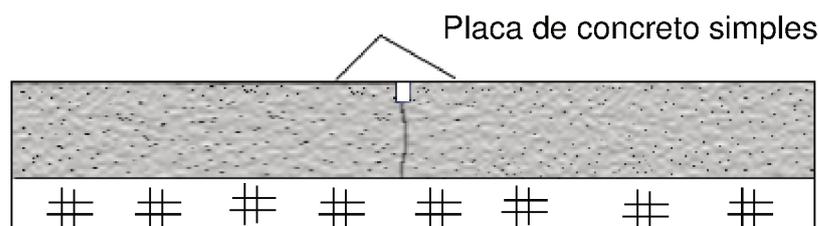
Figura 2.4 – Tipos de pavimentos rígidos de concreto simples



Fonte: Autor

- a) Placas de concreto simples sem barras de transferência: de acordo com o DNIT (2005), esse tipo de pavimento não dispõe de aço em sua composição, e tem a aderência entre os agregados (atrito) como única forma de transferência de carga entre cargas, exigindo assim placas mais curtas, na ordem de 5 a 6 metros de comprimento. Este tipo de pavimento tem sua utilização restrita a vias de baixo volume de tráfego e cargas de pequena intensidade (OLIVEIRA, 2000);

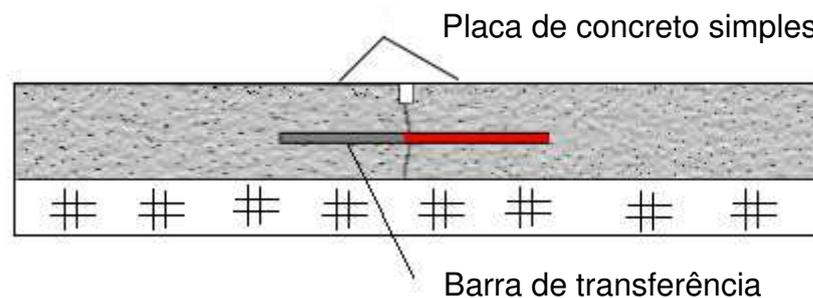
Figura 2.5 – Placa de concreto simples sem barras de transferência



Fonte: Adaptado do DNIT (2005)

- b) Placas de concreto simples com barras de transferência: são dotadas de um sistema artificial de transmissão de cargas, formado por barras curtas de aço liso, postada na meia-seção das juntas transversais. As placas geralmente têm comprimento de 9 a 12 metros, sendo elas mais resistentes do que as placas sem barras de transferência, e também mais utilizadas. (DNIT, 2005);

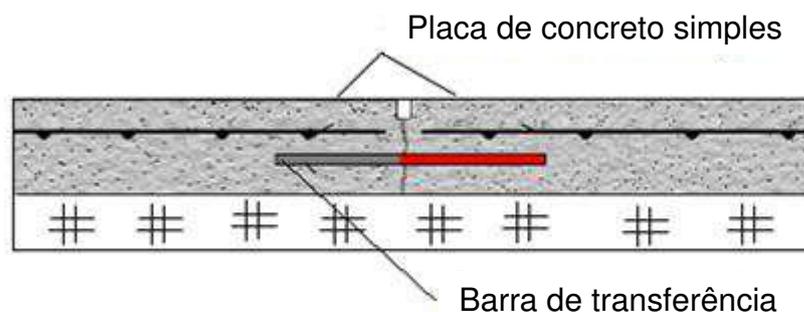
Figura 2.6 – Placas de concreto simples com barras de transferência



Fonte: Adaptado do DNIT (2005)

- c) Placas de concreto simples armado descontinuamente: contam com barras de aço sob a forma de armadura distribuída, que se detém antes de cada junta transversal, nas quais é obrigatório o uso de barras de transferência, que não tem função estrutural para aumentar a resistência da placa a flexão, agindo com exclusiva função de manter as fissuras fortemente ligadas (DNIT, 2005). Este tipo de pavimento possibilita a execução de placas de até 30 metros de comprimento e mais de 6 metros de largura, entretanto no Brasil é mais comum o uso de placas com comprimento entre 12 e 15 metros (OLIVEIRA, 2000).

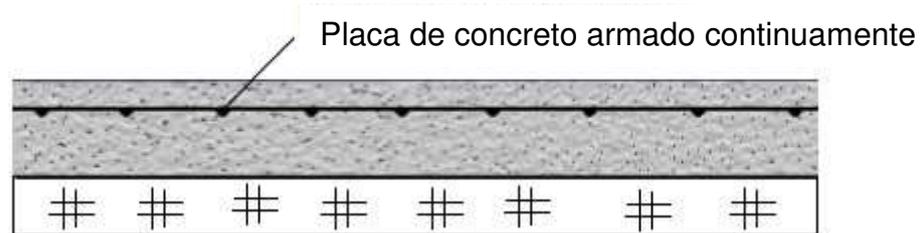
Figura 2.7 – Placa de concreto simples armado descontinuamente



Fonte: Adaptado do DNIT (2005)

- d) Placas de concreto simples armado continuamente: conforme DNIT (2005) não há juntas transversais de retração neste tipo de concreto, e a armadura, bastante pesada, garante que se tenha boa transmissão de carga nas fissuras. Já o comprimento das placas é igual a extensão diária construída. Devido ao elevado custo de construção, este pavimento nunca foi usado no Brasil (OLIVEIRA, 2000).

Figura 2.8 – Placa de concreto simples armado continuamente



Fonte: Adaptado do DNIT (2005)

Todos os tipos de placas de concreto descritas apresentam uma grande área exposta ao ar e variações de temperatura e umidade, que devem receber cuidado especial. O concreto deve sofrer a menor retração possível, e ter resistência suficiente para absorver os esforços provenientes do carregamento e do clima (DNIT, 2005). A resistência deve ser adequada, garantindo baixa retração e alta resistência à tração na flexão, visto que aumentar demasiadamente a resistência do concreto implica em maior consumo de cimento e um comportamento mais retrátil (OLIVEIRA, 2000).

2.3.2 Whitetopping

Segundo DNIT (2005), o Whitetopping consiste em uma camada rígida de reforço para reabilitação de pavimentos asfálticos, ou seja, o pavimento antigo ainda existe, mas é colocada uma sobrecapa de concreto de cimento Portland, garantindo o desempenho de um pavimento rígido novo. Não é considerada aderência entre o pavimento remanescente e o concreto. Os principais materiais empregados são o cimento, agregados graúdos, miúdos, água, aditivos e selantes (MESQUITA, 2001).

De acordo com NETO (2011) este modelo de pavimentação caracteriza-se como forma de revitalização do pavimento asfáltico que apresentava algum defeito

estrutural, com a metodologia de aplicação diferenciando-se em face ao tipo e a gravidade do defeito observado no pavimento anterior. A colocação pode ser de forma direta, por fresagem ou construção de uma camada de nivelamento. Segundo MESQUITA (2001), a tecnologia de Whitetopping pode ter um grande impacto social e econômico nos usuários, devido ao custo e facilidade de execução. Ainda de acordo com o mesmo autor, as principais características deste tipo de pavimento rígido são:

- Permite a colocação de sobre capas em pavimento que tenham qualquer condição de deterioração superficial;
- Requer preparação da base existente, eliminando a poeira por lavagem com água e varrição, melhorando a aderência entre o concreto e a camada asfáltica;
- Aumenta a vida útil do pavimento em até 15 anos se for bem executado;
- Incrementa significativamente os efeitos luminosos da via, reduzindo os gastos com a iluminação noturna;

Embora tenha suas vantagens, o DNIT (2005) afirma que o uso de camada rígida superposta a um pavimento flexível não é comum em projetos de reabilitação de pavimentos, podendo ser mais viável em caso de pavimentos seriamente danificados.

A espessura depende diretamente da avaliação da capacidade de suporte do pavimento existente, que pode ser verificado por medida direta, utilizando o dispositivo Falling Weight Deflectometer (FWD), caso sejam conhecidas as características das camadas, ou pelo processo de viga Benkelmann (PITTA, 1996). Na execução, aplica-se uma camada asfáltica nivelante sobre o pavimento existente antes do lançamento do pavimento superposto, para eliminar as irregularidades superficiais (DNIT, 2005).

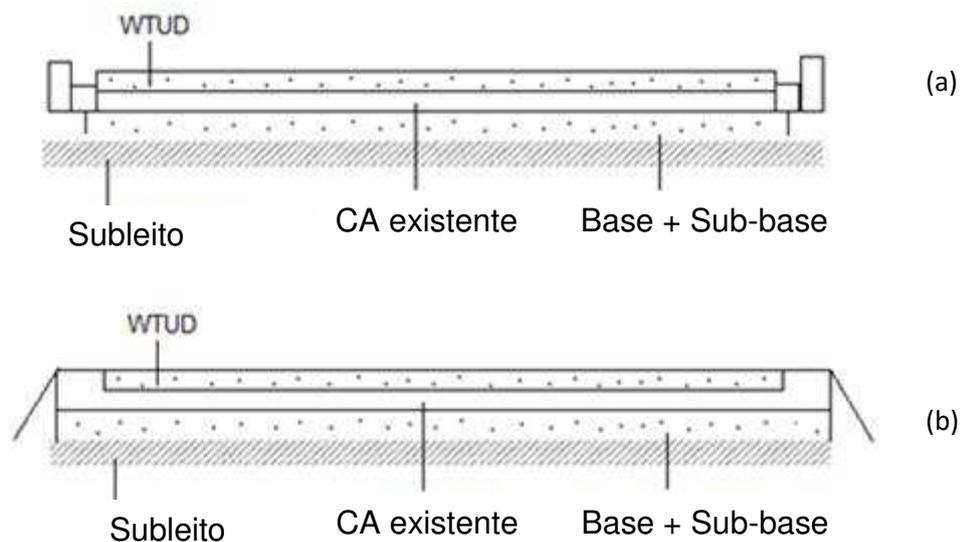
O dimensionamento do Whitetopping consiste em determinar o módulo de reação (coeficiente de recalque – k) do pavimento existente, e em seguida dimensionar a camada superposta de concreto simples, com ou sem armaduras (não estrutural, apenas combatendo a retração) e barras de transferência (DNIT, 2005).

As principais limitações do método, segundo SPEAKMAN & SCOTT III (1996 *apud* FORTES, 1999), são a necessidade de se liberar o tráfego rapidamente e o aumento da espessura final do pavimento, que em áreas urbanas acabaria diminuindo o gabarito sob os viadutos, afetando também o encontro do pavimento com a sarjeta.

2.3.3 Whitetopping Ultradelgado de concreto (WTUD)

O Whitetopping ultradelgado é uma técnica de recuperação de pavimento que, ao contrário do Whitetopping tradicional, necessita de uma aderência entre o pavimento asfáltico remanescente e o novo pavimento de concreto de cimento Portland, podendo ser o mesmo sobreposto ou encaixado ao pavimento asfáltico existente (SIAN, 2007). O autor ainda afirma que a aderência pode ser obtida por fresagem, limpeza e remoção do material solto antes da aplicação da nova camada.

Figura 2.9 - Sistema de moldagem sobreposta (a) ou encaixada (b) do pavimento WTUD



Fonte: Adaptada de BALBO (1999 *apud* SIAN, 2007)

MESQUITA (2001) afirma que a tecnologia do Whitetopping tem evoluído também para o Ultra-Thin Whitetopping (Ultra-Delgado Whitetopping), permitindo a utilização de uma espessura muito pequena, reduzindo significativamente o custo da mesma. Para BALBO (1999 *apud* FORTES, 1999) a diferença entre ambos seria a espessura do concreto de cimento Portland, aonde que para espessuras iguais ou inferiores a 100 milímetros e aderidas ao concreto asfáltico, o pavimento pode ser considerado do tipo WTUD. O autor também acrescenta como diferença entre ambas tecnologias o fato de que o espaçamento entre as juntas é menor no WTUD.

O WTUD, pelas suas características, é recomendado para vias com baixo volume de tráfego, como ruas residenciais, estacionamentos de carros e pavimentos asfálticos que apresentem trilha de roda (SIAN, 2007).

2.3.4 Macadame Cimentado

É um tipo de pavimento rígido onde as bases são caracterizadas, genericamente, pela participação do cimento em sua composição, oferecendo uma resistência considerável para aplicação do revestimento (NETO, 2011). O macadame com cimento é utilizado tanto como base quanto como revestimento, podendo ou não ter armadura metálica em sua estrutura (SENÇO, 1997 *apud* NETO, 2011).

Segundo LIMA (2003), macadame cimentado trata-se de uma base de agregado graúdo, com diâmetro máximo entre 50 e 90 milímetros, cujos vazios são preenchidos por um material britado, de granulometria mais fina misturado com cimento. Com isso ocorre a diminuição dos vazios, o travamento e a ligação entre os diferentes agregados, tornando a estrutura mais estável.

O principal problema deste pavimento é em função da poeira, que além de ser desconfortável para o motorista pode danificar a estrutura do pavimento (LIMA, 2003).

2.3.5 Tipos de Juntas

As juntas podem ser definidas como um “detalhe construtivo” que permite as movimentações de retração e dilatação das placas do pavimento de concreto, além da adequada transferência de carga entre as placas contíguas, mantendo a planicidade, garantindo a qualidade do pavimento e o conforto do rolamento (CALDA, 2007). Estas seções, artificialmente enfraquecidas e uniformemente espaçadas, vão forçar a ocorrência das fissuras em locais previamente determinados, permitindo essa expansão e contração das placas (RODRIGUES, 2008).

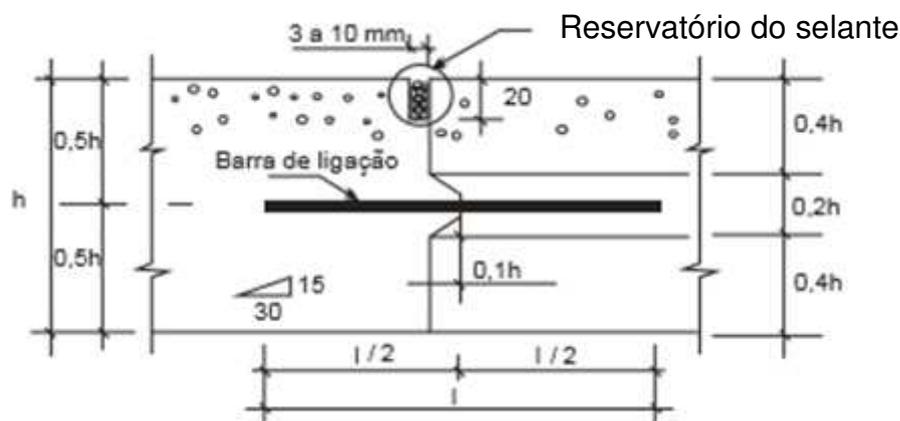
CALDA (2007) afirma que as juntas em um pavimento de concreto são o elo mais frágil do sistema, onde manifestações patológicas de natureza estrutural se dão de forma prematura, devido principalmente a variações volumétricas no concreto (dilatação térmica e efeito da penetração da água na estrutura), esforços assimétricos e combinação de efeitos de empenamento. Por se tratar de um sistema tão suscetível a patologias, a correta escolha do tipo de junta e a execução correta de seu dimensionamento são de fundamental importância para um projeto de um pavimento. A figura 2.10 apresenta os tipos e a classificação das juntas.

O DNIT (2005) recomenda o espaçamento de 3,5 a 3,6 metros para pavimentos, visto que espaçamentos maiores evidenciam o aparecimento de fissuras, e menores não permitem o uso de fórmulas que considerem a carga de projeto na borda da junta.

a.2) Junta Longitudinal de Articulação com barras de ligação

Este tipo de junta é empregado nas mesmas funções da junta longitudinal de articulação, sendo justificada a colocação das barras quando houver necessidade de se manter as faixas de tráfego livres de movimentos laterais, assegurando que a transferência de carga seja pelo entrosamento dos agregados ou pelo encaixe tipo macho-fêmea (DNIT, 2005). O dispositivo de ligação, com função de resistir a força de atrito entre a junta considerada e a junta ou bordo livre mais próximo a ela, é dimensionado para dar a seção de barras resistência para suportar os carregamentos (CALDA, 2007). O espaçamento é o mesmo das juntas sem barras de ligação.

Figura 2.12 – Junta longitudinal de articulação com barras de ligação e encaixe macho-fêmea



Fonte: DNIT (2005)

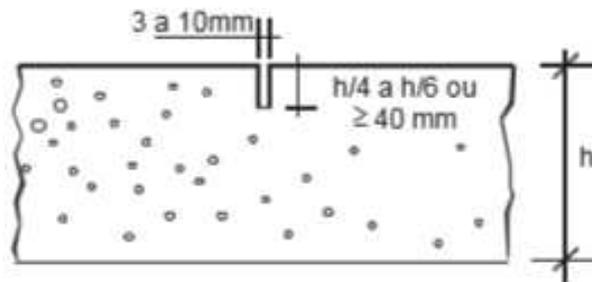
a.3) Junta Longitudinal de Construção

É utilizada para facilitar a execução do pavimento, coincidindo em tipo e espaçamento com as juntas longitudinais de articulação, exceto pelo fato de que o espaçamento também é limitado pela largura da máquina de pavimentação, pela espessura do pavimento e pela geometria da área a ser obtida (RODRIGUES, 2008). Quando há um notável confinamento lateral (vias urbanas, estacionamentos e pátios de aeroportos), essas juntas não exigem as barras de ligação (DNIT, 2005).

b.1) Junta Transversal de Retração

São formadas pela criação de uma seção enfraquecida na placa de concreto, absorvendo as trincas que ocorrem pela contração volumétrica dele, além de controlar trincas adicionais causadas pelo empenamento da placa (RODRIGUES, 2008).

Figura 2.13 - Junta transversal de retração



Fonte: DNIT (2005)

O espaçamento entre as juntas de retração deve ser fixado levando em conta quatro variáveis: o tipo de agregado graúdo empregado, as condições ambientais, o atrito entre a placa e a camada subjacente e o tipo de tráfego (DNIT, 2005). A tabela 2.1 mostra o espaçamento recomendado neste tipo de junta.

Tabela 2.1 - Espaçamento recomendado entre as juntas transversais

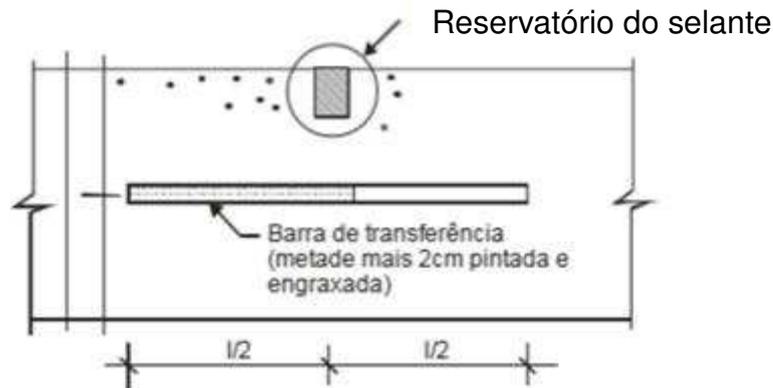
Tipo de Agregado Graúdo	Espaçamento recomendado (juntas transversais)
Pedra britada granítica	Até 7,5m
Pedra britada calcária. Sílico-calcária ou pedregulho de calcário	Até 6,0m
Seixo rolado, calcário ou escória com dimensão menor que 19mm	Até 4,5m

Fonte: DNIT (2005)

b.2) Junta Transversal de Retração com barras de transferência

Além de controlar as trincas devido à retração, as juntas transversais de retração com barras de transferência de carga também transferem a carga de uma placa para a outra (CALDA, 2007). A decisão da adoção das barras de transferência depende do tráfego de projeto, da magnitude das cargas e do tipo de fundação do pavimento (DNIT, 2005). A não presença das barras pode causar desuniformidade nas placas, gerando desconforto ao usuário e deterioração da estrutura (DNIT, 2005).

Figura 2.14 - Junta transversal de retração com barras de transferência



Fonte: DNIT (2005)

Normalmente as juntas transversais são construídas perpendicularmente ao eixo longitudinal, mas em alguns casos, quando não são utilizados mecanismos de transferência de força, podem ser adotadas juntas inclinadas, com ângulo de aproximadamente 10 graus (OLIVEIRA, 2000). A leve inclinação torna o rolamento do veículo mais suave, reduzindo as tensões e deformações na região (DNIT, 2005).

b.3) Junta Transversal de Construção

Segundo DNIT (2005), as juntas transversais de construção são usadas quando o ciclo de trabalho terminar exatamente onde ocorreria uma junta transversal de retração, ou quando imprevistos (chuva forte, quebra de equipamento ou atraso no lançamento do concreto) provocam a paralisação da concretagem antes de ser atingida a junta projetada, logo a junta não apresenta função estrutural.

c) Juntas de Expansão (ou dilatação)

Propiciam espaço para a expansão da estrutura, absorvendo as movimentações das placas e prevenindo o desenvolvimento de tensões de compressão, que podem causar o empenamento do pavimento (RODRIGUES, 2008). Em pavimentos rígidos seu uso é restrito a cruzamentos de vias com larguras bastante distintas e encontros de pavimentos com outras estruturas (DNIT, 2005). Quando as juntas transversais são bem projetadas, elas funcionam como pequenas juntas de expansão, absorvendo parcela dos esforços causados pela dilatação térmica do concreto (CALDA, 2007).

2.4. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO

2.4.1 Método PCA 1984

O PCA/1984 (Portland Cement Association) é um método empírico mecanístico de dimensionamento de pavimentos rígidos, largamente adotado no Brasil, que utiliza modelo de desempenho por fadiga do concreto e erosão das placas (SANTOS, 2011).

O método é uma remodelagem do tradicional método PCA 1966. De acordo com OLIVEIRA (2000), enquanto na metodologia antiga adotava-se a teoria de Westergaard para determinação das tensões, no modelo de 1984 foram acrescentados diversos conhecimentos adquiridos na área do cálculo de tensões, sendo realizadas análises estruturais com o uso do método dos elementos finitos, levando em conta principalmente:

- Grau de transferência de carga nas juntas transversais;
- 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.

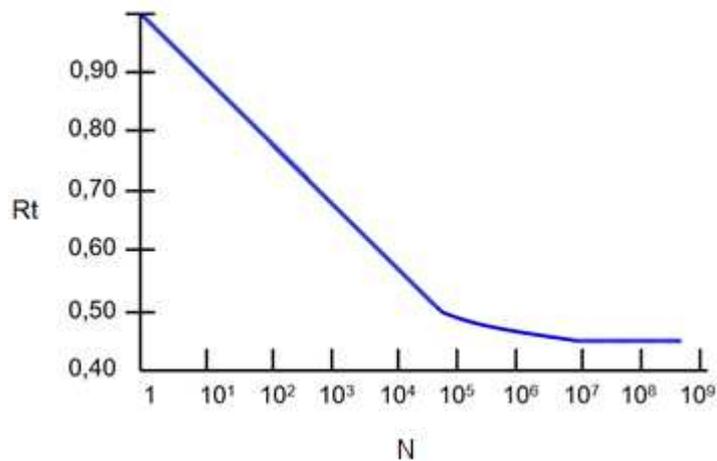
O PCA/84 se baseia em estudos teóricos sobre comportamento das placas de concreto, análises computacionais, ensaios laboratoriais, pistas experimentais, observação metódica do pavimento em serviço e comportamentos das juntas, sub-base e acostamento no desempenho de pavimentos de concreto (DNIT, 2005).

Ainda segundo DNIT (2005), o método se aplica tanto a pavimentos de concreto simples e com barras de transferência, como naqueles dotados de armadura, descontínua ou contínua. Assim como no modelo anterior, o valor de suporte da fundação é o coeficiente de recalque k , e a resistência de concreto é medida aos 28 dias, visto que as tabelas e ábacos que compõem o método já incorporam o crescimento da resistência com o tempo. Os parâmetros de composição do PCA são os modelos de ruptura do pavimento por fadiga e erosão (OLIVEIRA, 2000).

O modelo de fadiga utiliza o conceito de dano acumulado, segundo a regra de Miner, com consumo total máximo da resistência de fadiga igual a 100% (OLIVEIRA,

2000). Este conceito determina que a parcela de resistência à fadiga não consumida por uma certa classe de carga fica disponível para uso por outras cargas, sendo o resultado do dano total a soma final dos consumos individuais da resistência à fadiga. A curva usada no PCA é reproduzida na figura 2.15, onde R_t representa a relação de tensões e N o número admissível de repetições de carga.

Figura 2.15 - Critério de fadiga adotado pelo método PCA/84



Fonte: OLIVEIRA (2000)

As tensões de tração por flexão consideradas no cálculo são produzidas pela carga tangente à borda longitudinal, e a curva de fadiga alcança valores abaixo da relação de tensões limite de 0,5, eliminando a descontinuidade nesse ponto, fato que não ocorria no método do PCA/66 (DNIT, 2005).

Já o modelo de erosão é a perda de material no topo da camada imediatamente sob a placa de concreto, ocorrendo devido a ação combinada da água e da contínua passagem de forças elevadas sob o pavimento (OLIVEIRA, 2000). Os efeitos da erosão se dão sob a forma de deformações verticais críticas, em cantos e bordas das placas, causando escalões nas juntas transversais, principalmente quando estas não possuem barras de transferência (DNIT, 2005). Isso ocorre pela formação de vazios e perda de suporte entre placa e a fundação.

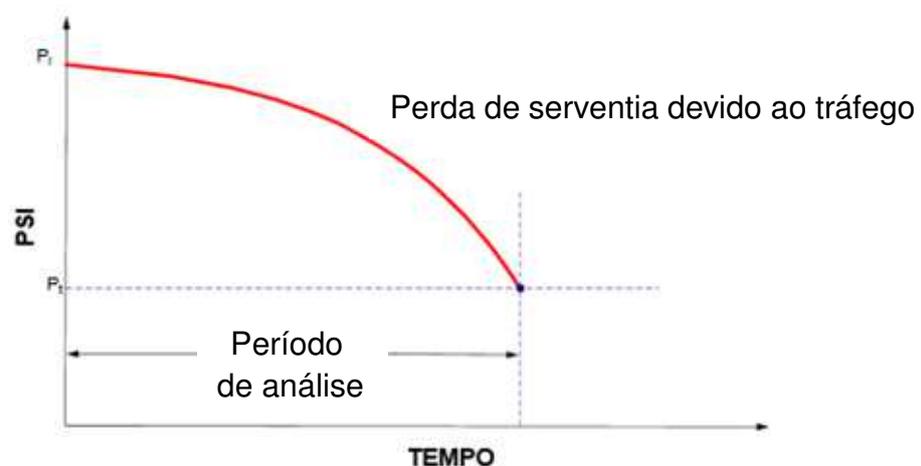
Os eixos tandem também são responsáveis por grande parte dos danos por erosão, que está intimamente ligado as condições climáticas do local e a eficiência de drenagem (OLIVEIRA, 2000). Por todos estes fatos, o critério de erosão é uma diretriz básica, que pode ser modificado em função de dados locais (DNIT, 2005).

Método AASHTO 1993

O método de dimensionamento da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) foi publicado primeiramente em 1986, com base em testes realizados em uma pista experimental, e então em 1993 foi publicado uma nova versão do método, sem alterações significativas no procedimento para dimensionamento de pavimentos rígidos (OLIVEIRA, 2000). As informações adquiridas na pista experimental foram cruciais no progresso do método, já que deste estudo se originaram os gráficos e as equações de dimensionamento utilizado pela AASHTO (SANTOS, 2011). Ainda conforme o autor, embora este seja um método com bases empírico-estatístico, é considerado uma boa quantidade de variáveis, representando um grande salto de qualidade se comparado com métodos como CBR.

O AASHTO/93 oferece um modelo de dimensionamento baseado no desempenho do índice de serventia PSI (Present Serviceability Index). A figura a seguir ilustra a curva típica de perda de serventia ao longo do tempo de operação do pavimento, causada principalmente pelas solicitações do tráfego no período de projeto, que é normalmente considerado como 20 anos (SANTOS, 2011).

Figura 2.16 - Curva de desempenho do pavimento segundo método da AASHTO



Fonte: AASHTO (1993)

O método ainda prevê o cálculo do número admissível de eixos equivalentes que uma determinada espessura de pavimento é capaz de suportar, relacionando assim o tráfego (número N), serventia e as espessuras das camadas para descrever o desempenho do pavimento (OLIVEIRA, 2000).

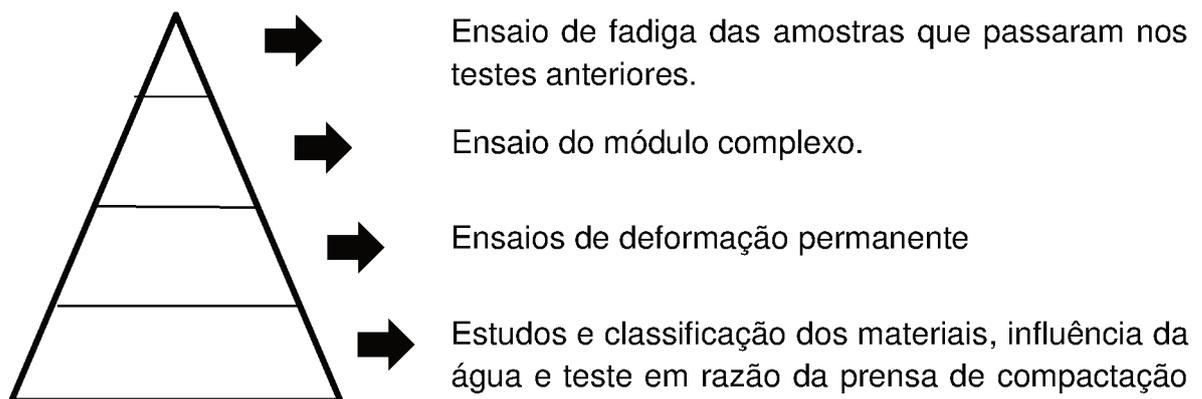
2.4.2 Método Francês

Devido ao fato da metodologia de dimensionamento do pavimento adotada no Brasil atualmente pelo DNIT ser de cunho empírico, não reproduzindo no laboratório os esforços produzidos no campo, verificou-se a motivação crescente da comunidade técnico-científica em unir esforços para que uma nova metodologia padronizada seja adotada em âmbito nacional, interpretando adequadamente os princípios físicos e mecânicos que determinam o desempenho do pavimento (BARRA et al., 2010).

Neste contexto, o método Francês é caracterizado por apresentar uma abordagem baseada no desempenho do pavimento, com caráter racional, baseado em equações analíticas, simulando as situações reais de campo (BARRA et al., 2010).

Alguns parâmetros importantes do cálculo da metodologia francesa são o tráfego, coeficiente de risco, definição da estrutura do pavimento e critérios de avaliação do desempenho mecânico (BARRA et al. 2000). A abordagem fundamental do método pode ser dividida em 4 níveis de dimensionamento, segundo MANUEL (LCPC, 2007) e que também consta no projeto do pavimento da Autopista Litoral Sul em parceria com a ANTT (2014), como mostrado na figura 2.17.

Figura 2.17 – Abordagem fundamental do método Francês



Fonte: Autor

O ensaio de módulo complexo visa permitir o conhecimento do comportamento da mistura do pavimento em um amplo espectro de temperatura e frequência de carregamento (MOMM, 1998). Já o ensaio de fadiga indica o número de ciclos correspondentes ao momento da ruptura do corpo de prova, possibilitando a

construção de um gráfico com as deformações máximas especuladas pelo projetista versus os respectivos números de ciclos de ruptura (BARRA, 2009).

Enquanto no pavimento rígido a metodologia francesa verifica a tensão de tração originada na fibra inferior da camada de revestimento, na estrutura de concreto asfáltico os alvos são a deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica e a deformação de compressão no topo do subleito. Para o completo dimensionamento da estrutura do pavimento, segundo BARRA *et al.* (2000), as principais referências bibliográficas francesas da atualidade são: *Conception et dimensionnement des Structures de Chausée: Guide Technique (LCPC/SETRA, 1994)* e *Catalogue des Structures Types de Chausée Neuves (LCPC/SETRA, 1998a)*.

2.5. PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS DO PAVIMENTO RÍGIDO

Este item trata de práticas recomendadas para execução de pavimento de concreto simples de cimento Portland. Para os procedimentos citados abaixo, foram utilizados um copilado de informações, indicando a maneira mais adequada de cumprir esta operação. Conforme a NBR 7583 (1986) "Execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico", DNIT (2005), NETO (2011) e o Engenheiro Abdo Hallack, da ABCP, os procedimentos executivos do pavimento rígido são:

- a) Preparo do subleito: são consideradas operações de preparo da fundação, como a substituição de solos inadequados, remoção de materiais indesejados (blocos de pedra, raízes e outros materiais putrescíveis), compactação, regularização e testes por meio de provas de carga, para determinar o coeficiente de recalque k ;
- b) Preparo da sub-base: tem como objetivo uniformizar o suporte à camada superior e protege-la do bombeamento de material fino do solo, regularizando a camada final, de modo que as cotas sejam aquelas definidas em projeto;
- c) Produção e Transporte do concreto: necessário definir os processos referentes a produção do concreto, podendo utilizar usinas dosadoras e misturados em local próximo da obra. No transporte do concreto é utilizado os caminhões basculantes;
- d) Fixação das barras de transferência

- e) Lançamento do concreto: somente deverá ser lançado o concreto liberado pelo controle tecnológico, com ou sem auxílio de máquinas, trabalhando de forma contínua. O tempo permitido entre adição de água e o lançamento será de 1 hora para concretos confeccionados sem retardador de pega;
- f) Espalhamento: deve garantir a espessura mínima de projeto, com uma camada contínua, homogênea e de altura constante, por toda largura da faixa;
- g) Adensamento: feito por vibração superficial, exigindo-se o emprego de vibradores de imersão sempre que a vibração superficial se mostrar insuficiente;
- h) Nivelamento e acabamento final: feito imediatamente após o adensamento do concreto. O equipamento vibro-acabador deve passar em um mesmo local tantas vezes quanto necessário, para que a superfície atenda o greide e o perfil de projeto. O equipamento deve se deslocar de forma contínua, e as depressões encontradas devem ser imediatamente corrigidas com concreto fresco;
- i) Texturização: consiste em prover ranhuras na superfície do pavimento, aumentando atrito entre pneu/pavimento e atuando na microdrenagem. O processo pode ser mecânico (pente de fios duros, com sensores de nivelamento) ou manual (vassoura de piaçava, de fios de náilon ou metálicos);
- j) Execução da junta: juntas longitudinais e transversais devem estar de acordo com as posições exatas de projeto, com desvios admissíveis de 5 mm. Na execução se deve empregar a serra de disco diamantado, com posterior limpeza das juntas;
- k) Cura: não deve permitir que a perda de umidade aconteça muito rapidamente. O período total de cura é de 28 dias, compreendidos o período inicial, de 72 horas após o acabamento superficial, e o período final, após as 72 horas até os 28 dias. Como material empregado para o controle da cura do concreto, podem ser utilizados tecidos de juta, lençóis, mantas, geotêxteis e compostos químicos capazes de formar películas plásticas;
- l) Selagem das juntas: a vedação deve ser feita com a colocação de um material de enchimento, com as juntas já devidamente secas e limpas.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS ESTUDADOS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão abordadas algumas características dos materiais que compõem a solução do pavimento rígido adotado para o corredor de ônibus em questão, assim como os ensaios pertinentes para caracterização destes solos e sua aceitação ou não no projeto. O pavimento é uma estrutura complexa, constituída por camadas distintas que interagem entre si com o objetivo de garantir as características estruturais necessárias ao projeto, e o que diferencia e garante as propriedades necessárias a cada uma destas camadas são principalmente a sua disposição, a espessura individual e os materiais constituintes das mesmas (NETO, 2011).

Também será destacado a condição do pavimento e uma verificação do solo existente no local do estudo, o binário das ruas Dr. João Colin e Blumenau, em Joinville-SC. De acordo com BERNUCCI *et al.* (2008), para se dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento, deve-se ter um bom conhecimento das propriedades dos materiais que a compõem, como a resistência, permeabilidade e deformabilidade, frente a repetição da carga e ao efeito climático sob a estrutura.

3.2. MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

Para análise dos materiais é necessário um estudo das condições e características da via onde se dimensionará o pavimento do corredor de ônibus. O binário é uma das principais vias de ligações entre o norte e o sul de Joinville, com cerca de 3,2 quilômetros de extensão e intenso movimento de veículos pesados. Como já destacado, o corredor de ônibus tem uma base flexível, a qual será substituída por uma base rígida, conforme o novo projeto da prefeitura de Joinville.

Uma análise técnica acerca das condições do pavimento do corredor mostra inúmeros defeitos no pavimento. Isto pode ser explicado por vários fatores, como o fato do corredor de ônibus estar assente numa antiga área de estacionamento de veículos, sendo que a faixa de trânsito não recebeu tratamento adequado para a

passagem de veículos pesados, ou ainda pelo fato da via ter recebido um revestimento asfáltico assentado logo acima dos blocos de pavimento intertravados, o que não é recomendado na pavimentação. Alguns defeitos podem ser verificados na figura 3.1.

Figura 3.1 – Situação de degradação do pavimento dos corredores de ônibus das ruas Blumenau (esquerda) e Dr. João Colin (direita)



Fonte: Autor

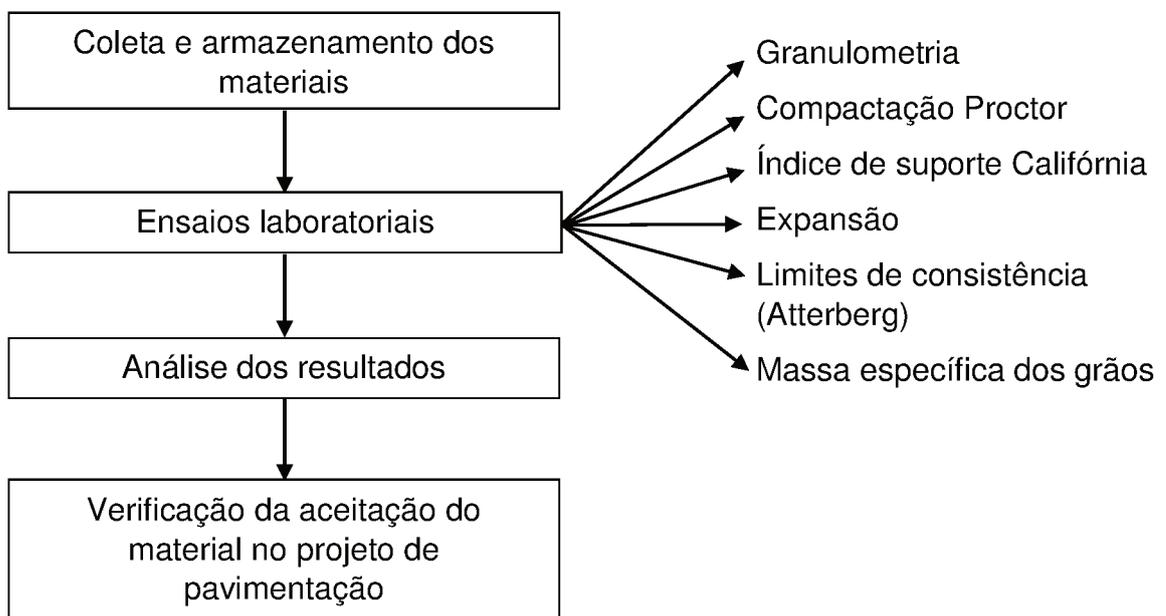
A imagem mostra o estado de degradação de alguns trechos do corredor de ônibus do binário, em que o pavimento visivelmente apresenta defeitos, impedindo a boa trafegabilidade, acarretando em gastos com reparos e manutenção e colocando em risco a segurança dos usuários. Por todos estes fatores se faz necessária uma investigação do solo presente no binário, afim de se conhecer as características do terreno natural e do subleito, garantindo um dimensionamento correto da estrutura do pavimento, o qual resistirá as ações do tráfego e garantirá a segurança aos usuários. Neste sentido o trabalho visou os estudos dos seguintes materiais:

- a) Subleito da via;
- b) Solo residual de Argila;
- c) Argila com areia descartada de fundição;
- d) Solo residual de Saibro.

Os materiais c e d são provenientes de jazidas localizadas na região metropolitana de Joinville, que preferiram não terem seus nomes citados no trabalho, e que no projeto de pavimento serviram respectivamente como reforço do subleito e base da estrutura. Para caracterização e aceitação destes materiais no pavimento foram realizados ensaios laboratoriais na Universidade Federal de Santa Catarina e na Universidade do Estado de Santa Catarina, ambas na cidade de Joinville.

Os métodos escolhidos para caracterização do solo são os ensaios de granulometria, ensaios de compactação Proctor, índice de suporte Califórnia (CBR), expansão do solo, limites de consistência (limites de Atterberg) e massa específica real dos grãos. O objetivo dos mesmos é de conhecer as características do solo para então poder classificá-los e proceder com um dimensionamento correto do pavimento. Os resultados dos ensaios serão apresentados no decorrer deste capítulo, e o fluxograma das atividades previstas é demonstrado na figura 3.2.

Figura 3.2 – Fluxograma das atividades descritas no capítulo



Fonte: Autor

Para um melhor entendimento dos procedimentos utilizados para caracterização dos solos, das normas envolvidas em cada um deles, e das definições, uma breve descrição de cada ensaio é apresentada a seguir, de acordo com um copilado de informações do DNIT (2006), Neto (2011) e Bernucci *et al.* (2008).

- **Granulometria:** A análise granulométrica, relevante à parte sólida do sólido, consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações do solo. Para partículas de solo maiores do que 0,075 mm (peneira número 200 da ASTM) o procedimento é feito passando uma amostra do solo por uma série de peneiras de dimensões padronizadas, pesando-se as quantidades retidas e calculando-se as porcentagens passante em cada peneira. As especificações do ensaio são de acordo com a NBR 7181.
- **Compactação Proctor:** este ensaio foi proposto em 1933 pelo engenheiro americano de mesmo nome, tem o objetivo de determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima de um solo. O método consiste na compactação de uma amostra assente num recipiente cilíndrico, em camadas sucessivas e sob ação de golpes de um soquete, o qual tem altura e peso especificados. A compactação Proctor é padronizada pelo DNER-ME 129/94;
- **Índice de suporte Califórnia (CBR) e expansão:** consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada. O valor da relação, em porcentagem, estabelece uma estimativa de resistência do solo, bastante utilizado nos projetos de pavimentação do Brasil. O ensaio é normatizado pelo DNER-ME 049/94.
- **Massa específica dos grãos:** este método, normatizado pela NBR 6508/84, prescreve o procedimento de determinação da massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm, por meio do uso do picnômetro.
- **Limites de consistência:** esses limites permitem avaliar a plasticidade dos solos, consistindo na maior ou menor capacidade de eles serem moldados sem variação do volume, sob certas condições de umidade. O limite de liquidez (LL) consiste na transição do estado plástico para o líquido, aumentando a presença de água, já o limite de plasticidade (LP) é determinado pela passagem do estado semi-sólido para o plástico, com maior umidade. A diferença entre o LL e o LP consiste no índice de plasticidade (IP), e quanto maior for este, maior o volume de água ao qual o solo é capaz de absorver. Os procedimentos do LL e LP são descritos respectivamente pelo DNER-ME 122/94 e DNER-ME 082/94.

3.2.1. Subleito

O subleito é o terreno de fundação do pavimento, sendo responsável por dar suporte para toda a estrutura acima. Nos próximos itens serão tratados todos os procedimentos para coleta e armazenamento da amostra do solo, além dos ensaios realizados em laboratório para a caracterização do mesmo.

3.2.1.1. Procedimento de coleta e armazenamento do solo

O solo da fundação foi retirado de um ponto localizado no cruzamento das ruas Blumenau e Humberto Campos, na zona norte de Joinville. O ponto foi escolhido em conjunto com os órgãos responsáveis da prefeitura, como o Ittran, Seinfra e Ippuj. A escolha do local se procedeu principalmente visando causar o menor impacto possível no trânsito local, mas também foram analisados fatores como: ponto representativo do binário, que não interfira na infraestrutura abaixo do solo (tubulações e cabos), que não perturbe ou cause problemas a moradores e ao comércio local, que não afete de maneira nenhuma a segurança da via, garantindo boa visibilidade e que seja um ponto próximo de onde, segundo análise visual, se encontram os maiores defeitos e irregularidades no pavimento dos corredores de ônibus. A figura 3.3 mostra o local exato da escavação do solo. Os corredores de ônibus das vias se encontram nas faixas da direita, segundo o sentido do tráfego.

Figura 3.3 – Localização do poço de sondagem



Fonte: Autor

Para a coleta do solo, foi feito o isolamento da área de escavação, sendo utilizados todos os equipamentos de segurança. Como no ponto de sondagem a base do pavimento era flexível, com uma camada asfáltica de aproximadamente 7 cm, seguido por uma camada composta por pavimento intertravado, foi utilizado uma retroescavadeira para auxiliar na abertura do terreno. Todo processo de abertura de poço, remoção do solo e recomposição do pavimento durou cerca de 4 horas. Com a abertura do poço concluída, o solo do subleito foi retirado manualmente, com auxílio de pás, e colocado em sacos de entulho. Foram retirados mais de 50 kg de solo para análise por meio de ensaios laboratoriais, a uma profundidade de aproximadamente 1,4 metros. O material então foi transportado e armazenado em local adequado.

Figura 3.4 – Processo de coleta do solo do subleito



Fonte: Autor

Em uma pré análise tátil-visual *in situ*, observou-se que o solo é arenoso, dadas as feições do material. Este tipo de solo, constituídos de grãos em formas cúbicas ou arredondadas, são praticamente desprovidos de coesão, com sua resistência dependendo do entrosamento, pressão e atrito entre os grãos (DNIT, 2006).

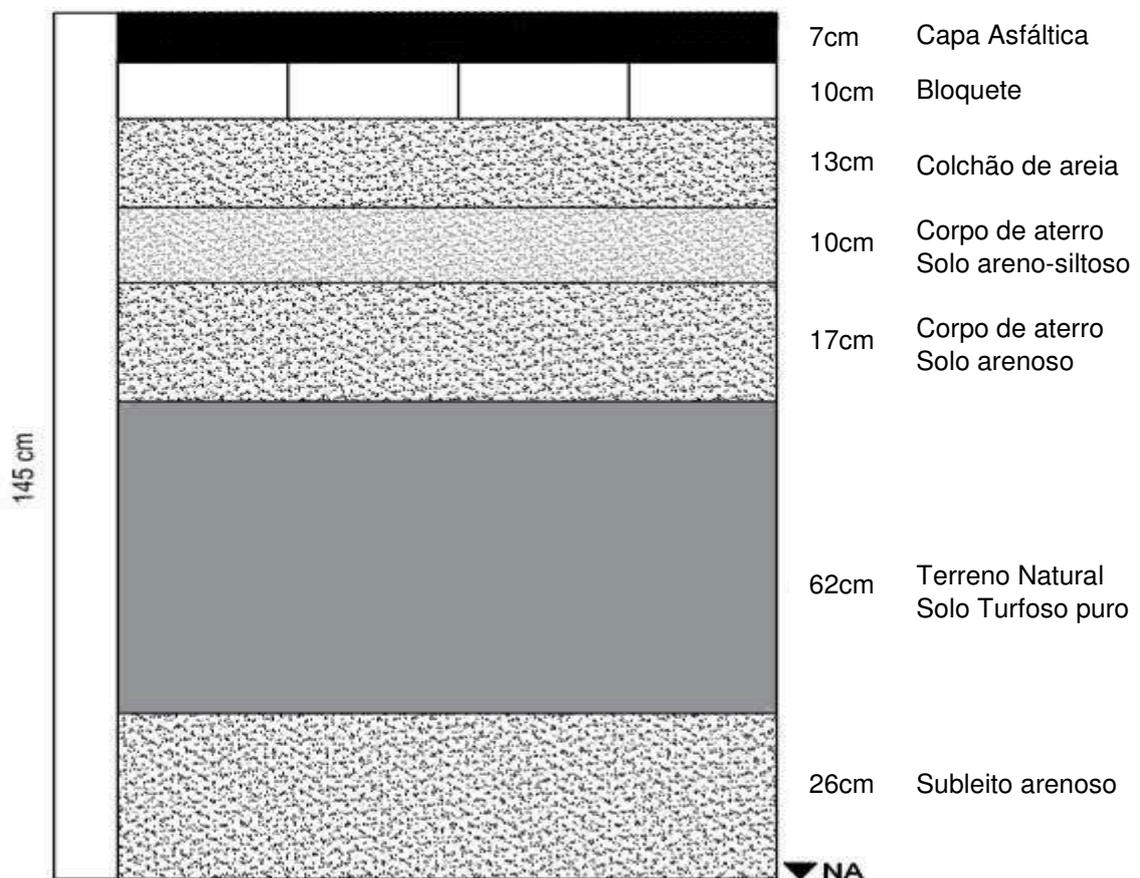
Figura 3.5 – Solo do subleito



Fonte: Autor

A estratigrafia do solo descreve as sucessivas camadas do mesmo, auxiliando em uma melhor observação do terreno. A análise das camadas foi por meio tátil-visual, com a escavação avançando até o nível d'água, que no dia da escavação estava a aproximadamente 1,45m da superfície, assim como ilustrado na figura a seguir. A proximidade do nível d'água com a superfície indica a necessidade de um projeto de drenos profundos, para evitar a influência da água na capacidade de suporte do solo.

Figura 3.6 – Estratigrafia do solo do subleito no poço de sondagem



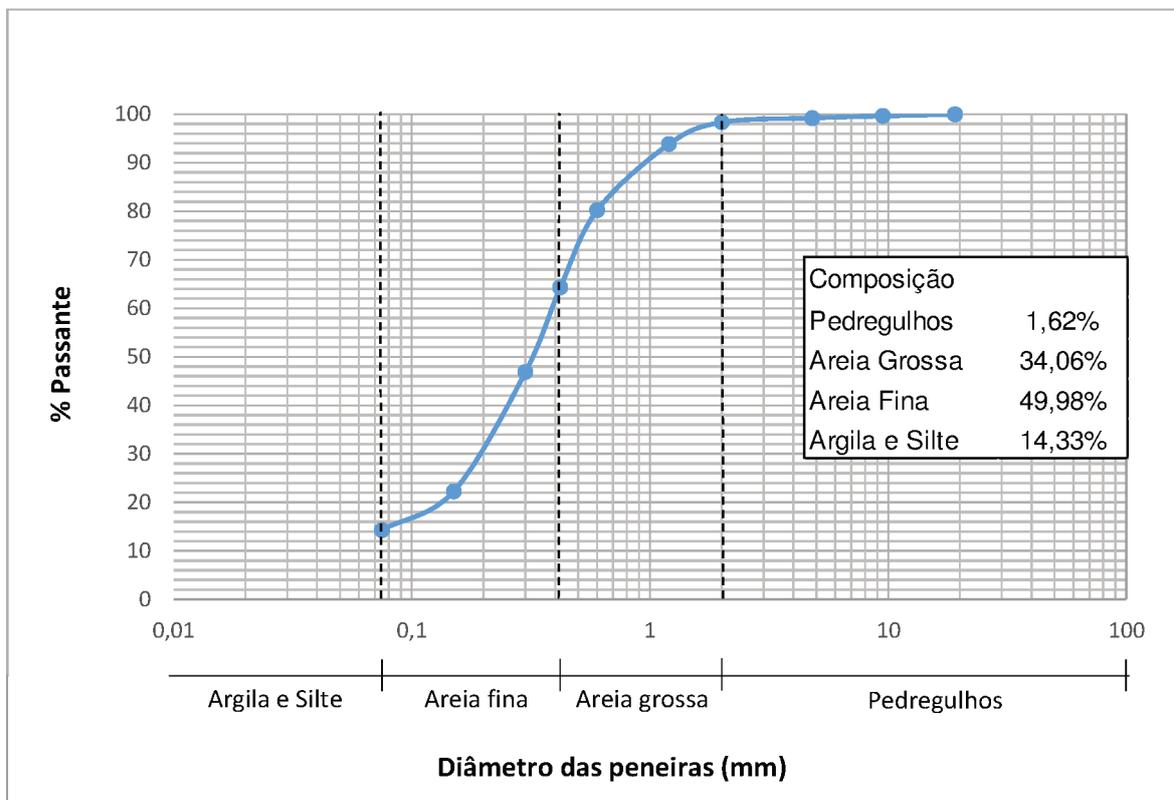
Fonte: Autor

3.2.1.2. Granulometria do solo

A análise granulométrica de um solo consiste em determinar o tamanho das partículas que o constituem, assim como sua distribuição em determinados intervalos. Trata-se de uma técnica muito utilizada nos projetos de pavimentação, embora, segundo DNIT (2006), não basta por si só para caracterização de um material, sendo necessários o complemento do estudo com a utilização de outros ensaios.

O ensaio de granulometria no material do subleito foi realizado seguindo todas as especificações e fórmulas descritas na NBR 7181/84. Por se tratar de um solo arenoso, foi recolhida uma amostra de 2505g de solo seco ao ar. Para o cálculo da umidade higroscópica, tomaram-se 50g de solo seco ao ar passante na peneira de 2mm, o que resultou em uma umidade de 0,2%. A curva granulométrica do material, que conta com a classificação dos solos segundo a AASHTO, é mostrada na figura 3.7, onde o eixo das abcissas representa o diâmetro das partículas, em escala logarítmica, e o eixo das ordenadas a porcentagem passante em cada peneira.

Figura 3.7 Curva granulométrica do subleito



Fonte: Autor

A curva granulométrica do subleito indica um solo de granulação fina e arenosa, visto que dos 2505g de solo seco ao ar, apenas 40,6g ficaram retidos no peneiramento grosso. Pode-se afirmar que em função da curva apresentada o solo é mal graduado.

3.2.1.3. Limites de Consistência (LL e LP)

O ensaio, que avalia a plasticidade dos solos argilosos, é baseado na constatação de que o solo argiloso se comporta de maneira distinta de acordo com a quantidade de água, quando úmido, se comporta como um líquido, já quando o material perde parte de sua água ele fica plástico, tornando-se quebradiço (PINTO, 2002). A diferença numérica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade fornece o índice de plasticidade (IP), definindo a zona em que o terreno se encontra no estado plástico. O índice de plasticidade é função da quantidade de argila presente no solo, enquanto que o LL e o LP são funções da quantidade e do tipo de argila (DNIT, 2006).

A análise granulométrica do solo do subleito indicou uma grande quantidade de areia (84% do total), e de acordo com as especificações do DNER-ME 082 (1994), quando o solo apresentar grande predominância de areia, o ensaio de LP deve ser feito antes do ensaio de LL, e caso o mesmo não possa ser determinado, o solo deve ser considerado como não plástico (NP). Como o LP não pode ser determinado, o material é considerado NP e não expansivo, pois o IP é menor do que 10 (DNIT, 2005).

3.2.1.4. Massa Específica Real dos Grãos

Como em um solo podem ocorrer partículas de natureza variada, a determinação da massa específica média se torna um ensaio importante na caracterização do material. O método consiste na relação entre o peso e o volume de uma partícula de solo, desconsiderando os vazios existentes. É necessário o conhecimento do volume ocupado pelos grãos, obtido com base no princípio de Arquimedes, em que um corpo, quando imerso em água, desloca um certo volume do líquido. O método é normatizado pela NBR 6508/84, que adota o picnômetro com volume previamente conhecido. Como sistema de remoção de ar optou-se pela bomba de vácuo para deaeração do material, até o ponto em que bolhas de ar não fossem mais detectadas.

Para a execução do ensaio, foram tomados cerca de 150g do solo do subleito passante na peneira de abertura 4,8mm, onde cerca de 100g foram utilizados no picnômetro para a determinação da massa de solo seco e o restante para a determinação da umidade. O resultado do ensaio é mostrado na tabela 3.1, onde γ_T representa a massa específica da água em g/cm^3 , na temperatura (T) de ensaio.

Tabela 3.1 – Massa específica real dos grãos do subleito

(W _s) Massa Solo Seco	49,34g
(W ₂) Massa Picnômetro/Água/Solo	651,27g
(W ₁) Massa Picnômetro/Água	620,72g
γ_T	0,9977
Massa Específica Real dos Grãos (G)	2,62 g/cm³

Fonte: Autor

3.2.1.5. Ensaio de Compactação (Proctor)

O DNIT (2006) define a compactação como a operação da qual resulta o aumento da massa específica aparente de um solo pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, fazendo as partículas entrarem em contato mais íntimo, com diminuição do volume do solo. O método visa determinar a densidade máxima do solo atingida sob dada energia de compactação. Essa energia de compactação pode ser normal, intermediária ou modificada. O que a define são as condições do tráfego durante a vida útil, o porte do equipamento e a camada a ser compactada.

Para a realização do ensaio, uma porção do material foi seco e compactado em um cilindro com volume conhecido, variando a umidade de forma a obter-se a umidade ótima do solo. Para o solo foi realizado o ensaio nas energias normal e intermediária, com um cilindro grande, como mostrado na tabela 3.2.

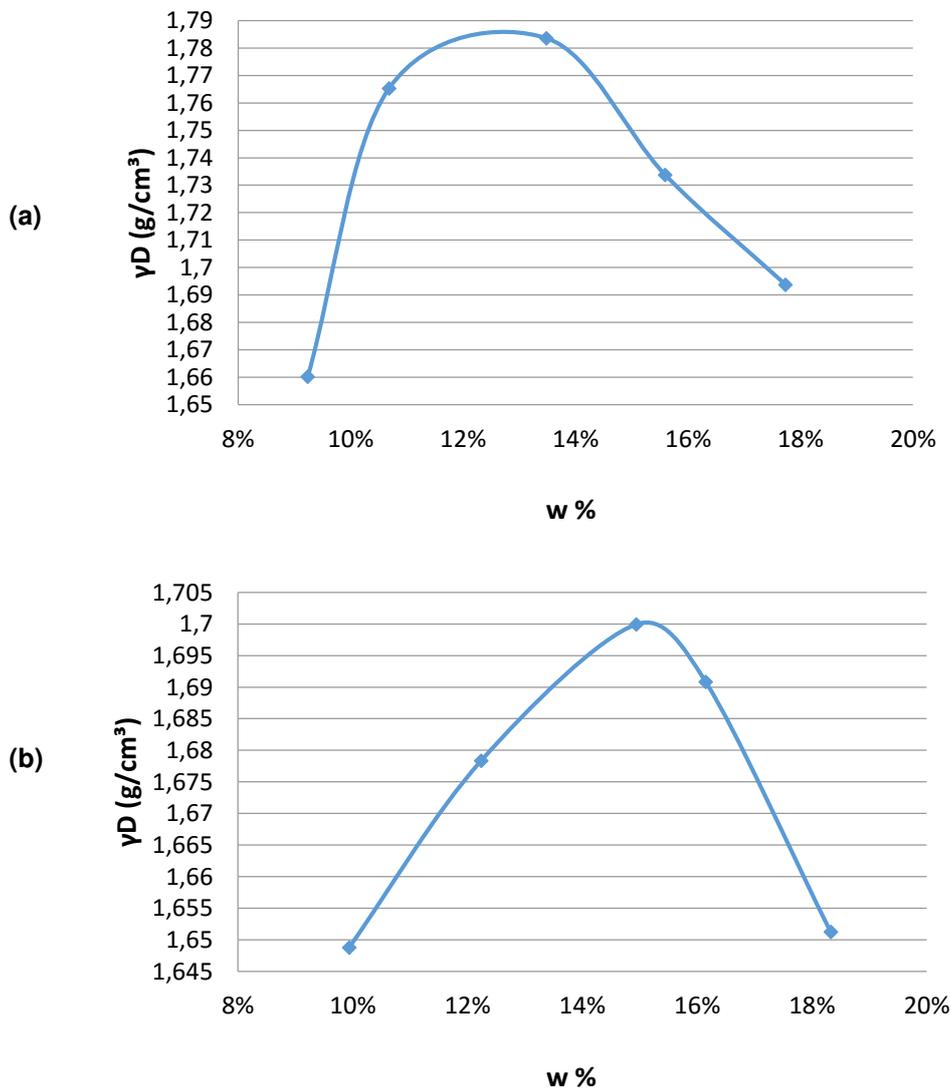
Tabela 3.2 – Especificações do ensaio de compactação Proctor

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

Fonte: DNER (1994)

O ensaio foi inicializado com umidade de 9%, ocorrendo um acréscimo de umidade de 2% até se atingir uma umidade de 19%, ou seja, foram utilizadas 6 umidades diferentes no procedimento, tanto na energia normal como na intermediária. Os resultados permitiram plotar as curvas de compactação, assim mostrado na figura abaixo. Vale se ressaltar que o resultado do ensaio de compactação é fundamental para se obter o ISC do material, que será tratado no próximo item deste trabalho.

Figura 3.8 – Curva de compactação do subleito na energia normal (a) e intermediária (b)



Fonte: Autor

Com as curvas plotadas foi possível a obtenção da umidade ótima do material, definida como aquela em que o solo atinge a massa específica aparente seca máxima, ou seja, a umidade em que ocorre a compactação máxima do solo, resultando numa máxima resistência (comumente). O resultado do método é apresentado na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultado da compactação Proctor do solo do subleito

	Energia normal	Energia Intermediária
Umidade ótima	15,5%	13%
yD máxima (g/cm ³)	1,700	1,786

Fonte: Autor

3.2.1.6. Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Expansão

O índice de suporte Califórnia, utilizado em larga escala no Brasil, é um dos ensaios mais utilizados para caracterização do solo e dimensionamento de pavimentos, devido principalmente à sua facilidade de execução e ao baixo custo. No Brasil, grandes órgãos rodoviários o utilizam no projeto de pavimentação, como o DNIT e o DER/SP, entre outros (SANTOS, 2011). No entanto, ressalta-se que o modo de ruptura e as condições de deformabilidade implícitas ao ensaio não correspondem ao estado de tensões atuante no pavimento (BERNUCCI *et al*, 2008). Ainda acordo com o autor, esta é uma das razões de que alguns países vêm progressivamente substituindo o ensaio pelo método de resiliência, como os Estados Unidos, que adotou o mesmo em 1986 para dimensionamento de pavimento pelo método da AASHTO.

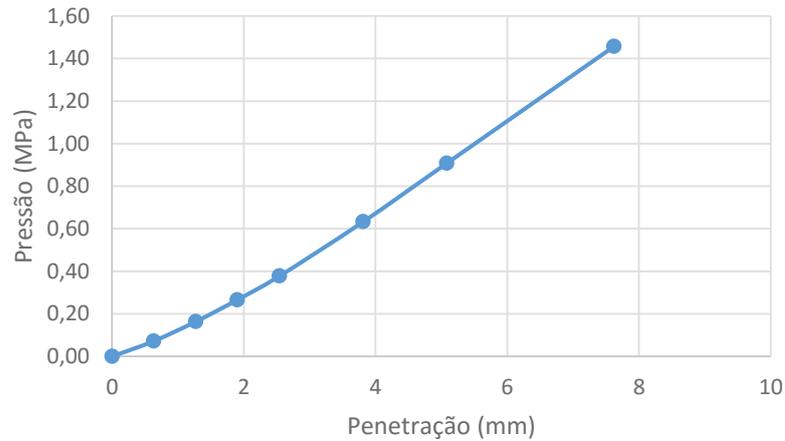
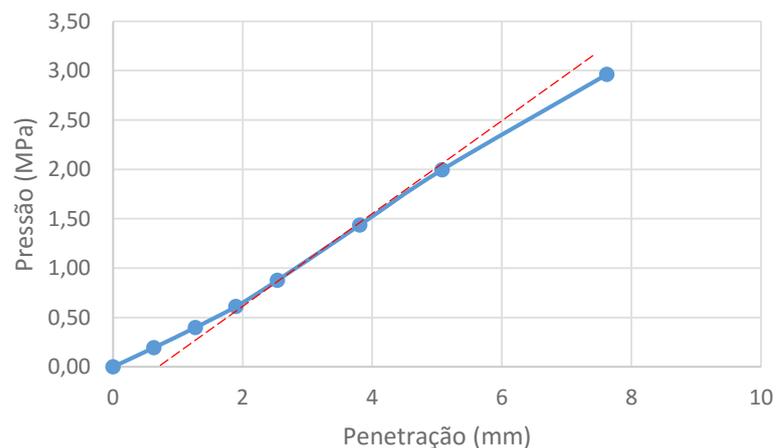
Os ensaios CBR e expansão foram feitas de acordo com as normatizações do DNER-ME 049 (1994). O ensaio foi realizado com 2 corpos de prova, um para energia normal e outra para a intermediária. Feita a compactação, o solo foi imerso em água por 96 horas, com o intuito do subleito entrar em estado de saturação. Após a imersão, pode-se aferir a expansão do solo, assim como mostrado na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultado da expansão do solo do subleito para energia normal e intermediária

EXPANSÃO	(%)
Energia Normal	0,096
Energia Intermediária	0,105

Fonte: Autor

Após a leitura da expansão o corpo de prova foi levado a prensa mecânica para execução do CBR. A velocidade da penetração foi controlada manualmente, estando sujeita a pequenos erros, de modo que houve a necessidade de correção da curva na energia intermediária. As figuras 3.9 e 3.10 mostram a curva característica do material.

Figura 3.9 – Curva CBR do subleito (Energia Normal)**Figura 3.10 – Curva CBR do subleito (Energia Intermediária)****Fonte: Autor**

De acordo com a NBR 12307 (1991), os requisitos de aceitação do solo do subleito são expansão inferior a 2% e CBR superior a 2%. Mesmo com as características do solo atendendo as especificações da norma, segundo a tabela 3.5, decidiu-se utilizar uma camada de reforço do subleito, visto que no corredor de ônibus há um tráfego considerável de veículos pesados, além de se ter pouco conhecimento do solo do subleito, já que houve investigação do solo em apenas 1 ponto do binário.

Tabela 3.5 – Resultado do CBR do subleito

Energia Proctor	Energia Normal	Energia Intermediária
CBR corrigido (%)	8,77	21,26

Fonte: Autor

3.2.2. Argila (Reforço)

O material argiloso, proveniente de uma jazida localizada em Joinville, será utilizado como reforço do subleito no projeto de pavimentação. Estes solos são de granulagem fina, com partículas entre 0,005 e 0,001 mm (segundo classificação da AASHTO) e com comportamento geral variando sensivelmente com relação a quantidade de água que envolve os grãos. Sua coesão é função do teor de umidade, quanto menos úmido o solo, maior a coesão apresentada (DNIT, 2006).

Ainda de acordo com DNIT (2006), o material empregado para reforço de subleito deve ter características superiores à do subleito, demonstrada mediante ensaio de CBR e de ensaios de caracterização do solo, como granulometria, e limites de consistência (LL e LP). A figura 3.11 mostra o solo argiloso utilizado em laboratório para realização dos ensaios de caracterização.

Figura 3.11 – Solo argiloso

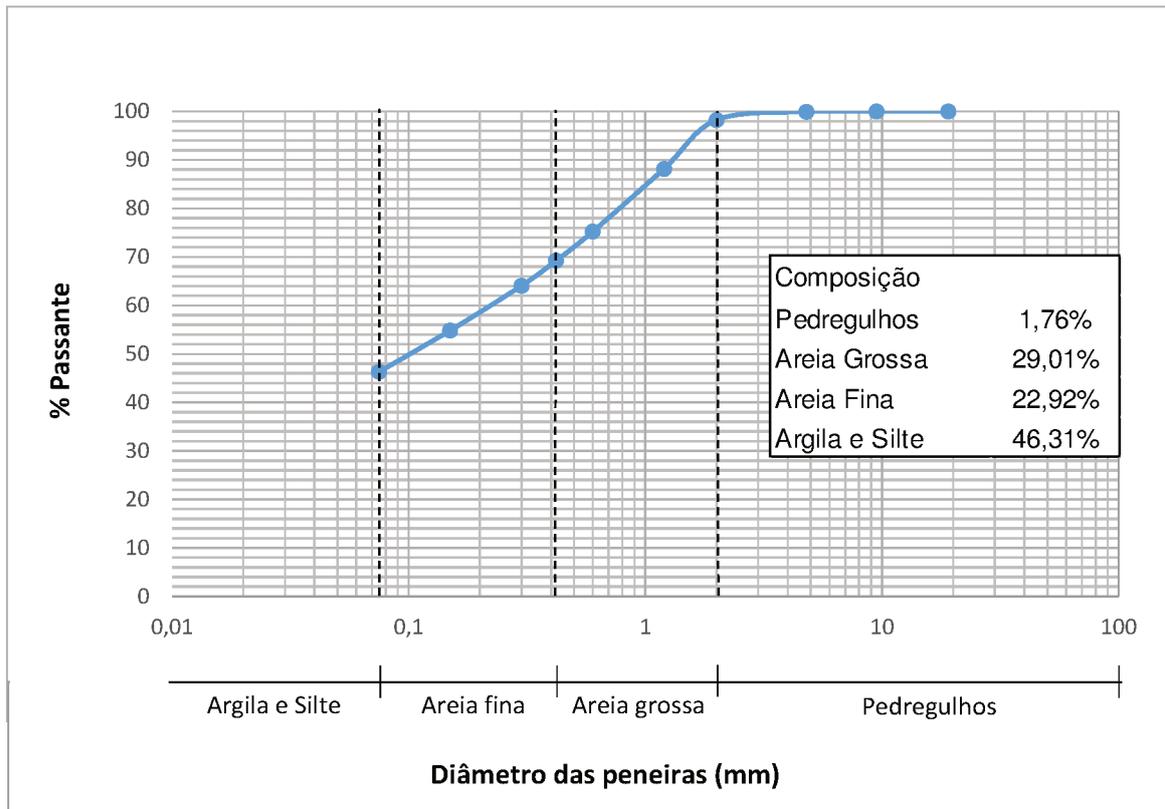


Fonte: Autor

3.2.2.1. Granulometria do solo

O ensaio de granulometria no material argiloso foi realizado seguindo todas as especificações e fórmulas descritas na NBR 7181/84. Tratando-se de um material de granulometria fina, foi recolhida uma amostra de aproximadamente 2470g de solo seco ao ar, suficiente para execução do método. No cálculo da umidade higroscópica, tomaram-se 50g deste solo seco ao ar passante na peneira de 2mm, o que resultou em uma umidade de 3,3%. A curva granulométrica da argila, que conta com a classificação dos solos segundo a AASHTO, é mostrada na figura 3.12.

Figura 3.12 – Curva granulométrica do solo argiloso

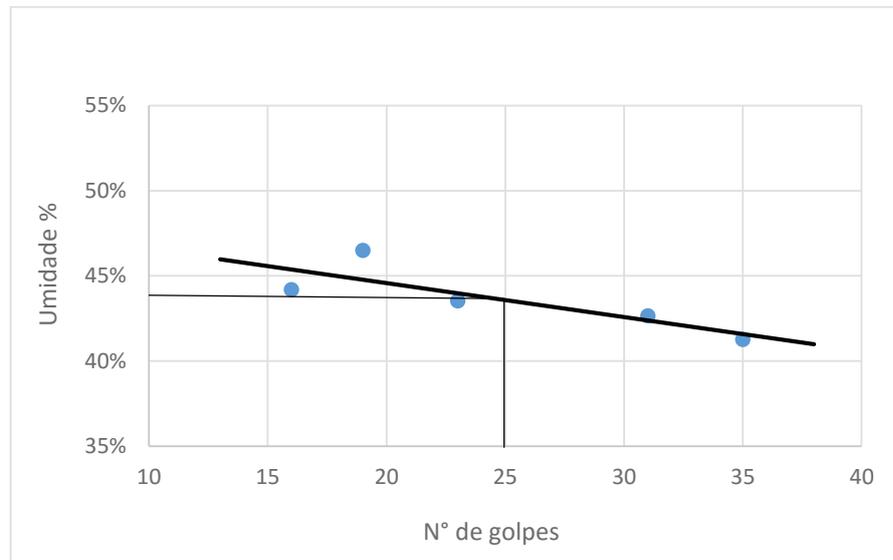


Fonte: Autor

A curva granulométrica mostra um solo de granulação mais fina, visto que dos 2470g de solo seco ao ar separados para a amostra, apenas 42g ficaram retidos no peneiramento grosso, o que é comum se tratando de um solo predominantemente argiloso. O que não era esperado, devido a uma análise visual do material, era a considerável presença de areia acusada pelo peneiramento fino, já que pela classificação do solo há um maior percentual de areia do que de argila e silte. Fato este que levou a uma repetição do ensaio, afim de averiguar o resultado, entretanto o resultado foi semelhante, confirmando a considerável presença de areia no material.

3.2.2.2. Limites de Consistência (LL e LP)

Primeiramente foi realizado o limite de liquidez do material, segundo os procedimentos do DNER-ME 122 (1994), em que foram calculados a quantidade de golpes para 5 pontos distintos, todos dentro do intervalo entre 15 e 35 golpes. O resultado pode ser observado na figura 3.13, onde o limite de liquidez encontrado foi de 44%, correspondente a umidade do solo aplicada a 25 golpes.

Figura 3.13 – Limite de Liquidez do solo argiloso

Fonte: Autor

Na sequência do método foi realizado o limite de plasticidade, moldando o solo até o mesmo atingir as dimensões de um cilindro padrão. Utilizou-se como base 5 amostras para o ensaio. Nota-se que nas 5 amostras a umidade ficou dentro da faixa de umidade aceitável, não diferindo da respectiva média em mais de 5%, para mais ou para menos. O resultado do método pode ser encontrado na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Limite de plasticidade do solo argiloso

Ensaio	Nº Cápsula	W Cápsula	W Cápsula + solo úmido	W Cápsula + solo seco	h%	h méd%
1	13	11,96	14,70	14,05	31,10	30,77
2	2	11,58	13,94	13,39	30,39	h + 5%
3	49	11,73	14,50	13,85	30,66	32,31
4	84	12,21	14,92	14,30	29,67	h - 5%
5	57	11,98	14,37	13,79	32,04	29,23

Fonte: Autor

Por fim foi calculado o índice de plasticidade (IP) do material, empregado nas especificações da qualidade dos solos utilizados em obras viárias. O IP é obtido matematicamente pela subtração do LL pelo LP do solo, utilizando como resultado, segundo a norma, números inteiros. O valor do IP, muito útil na classificação de solos finos, é expresso na tabela 3.7 e classifica o solo argiloso como medianamente plástico, todavia que o mesmo se encontra na faixa entre 7 e 15.

Tabela 3.7 – Índice de plasticidade do solo argiloso

Índices de Consistência	
Limite de Liquidez (LL)	44
Limite de Plasticidade (LP)	31
Índice de Plasticidade (IP)	13

Fonte: Autor

3.2.2.3. Massa Específica Real dos Grãos

Para a execução do ensaio, regido pela NBR 6508/84, foram tomadas cerca de 100g do material argiloso passante na peneira de abertura 4,8mm, onde metade foi utilizado para determinação da massa específica no picnômetro e a outra metade para a umidade do material. Para o ensaio, realizado na UDESC, no laboratório de geotecnia e pavimentação, utilizou-se a bomba de vácuo como método de remoção de ar. O resultado é mostrado na tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Massa específica real dos grãos do solo argiloso

(Ws) Massa Solo Seco	49,09g
(W2) Massa Picnômetro/Água/Solo	656,98g
(W1) Massa Picnômetro/Água	625,86g
Υ_r	0,9977
Massa Específica Real dos Grãos (G)	2,72 g/cm³

Fonte: Autor

3.2.2.4. Compactação Proctor, CBR e expansão do solo

Os ensaios de compactação Proctor, CBR e expansão do solo não foram realizados para o solo argiloso, devido ao fato do material já estar previamente alocado no laboratório da UFSC, Campus Joinville, e destes estudos já terem sido efetuados por outros alunos da universidade. Nesse sentido a tabela 3.9 apresenta o resultado dos ensaios citados acima para as energias normal e intermediária de compactação, conforme estudo realizado por MACHADO (2015).

Lembrando que assim como recomendado pelo DNIT, é necessário que a camada de reforço apresente resultados superiores frente a camada do subleito, considerando a energia de compactação adequada a cada uma delas.

Tabela 3.9 – Resultado da compactação, CBR e expansão do solo argiloso

Energia Proctor	Energia Normal	Energia Intermediária
Densidade seca máxima (g/cm ³)	1,508	1,575
Umidade ótima (%)	21,8	19,7
CBR (%)	8,74	13,29
Expansão (%)	1,26	2,03

Fonte: Adaptado de MACHADO (2015)

Fazendo uma análise dos resultados, nota-se que para a energia intermediária de compactação, a expansão do solo fica ligeiramente acima do limite imposto pela norma brasileira, que é de até 2% para a camada do subleito e de reforço do subleito, o que impossibilitaria o uso do material argiloso no projeto de pavimentação.

3.2.2.5. Considerações à utilização do solo argiloso

De acordo com as normas utilizadas para dimensionamento de pavimento no Brasil, um solo destinado ao reforço do subleito deve apresentar características superiores ao próprio subleito, mediante a comprovação por ensaios laboratoriais, além da expansão não ser superior a 2%. O solo argiloso, para energia intermediária de compactação, além de apresentar expansão superior ao limite, apresentou o CBR consideravelmente inferior ao solo do subleito. Como efeito destes resultados optou-se por eliminar a utilização do solo argiloso como reforço de subleito, uma vez que a utilização do mesmo poderia acarretar em deformações consideráveis no pavimento.

Em posse do problema encontrado, optou-se pela adição de areia descartada de fundição (ADF) ao solo argiloso. De acordo com KLINSKY (2008, *apud* MACHADO, 2015), a expansão de um solo decresce com o aumento da porcentagem de ADF. O uso da ADF contribui com o meio ambiente, já que ela é um resíduo no processo de fundição, que se descartado de forma incorreta, pode poluir o meio ambiente.

A mistura entre os solos será com a porcentagem de 50% em peso para cada material, visando principalmente eliminar a expansão apresentada acima dos limites, visto que a areia apresenta, em geral, baixa expansão. O próximo item do trabalho visa caracterizar esta mistura, aferindo se é possível ou não sua utilização no projeto.

3.2.3. Mistura de Argila com Areia Descartada de Fundação (Reforço)

A mistura entre o material argiloso e a ADF, utilizada como alternativa para a camada de reforço do subleito, todavia que não ocorreu a aceitação do material argiloso no projeto, foi preparada em proporções iguais. Ambos materiais foram extraídos de jazidas e empresas localizadas nas cidades de Joinville-SC. A figura 3.14 mostra o solo utilizado em laboratório para os ensaios de caracterização.

Figura 3.14 – Mistura do solo argiloso com areia descartada de fundição



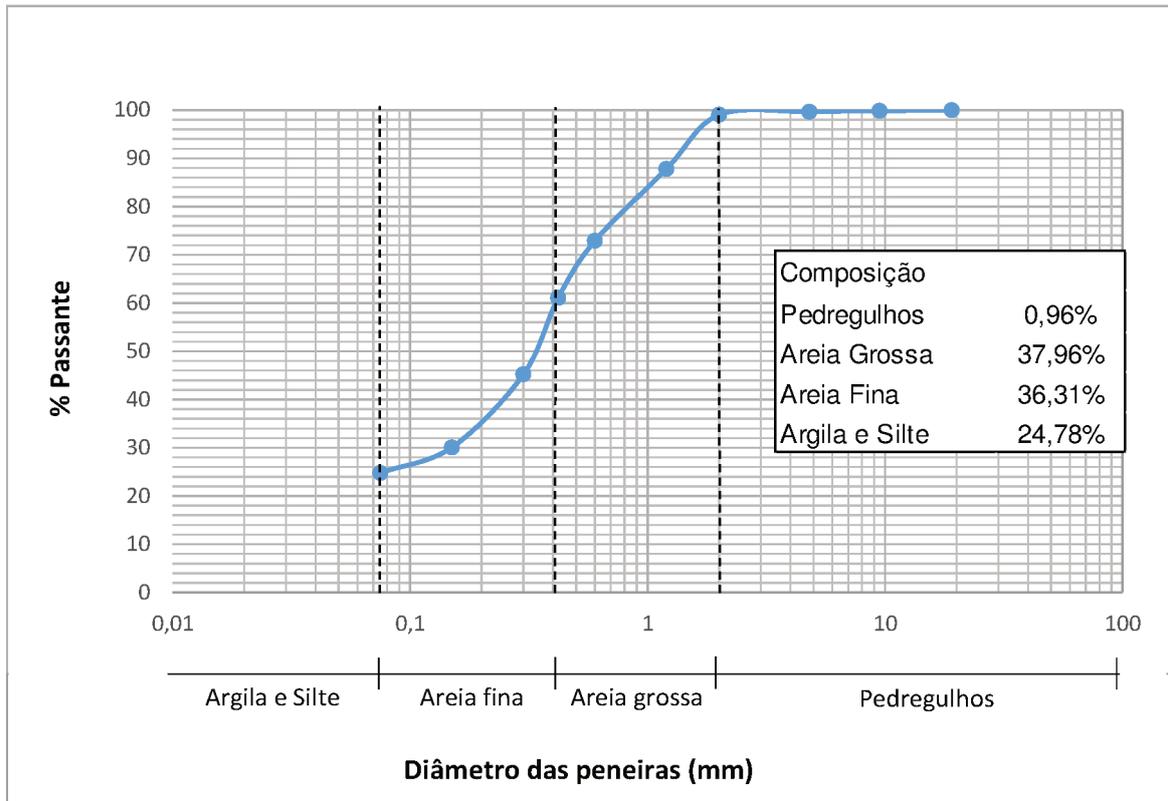
Fonte: Autor

3.2.3.1. Granulometria do solo

O ensaio de granulometria da mistura foi realizado seguindo todas as especificações e fórmulas descritas na NBR 7181/84. Para a mistura dos materiais, separou-se 1250g de solo argiloso seco ao ar e obteve-se a umidade do mesmo. Com o valor da umidade calculou-se a massa de solo argiloso seco (referente aos 1250g), adicionando essa mesma quantidade de ADF para formar a mistura, resultando numa amostra de massa total seca de aproximadamente 2395g, sendo 1195,5g de cada material, considerado suficiente para o ensaio em partículas de granulometria fina.

Para o cálculo da umidade higroscópica, tomaram-se 50g do solo passante na peneira de 2mm, o que resultou em uma umidade de 0,2%, valor considerado baixo, devido ao fato da ADF estar acondicionada na estufa anteriormente a execução do ensaio, e a argila estar secando ao ar por um grande período. A curva granulométrica da mistura, com a classificação dos solos, esta ilustrada na figura 3.15.

Figura 3.15 – Curva granulométrica da mistura argila-ADF

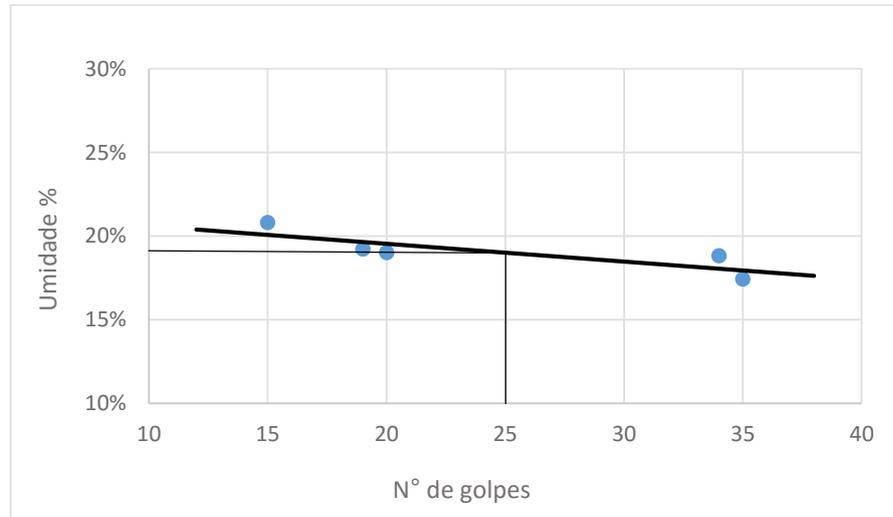


Fonte: Autor

Pela curva granulométrica do solo se nota a quase inexistência de material pedregulhoso, resultado esperado para uma mistura de argila com areia. No peneiramento fino se observa grande quantidade de areia na mistura, estando ela bem distribuída entre areia fina e grossa, além da presença considerável da argila. A adição de 50% de areia descartada de fundição em peso acarretou numa diminuição do percentual de silte e argila, caindo de aproximadamente 46% para 25%. Como anteriormente frisado, o objetivo da adição era tornar o solo mais arenoso, para então o mesmo apresentação uma expansão menor.

3.2.3.2. Limites de Consistência (LL e LP)

O ensaio de limite de liquidez do material, segundo os procedimentos do DNER-ME 122 (1994), foi realizado em 5 pontos distintos, todos dentro do intervalo entre 15 e 35 golpes. O resultado pode ser observado na figura 3.16, onde o limite de liquidez encontrado foi de 19%, correspondente a umidade do solo aplicada a 25 golpes.

Figura 3.16 – Limite de liquidez da mistura argila-ADF

Fonte: Autor

Posteriormente foi realizado o limite de plasticidade do solo, onde foram utilizadas somente 4 amostras, ao invés de 5, como recomenda a norma. Isto se justifica pelos ensaios ter sido realizado no laboratório de pavimentação da UDESC, com datas e horários pré-estabelecidos. Devida a presença considerável do material arenoso, que tornava a amostra quebradiça, a execução do LP tomou uma quantidade de tempo superior ao esperado, e como já se estava perto do horário de fechamento, optou-se por seguir com apenas os 4 corpos de prova.

Esta escolha não interferiu a confiabilidade do ensaio, pois das 4 amostras (o recomendado eram 5 amostras), 3 delas não diferiram em mais de 5% da média da umidade, número este que segundo a norma é suficiente para conclusão do método. O valor encontrado para o limite de plasticidade é expresso na tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Limite de plasticidade da mistura argila-ADF

Ensaio	Nº Cápsula	W Cápsula	W Cápsula + solo úmido	W Cápsula + solo seco	h%	h méd%
1	36	12,06	13,73	13,52	14,38	14,52
2	3	9,83	12,56	12,20	15,19	h + 5%
3	72	11,89	13,71	13,49	13,75	15,25
4	37	11,87	13,97	13,70	14,75	h - 5%
						13,79

Fonte: Autor

Por último foi calculado o índice de plasticidade (IP) do solo, obtido matematicamente pela subtração do LL pelo LP. O valor da tabela 3.11 classifica o solo como fracamente plástico, todavia que o IP está entre 1 e 7. A diminuição do IP do solo, se comparando com o material argiloso é esperada, visto que o IP mede a plasticidade dos solos, e com a mistura parte do material argiloso foi substituído por um material arenoso, sendo este um solo que em geral não apresenta plasticidade.

Tabela 3.11 – Índice de plasticidade da mistura argila-ADF

Índices de Consistência	
Limite de Liquidez (LL)	19
Limite de Plasticidade (LP)	15
Índice de Plasticidade (IP)	4

Fonte: Autor

3.2.3.3. Massa Específica Real dos Grãos

O Para o ensaio, regido pela NBR 6508/84, foram tomadas cerca de 100g do material da mistura argila-ADF passante na peneira de abertura 4,8mm, onde metade foi utilizado para determinação da massa específica no picnômetro e a outra metade para determinar a umidade do material. O resultado é mostrado na tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Massa específica real dos grãos da mistura argila-ADF

(Ws) Massa Solo Seco	49,56g
(W ₂) Massa Picnômetro/Água/Solo	655,66g
(W ₁) Massa Picnômetro/Água	624,59g
Υ_T	0,9977
Massa Específica Real dos Grãos (G)	2,67 g/cm³

Fonte: Autor

3.2.3.4. Compactação Proctor, CBR e expansão do solo

Os resultados dos ensaios de compactação Proctor, CBR e expansão do solo provém do trabalho realizado por MACHADO (2015), devido ao fato do material já estar previamente alocado no laboratório da UFSC, e os ensaios acima citados já terem sido efetuados. A tabela 3.13 compara os resultados para o material argiloso e

para a mistura de argila de areia de fundição, considerando uma energia intermediária de compactação. Destaca-se que durante a preparação da amostra, a mistura deve ser muito bem efetuada, para garantir um material homogêneo, com mesmos teores de umidade e com um nível de entrosamento entre as partículas.

Tabela 3.13 – Resultado da compactação, CBR e expansão do solo argiloso e mistura de argila com ADF para energia intermediária de compactação Proctor

	Argila	50% Argila 50% ADF
Densidade seca máxima (g/cm ³)	1,575	1,683
Umidade ótima (%)	19,7	15,8
CBR (%)	13,29	11,92
Expansão (%)	2,03	0,35

Fonte: Adaptado de MACHADO (2015)

Pela tabela conclui-se que o uso da ADF acarretou em uma pequena diminuição no valor do CBR, visto que as propriedades cimentícias da ADF não agregam num aumento da resistência mecânica do solo (MACHADO, 2015). Já a expansão de 0,35% possibilita a utilização da mistura na camada de reforço do subleito, visto que a normatização do DNIT 138 (2010) limita o valor da expansão em 1% nesta camada.

3.2.3.5. Considerações à utilização da mistura Argila-ADF

Os ensaios laboratoriais realizados na mistura eliminaram o problema apresentado da expansibilidade do solo, uma vez que o resultado da mesma mostrou uma expansão de 0,35% para energia de compactação intermediária, ficando assim dentro dos limites impostos pelo DNIT para a aceitação do material na camada de reforço. A respeito do resultado do índice de suporte Califórnia, as considerações impostas eram de que o CBR do material de reforço fosse maior do que o de subleito. Os resultados mostram que o CBR do subleito, para energia normal de compactação, foi de 8,77%, já o CBR da mistura argila-ADF, para energia intermediária de compactação, foi de 11,92%. Nota-se que o subleito, compactado na energia normal, foi comparado ao reforço, compactado na energia intermediária, isto ocorre devido as solicitações no pavimento diferirem de uma camada para outra.

Como as duas condições foram atendidas, conclui-se que a mistura é apta para servir como a camada de reforço de subleito do pavimento. É importante enfatizar que de acordo com o resultado dos ensaios de CBR e expansão do solo do subleito, não era necessária uma camada de reforço, mas optou-se por sua utilização no projeto por principalmente dois fatores. O primeiro é devido ao tráfego de veículos pesados no binário, que é uma das principais vias da cidade, e o segundo é que foi feito um estudo pontual (referente ao CBR), tendo-se poucas informações da via em geral.

3.2.4. Saibro Arenoso (Sub-base)

As sub-bases são elementos estruturais intermediários entre a placa de concreto e o subleito, e são de importância primordial ao desempenho do pavimento. Essa camada possui 3 funções principais (PITTA, 1989):

- a) Eliminar a possibilidade de ocorrência de bombeamento de solos finos plásticos: o processo de bombeamento é a expulsão dos finos plásticos de um solo através das juntas, bordas ou trincas, diminuindo drasticamente a capacidade de suporte do subleito, uma vez que o fenômeno provoca profundas alterações no esqueleto sólido do solo. Uma espessura adequada para sub-base pode evitar o processo;
- b) Evitar variações excessivas do material do subleito: em casos de solos expansivos, a presença ou ausência de água no subleito pode causar fenômenos de expansão ou retração, induzindo deformações que se não causarem o colapso da estrutura, vão prejudicar bastante o rolamento dos veículos;
- c) A presença da sub-base uniformiza o comportamento mecânico da fundação ao longo do piso, em alguns casos até aumenta sua resistência.

O material utilizado como sub-base granular do projeto foi o saibro arenoso, que é um solo residual areno-argiloso, comumente pertencente ao horizonte C, podendo conter pedregulhos provenientes de alterações de rochas graníticas ou gnáissicas (DNIT, 2006). O solo foi extraído da jazida localizada na zona oeste de Joinville.

O saibro foi adotado em contrapartida com o projeto da Prefeitura, que adotou uma camada de CCR (Concreto compactado a rolo) para a sub-base. Essa escolha se justifica pelo fato de que o CCR, além de ser uma solução consideravelmente mais

cara, não tem um controle tecnológico tão apurado, e sua camada é feita em grandes extensões (e não em placas), facilitando o aparecimento de trincas pela variação volumétrica. BERNUCCI *et al* (2008) afirma que o saibro é um material largamente empregado na camada de sub-base, mas alerta que apesar do índice de suporte Califórnia ser normalmente elevado, o saibro pode apresentar elevada deformabilidade, devido à sua natureza mineralógica, devendo ser empregado com os devidos cuidados. O material utilizado para os ensaios é mostrado na figura 3.17.

Figura 3.17 – Saibro arenoso



Fonte: Autor

3.2.4.1. Granulometria do solo

A determinação da granulometria do saibro é importante para a caracterização e aceitação do material, visto que a tabela 3.14 apresenta as faixas granulométricas admissíveis para as camadas de sub-base granular em pavimentos de concreto.

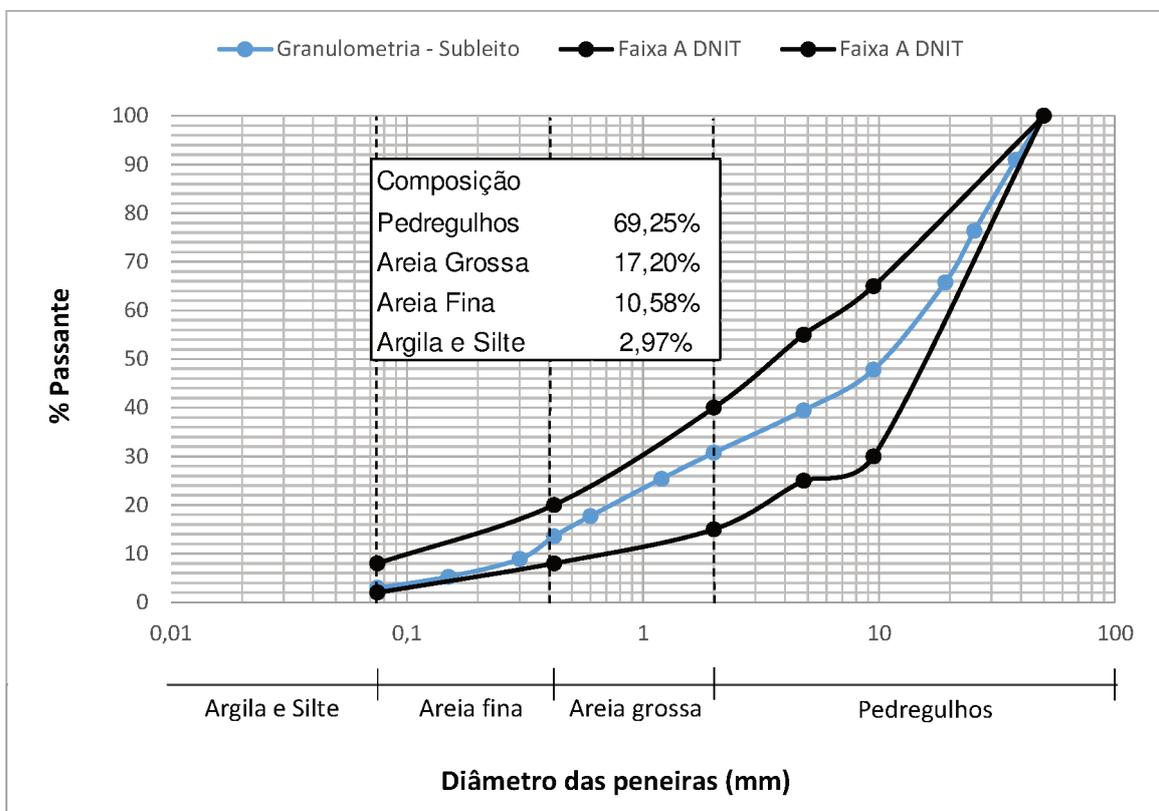
Tabela 3.14 – Faixas granulométricas recomendadas para sub-bases granulares

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passando, em massa (%)					
	A	B	C	D	E	F
50,00	100	100	-	-	-	-
25,00	-	75-95	100	100	100	100
9,5	30-65	40-75	50-85	55-100	-	-
4,75	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
2,00	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
0,425	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
0,075	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Fonte: DNIT (2005)

Para o ensaio de granulometria do saibro, regido pela NBR 7181/84, separou-se 4918g do solo seco ao ar. A elevada quantidade de material é devido à alta quantidade de materiais pedregulhosos, como pode ser observado na figura 3.17. Por este motivo, diferentemente dos outros solos, no saibro foram utilizadas peneiras de aberturas maiores, como as de 50mm, 38,1mm e 25,4mm, afim de se ter uma melhor interpretação do resultado. Já para o cálculo da umidade higroscópica, tomaram-se 50g do solo passante na peneira de 2mm, o que resultou em uma umidade de 1,215%.

Figura 3.18 – Curva granulométrica do saibro com faixa granulométrica A do DNIT



Fonte: Autor

Analisando a curva granulométrica do saibro, observa-se que o material é de granulação mais grossa, visto que dos 4918g de solo seco ao ar, mais de 3390g ficaram retidos no peneiramento grosso. No peneiramento fino, verificou-se que há uma predominância de areia grossa, e praticamente a inexistência de argila e silte. As porcentagens de material passante em cada uma das peneiras colocam o saibro na faixa A do DNIT (figura 3.18), que é caracterizada com uma faixa de granulação aberta, permitindo o rápido escoamento das águas que permearam o revestimento.

3.2.4.2. Limites de Consistência (LL e LP)

Devido ao saibro ser composto basicamente por pedregulhos (69,25%) e areia (27,78%), iniciou-se a determinação dos limites de consistência pelo limite de plasticidade do solo. O método foi executado de acordo com as especificações do DNER-ME 082 (1994), resultando em um solo classificado como não plástico (NP), já que o mesmo era muito quebradiço, impossibilitando a moldagem do cilindro padrão.

3.2.4.3. Massa Específica Real dos Grãos

Para a execução do ensaio, regido pela NBR 6508/84, foram tomadas cerca de 100g de saibro passante na peneira de abertura 4,8mm, onde metade foi utilizado para determinação da massa específica no picnômetro e a outra metade para a determinação da umidade do material. Utilizou-se a bomba de vácuo como método de remoção de ar. A tabela 3.15 apresenta o resultado do método.

Tabela 3.15 – Massa específica real dos grãos do saibro

(Ws) Massa Solo Seco	48,53g
(W2) Massa Picnômetro/Água/Solo	654,28g
(W1) Massa Picnômetro/Água	622,48g
γ_T	0,9978
Massa Específica Real dos Grãos (G)	2,89 g/cm³

Fonte: Autor

3.2.4.4. Compactação Proctor, CBR e expansão do solo

Os resultados do saibro para os ensaios de compactação Proctor, CBR e expansão do solo provém do estudo realizado por MACHADO (2015). A tabela 3.16 compara os resultados apresentados do saibro nas três energias de compactação. No entanto, para o estudo realizado neste trabalho, o saibro será utilizado na camada de sub-base do pavimento, e devido as características do tráfego do binário e da função dessa camada na estrutura, será utilizado para fins de dimensionamento os resultados da energia intermediária de compactação.

Tabela 3.16 - Resultado da compactação, CBR e expansão do saibro

Energia Proctor	Normal	Intermediária	Modificada
Densidade seca máxima (g/cm ³)	1,671	1,771	1,837
Umidade ótima (%)	16,6	14,4	12,1
CBR (%)	17,68	35,07	57,97
Expansão (%)	0,04	0,09	0,07

Fonte: Adaptado de MACHADO (2015)

Os resultados apresentados mostram um considerável valor do índice de suporte Califórnia do saibro, assim como uma expansão baixa, resultados esperados para o material. Isto pode ser explicado pelo ensaio de granulometria, que indica uma elevada presença de pedregulhos e areia, materiais que tipicamente apresentam elevado CBR e baixa expansão. Pelos dados da tabela 3.16 nenhum resultado impede a aceitação do material na camada de base do pavimento, mas como anteriormente alertado, deve-se tomar um cuidado especial à elevada deformabilidade do saibro, que será discutido no item abaixo a respeito das considerações acerca do saibro.

3.2.4.5. Considerações acerca do saibro

Como o pavimento do binário é destinado a um corredor de ônibus, recebendo cargas concentradas, se faz necessária a verificação da elevada deformabilidade do saibro, como discutido anteriormente, afim de garantir um pavimento que atenda a seu propósito e garanta segurança e economia ao usuário. Para tal, MACHADO (2015) realizou o ensaio de índice de desgaste após compactação Marshall sem ligante (IDm) no saibro, o mesmo material utilizado para os ensaios de caracterização deste capítulo. O método consiste na diferença entre a granulometria natural e após a compactação. O resultado foi de 7,7%, ficando abaixo do índice de desgaste máximo sem ligante após compactação Marshall (8%), segundo o DNER-ME 401 (1999).

De acordo com o resultado IDm, o material rochoso pode ser considerável estável, sem grandes deformações. Em relação aos outros ensaios as quais o saibro foi submetido, não há nenhuma oposição a aceitação do material na camada de sub-base do projeto de pavimentação, sendo desnecessário demais considerações.

3.3. CLASSIFICAÇÃO TRB DOS SOLOS

Este item do trabalho se trata da classificação dos solos utilizados no projeto de pavimentação, em que se enquadram o subleito arenoso, a mistura de argila-ADF (reforço de subleito) e o saibro (sub-base). O TRB (Transportation Research Board), recomendado pela AASHTO, foi o sistema escolhido para classificação dos materiais por um ser método consagrado mundialmente e muito utilizado para o reconhecimento de solos para construção de pavimentos rodoviários.

Na classificação TRB, aprovada em 1945 e resultante das alterações feita no antigo HBR (Highway Research Board), os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em funções de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo (DNIT, 2006). Através de uma tabela classificatória (tabela 3.17), os materiais são divididos em duas grandes classes, granulares ou silto-argilosos, e então separados em grupos e subgrupos através do processo de eliminação, partindo do lado esquerdo até o direito da referida tabela, até se encontrar a classificação correta.

Tabela 3.17 – Classificação TRB dos solos - AASHTO

CLASSIFICAÇÃO GERAL	SOLOS GRANULARES (35% ou menos passando na peneira N. 200)						SOLOS SILTO ARGILOSOS (> 35% passante na N. 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passante na: N°. 10 (2,0mm) N°. 40 (0,42mm) N°. 200 (0,075mm)	≤ 50		≥ 51								
	≤ 30	≤ 30		≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
	≤ 15	≤ 25	≤ 10								
Característica fração passante na N°. 40											
Lim. Liquidez (%)				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
Índ. Plasticidade (%)	≤ 6	≤ 6	NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Índice de Grupo (IG)	0	0	0	0	0	≤ 4	≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20
Materiais constituintes	Predregulho fino areia ou pedra		Areia fina	Pedregulhos ou areia siltosas ou argilosas				Solo siltoso		Solos Argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom						Sofrível a mau				

Fonte: Adaptado do DNIT (2006)

A seguir é mostrado o resultado da classificação dos solos, assim como os grupos e subgrupos aos quais os materiais pertencem neste sistema de classificação, relacionadas a sua utilização em pavimentação, de acordo com o DNIT (2006):

- Subleito Arenoso – Grupo A.2.4 (IG=0);
- Mistura Argila-ADF (reforço do subleito) – Grupo A.2.4 (IG=0);
- Saibro Arenoso (sub-base) – A.1.a (IG=0).

O subgrupo A.2.4, referente aos materiais do subleito e do reforço do subleito, incluem os solos contendo 35% ou menos de material passante na peneira de abertura 0,075mm, denominado como materiais granulares. Este grupo abrange materiais tais como pedregulhos e areia grossa, em que o teor de silte, argila e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos no grupo A-1, e ainda com areia fina com silte não plástico excedendo os limites do grupo A-3 (DNIT, 2006). A respeito da utilização destes solos como subleito, ambos têm comportamento de excelente a bom, já que em geral apresentam boa resistência e baixa expansibilidade.

Sobre o subgrupo A.1.a, em que se enquadra o material da sub-base do pavimento, os solos contêm, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante (DNIT, 2006).

3.4. CONCRETO (REVESTIMENTO)

Para o dimensionamento do pavimento em questão, utilizou-se um revestimento rígido, de concreto de cimento Portland. O concreto é um dos materiais mais empregados pelo ser humano, utilizado em larga escala em obras de infraestrutura e na construção civil, sendo composto basicamente por uma mistura de cimento, agregados e água, podendo ou não conter aditivos e adições.

Como principais características, o concreto empregado na execução de pavimentos rígidos deverá apresentar uma baixa variação volumétrica, uma trabalhabilidade compatível com o equipamento a ser empregado no espalhamento, adensamento, impermeabilidade, bom acabamento e uma resistência adequada para suportar os carregamentos provenientes da frota circulante na via (DNIT, 2005).

3.4.1. Traço do Concreto

Para que todas as condições do concreto sejam atendidas, é necessário que um cuidadoso estudo do traço do concreto, que considere o tipo e a eficácia do cimento, porcentagem de água na mistura, temperatura do concreto, tipos de aditivos e adições e métodos de cura, a fim de ser verificadas as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido (DNIT, 2005). O traço utilizado neste trabalho é fruto do estudo realizado por BARRA e LIMA Jr. (2001), que determinaram a dosagem do concreto baseada na de um pavimento construído em Memphis, Tennessee.

Na solução adotada pelos autores foi incorporado ao concreto fibras de aço e polipropileno, utilizados para reforçar materiais de comportamento frágil. A fibra possui elevada rigidez e resistência à tração, que permite que o concreto suporte melhor as tensões provenientes dos carregamentos, fazendo com a energia liberada seja distribuída ao longo da estrutura, evitando sobrecarga e que danos pontuais se transformem em fendas ou rachaduras. Em suma, o comportamento elástico das fibras impede que as microfissuras ocorram rapidamente na estrutura do concreto. A adição destes materiais fica normalmente na faixa entre 0,5% a 2,0% em volume, todavia que para valores acima deste limite se perde a trabalhabilidade do concreto e ocorre a dispersão das fibras. A figura 3.19 ilustra algumas fibras de polipropileno.

Figura 3.19 – Fibra de Polipropileno



Fonte: Geofoco – Fibra para concreto

O traço final do concreto foi então calculado, conforme os estudos de BARRA e LIMA Jr. (2001), em consonância com os requisitos estabelecidos pelas normas vigentes no Brasil e pelos fabricantes. Os resultados apresentados são:

- Traço Unitário → 1 : 2 : 3 ou 1 : 5
- Relação a/c: → 0,50
- Consumo de cimento → 369 kg/m³
- Consumo de fibra de PP → 0,63 kg/m³

A experiência com concretos para pavimentos recomenda relações água/cimento entre 0,4 e 0,56 e requer consumo de cimento de 320 a 430 kg/m³, para que se obtenha um teor de pasta adequado, capaz de cobrir a grande superfície específica das fibras (BARRA e LIMA Jr, 2001). Pela análise dos resultados se verifica que os mesmos se encontram nas faixas aceitáveis de valores.

Além da determinação da dosagem do concreto, é necessário a verificação de sua eficiência quanto ao suporte aos carregamentos aplicados na estrutura. Para tal, foram testados 10 corpos de prova aos esforços mecânicos de compressão simples, compressão diametral e à tração na flexão, sendo o último o principal parâmetro do concreto para o dimensionamento de pavimentos rígidos. Este valor é importante, todavia que quando uma placa é carregada, são introduzidos esforços de compressão e de tração devido a flexão, e como a resistência do concreto é muito menor na tração, como forma de segurança, é este o valor considerado no dimensionamento (DNIT, 2005; OLIVEIRA, 2000). A tabela a seguir apresenta os resultados dos ensaios.

Tabela 3.18 – Resultados dos ensaios de ruptura dos corpos de prova aos 28 dias

Tipo do Ensaio	Resultado (MPa)
Compressão Simples	35 a 40
Compressão Diametral	3,0 a 3,7
Tração na Flexão	4,5 a 5,0

Fonte: Dados Laboratoriais (BARRA e LIMA Jr, 2001)

Em posse do resultado da tabela 3.18, a resistência característica à tração na flexão ($f_{ctM,k}$) adotada no projeto deste trabalho foi de 4,5 MPa aos 28 dias, já todos os corpos de prova atingiram este valor, o qual também é o valor recomendado pela ABCP em projetos de pavimentos rígidos. OLIVEIRA (2000) afirma que adotar este período de dias é o mais correto, visto que o concreto ganha resistência com o tempo e que a maior parte do carregamento ocorrerá após este período.

CAPÍTULO 4

DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO

Com bases nos ensaios de caracterização dos materiais pertencentes ao projeto de pavimentação e aos dados pertinentes do solo do subleito, todos apresentados no capítulo anterior, é possível realizar o dimensionamento do pavimento do corredor de ônibus. O dimensionamento estrutural de pavimentos tem como principais finalidades a determinação das espessuras das camadas, a definição dos materiais constituintes e elaboração das especificações técnicas de projeto (DNIT, 2005; MESQUITA, 2001). Na elaboração do projeto se analisam basicamente 3 fatores:

1. As propriedades do concreto, onde se destaca basicamente a resistência do mesmo, sendo firmadas as exigências quanto ao módulo de ruptura à tração na flexão, a idade do concreto a ser considerada na avaliação do módulo de ruptura, o princípio de ruptura do concreto por fadiga e a relação entre o número de solicitações de carga e a relação de tensões (MESQUITA, 2001);
2. A fundação do pavimento, onde se analisou no capítulo 3 deste trabalho o suporte do subleito, determinado laboratorialmente pelo CBR, verificando a necessidades de camadas complementares, como as de reforço e sub-base;
3. O tráfego, envolvendo a contagem e a classificação dos veículos para o estudo das tensões causadas pelas cargas, assim como da posição mais crítica destas em relação as placas de concreto, os fatores de segurança, o período de projeto e a projeção do tráfego (DNIT, 2005; MESQUITA, 2001).

4.1. ESTUDO DO TRÁFEGO

Este item do trabalho visa discutir acerca da frota circulante nos corredores de ônibus das ruas Dr. João Colin e Blumenau, no eixo Norte-Sul da cidade de Joinville, SC. Apesar dos corredores serem, em geral, uma faixa exclusiva para o transporte coletivo, alguns veículos comuns também usufruem do espaço, como é o caso dos táxis, os veículos da polícia, as ambulâncias e os veículos de passeio que desejam fazer a conversão a direita, invadindo essas faixas num espaço delimitado.

Segundo o estudo da prefeitura (JOINVILLE: CIDADE EM DADOS, 2015), no ano de 2014 a frota circulante de ônibus urbanos na cidade era de 364 veículos, com as linhas sendo operadas por duas empresas, a Transtusa e a Gidion. A tabela 4.1 apresenta os diferentes tipos de ônibus utilizados no transporte coletivo do Município.

Tabela 4.1 – Frota de Ônibus do transporte coletivo em Joinville

Tipo de ônibus					
Ano	Padronizado (13,2m)	Padronizado (12,0m)	Convencional	Micro-ônibus	Articulado
2014	173	33	117	27	19

Fonte: Adaptado de IPPUJ: Joinville Cidade em Dados 2015

Os veículos padrão de ônibus da cidade de Joinville, em que de acordo com a tabela 4.1 se enquadram os padronizados (13,2 e 12,0 metros) e os convencionais, apresentam em média comprimento igual a 14 metros, sendo compostos geralmente por 2 eixos. Já os ônibus articulados, ou mais conhecidos como sanfona, são formados por duas partes anexadas por um reboque, sendo compostos geralmente por 3 ou 4 eixos, apresentando em grande maioria comprimento na faixa de 18 metros. A largura de todos esses ônibus citados acima varia entre 2,4 a 2,6 metros. Os valores referentes ao comprimento e largura médio dos tipos de ônibus foram obtidos conforme a portaria N° 63 do DENATRAN (2009), que homologa os veículos e suas combinações para o transporte de cargas e de passageiros.

Com os dados da frota, o principal parâmetro a ser determinado no estudo do tráfego é o número N de repetições de carga equivalente. O N adotado neste estudo foi repassado pelo IPPUJ, alusivo ao projeto da prefeitura das ruas Dr. João Colin e Blumenau. Além de dados da frota, para seu cálculo necessita-se conhecer o Volume Médio Diário Anual de Veículos (VMDA), a taxa de crescimento da frota, o período do projeto, os fatores de carga (FC), de eixo (FE) e o fator climático regional (FR).

O projeto do órgão da prefeitura prevê o dimensionamento do novo pavimento de cada uma das ruas, as quais apresentam 3 faixas de trânsito cada, sendo duas destinadas ao tráfego normal de veículos e a outra, separada por um canteiro, exclusiva ao transporte coletivo. É importante se enfatizar que o IPPUJ não realizou um estudo específico para as vias comuns e outro para os corredores de ônibus, e sim considerou a demanda geral, empregando o resultado único do número N para o

dimensionamento de todas as faixas. Como não houve essa distinção entre as faixas de trânsito, nos cálculos de VMDA são considerados todos os tipos de veículos (passeio, ciclomotores, caminhões e ônibus). Também não consta nos cálculos o eixo simples de roda dupla de 8,2 toneladas, o qual é um parâmetro fundamental. Logo, os cálculos do IPPUJ apresentam falhas, não remetendo a uma situação real.

Tendo em posse os problemas citados acima, procurou-se com os órgãos competentes da cidade informações e dados acerca do tráfego, exclusivamente nos corredores de ônibus das vias citadas. Como não foi possível a obtenção destes dados (inexistência de informações do tráfego), impossibilitando o cálculo correto do número N, não houve alternativas a não ser utilizar o valor fornecido pelo IPPUJ, com a justificativa de que o mesmo também adotará este valor no projeto do pavimento da faixa destinada ao transporte coletivo. Como as contagens do órgão da prefeitura englobam todos os veículos, garante-se ao menos que o valor adotado para o número N não está subdimensionado. Os resultados são mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Determinação do número N (Rua Blumenau)

Parâmetros Necessários para o cálculo do número N	Resultado
Volume Médio Diário Anual da via (VMDA)	19.555
Volume Inicial (Vo) da faixa em estudo	9.778
Taxa de crescimento da frota veicular do Município (%)	3,95
Período de projeto (p) em anos	20
Volume Total do tráfego para o período p de projeto (crescimento Geométrico)	113.142.700
Fator de Carga (FC)	0,0210
Fator de Eixo (FE)	2,00
Fator Climático Regional (FR)	1,00
Cálculo do Número N	Resultado
Número N (para o período p de projeto, com base no crescimento linear da frota)	4,192E+06

Fonte: Dados do IPPUJ

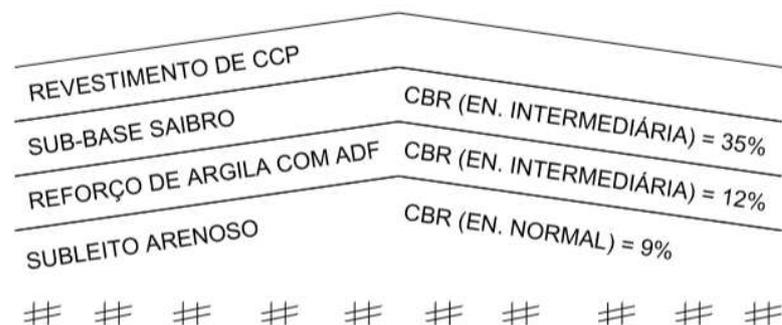
Pela tabela 4.2 percebe-se que o número N foi calculado com base no crescimento aritmético, todavia que após a análise dos dados históricos, verificou-se uma tendência de baixo crescimento da frota de ônibus, segundo dados da prefeitura. O fato do estudo ser realizado apenas na rua Blumenau foi justificado pelo IPPUJ devido a semelhança de ambas as ruas no que diz respeito a extensão e ao tráfego.

4.2. DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DO PAVIMENTO RÍGIDO

Este item do trabalho visa apresentar os procedimentos que foram utilizados para a determinação da espessura do pavimento rígido dos corredores de ônibus das ruas Dr. João Colin e Blumenau. Para tal, foi utilizado o método da Portland Cement Association (PCA) de 1984, por se tratar de um método consagrado na pavimentação. O método considera dois modelos de ruptura do pavimento, por fadiga e erosão, permitindo combinar facilmente diferentes fatores de projeto, propiciando a análise acelerada de muitas soluções alternativas (DNIT, 2005; OLIVEIRA, 2000).

A estrutura do pavimento é dividida em 4 camadas, o revestimento de concreto, a sub-base de saibro, o reforço do subleito de argila misturado com areia descartada de fundição e o subleito arenoso. O esquema das camadas, incluindo o valor aproximado do CBR de cada uma delas, é ilustrado na figura 4.1.

Figura 4.1 – Esquema da estrutura do pavimento



Fonte: Autor

Para a determinação da espessura das camadas de sub-base e reforço do subleito, o método da PCA/84 indica a adoção de uma faixa de valores, levando em conta algumas características da via. Para o caso de camadas de reforço ou sub-bases não tratadas, as espessuras estão numa faixa entre 15cm a 40cm, com este valor variando de acordo com as características do tráfego, clima local, terreno e resistência do solo do subleito, por meio do resultado do ensaio do CBR.

O solo do subleito apresenta boas características, como uma elevada resistência (CBR = 9%) e baixa expansão, uma vez que é um solo tipicamente arenoso. O tráfego de veículos na via é moderado ($4,19 \times 10^6$), ficando o clima como único fator preocupante, já que Joinville historicamente registra elevados níveis de precipitação

ao ano. Com base nessas informações, as espessuras adotadas para as camadas de sub-base e reforço do subleito foram de 20cm cada, um valor considerado suficiente para garantir a qualidade do pavimento. O próprio DNIT (2005) afirma que espessuras perto do limite (40cm) correspondem, quase sempre, a pavimentos submetidos a cargas elevadas sobre fundações moles, o que não é o caso do solo deste trabalho.

4.2.1 Revestimento (Concreto de cimento Portland)

Para o procedimento de cálculo da espessura da camada de revestimento do pavimento rígido, torna-se necessário a determinação de algumas características do sistema. Segundo o método PCA/84, os parâmetros para o cálculo da espessura são:

- a) Coeficiente de recalque (k) no topo do sistema: este valor, que caracteriza a capacidade de deformação elástica do subleito, é obtido em função de uma correlação entre a espessura adotada na sub-base e o CBR do subleito. Como o CBR do subleito é aproximadamente 9%, e a sub-base de saibro possui uma espessura de 20cm, os coeficientes de recalque no subleito e no topo do sistema são, respectivamente, 47 MPa/m e 63 MPa/m, conforme identificado na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Aumento de k devido à presença de sub-base granular

Valor do suporte do subleito		Coeficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de sub-base iguais a (cm)			
CBR (%)	K (MPa/m)	10	15	20	25
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

Fonte: Adaptado de PITTA (1998)

- b) Coeficiente de segurança de carga (FS_c) adotado para o projeto: no dimensionamento da espessura das placas, são considerados os fatores de segurança para as cargas, apresentados na tabela 4.4. O valor adotado neste projeto foi de 1,1, visto que o corredor de ônibus estará submetido a um tráfego moderado de eixos simples de roda dupla, referente a frota dos ônibus de Joinville.

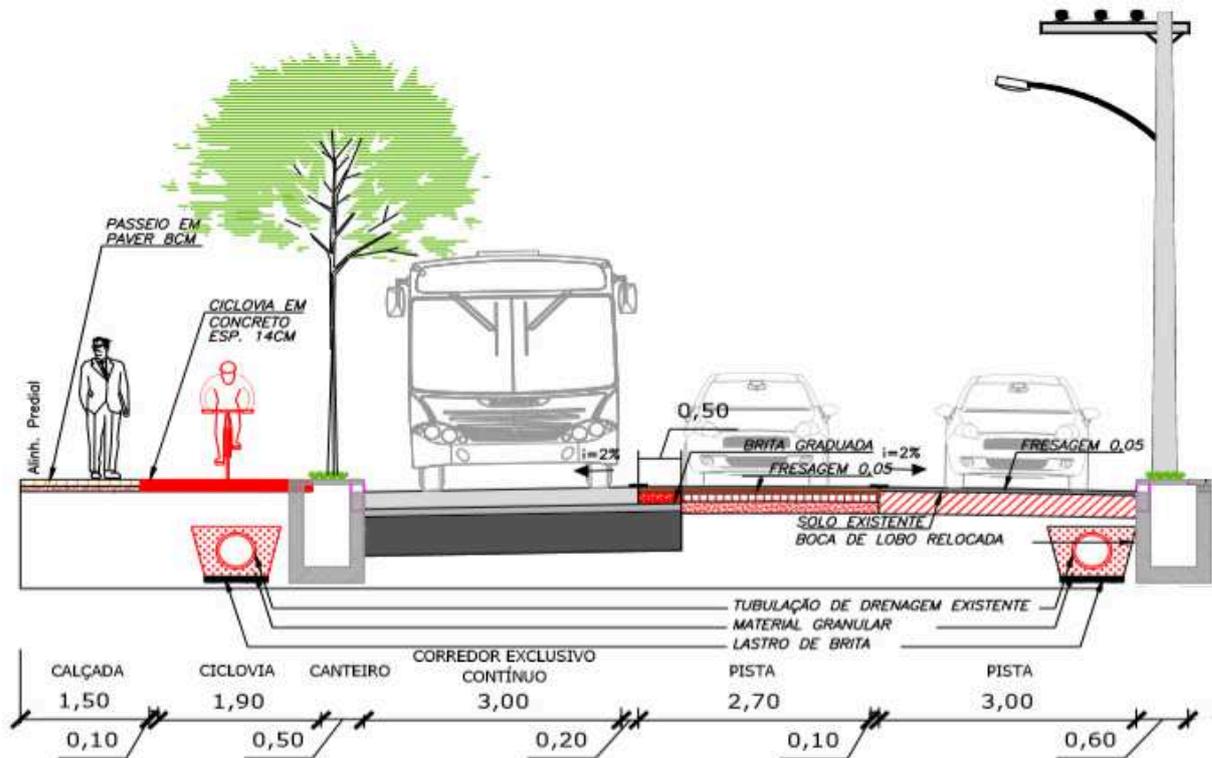
Tabela 4.4 – Fatores de segurança para as cargas

Tipo de Pavimento	FS_c
- Para ruas com tráfego com pequena porcentagem de caminhões e pisos em condições semelhantes de tráfego (estacionamentos, por exemplo)	1,0
- Para estradas e vias com moderada frequência de caminhões	1,1
- Para altos volumes de caminhões	1,2
- Pavimentos que necessitem de um desempenho acima do normal	Até 1,5

Fonte: DNIT (2005)

- c) Resistência à tração na flexão do concreto: 4,5MPa (BARRA e LIMA Jr, 2001);
- d) Número N de solicitações: $4,192 \times 10^6$ (dado repassado pelo IPPUJ);
- e) Barras de transferência de carga: sua utilização ou não depende da avaliação do tráfego, recomendando-se o seu uso para um número $N > 5 \times 10^6$. Como pôde se observar, o número N utilizado neste projeto é inferior ao limite estipulado, mas mesmo assim optou-se por utilizar as barras de transferência. Essa escolha, visando a segurança da estrutura do pavimento, se deu em consequência do número N ter ficado próximo ao limite, e do mesmo não ter sido calculado de forma correta, pois não se realizou a contagem exclusivamente no corredor de ônibus, e sim em todas as faixas (ver capítulo 4.1 – Estudo do Tráfego).
- f) Período de projeto: 20 anos
- g) Acostamento de concreto: não será utilizado, pois o pavimento estará confinado de um lado pelo canteiro, que separa o corredor de ônibus das pistas de tráfego comum, e do outro lado pelo meio fio da calçada. A figura 4.2, cedida pelo IPPUJ para o uso exclusivo neste trabalho, ilustra a seção transversal do projeto geométrico da rua Blumenau, que confirma que não há necessidade da utilização do acostamento de concreto no projeto.

Figura 4.2 – Seção transversal do pavimento da rua Blumenau



Fonte: IPPUJ

Com os parâmetros determinados, torna-se possível o cálculo da espessura do revestimento do pavimento rígido. O procedimento do PCA/84 foi realizado de acordo com o roteiro de dimensionamento do Manual de Pavimentos Rígidos, do DNIT (2005), onde inicialmente foi calculado o número de repetições previstas para os veículos de eixo simples e duplo, segundo os dados do IPPUJ da contagem de tráfego.

Tabela 4.5 – Resultado do N° de repetições previstas e da carga por eixo

	Eixo Simples	Eixo Duplo
Volume Médio Diário Anual (VMDA) – Todos os tipos de veículo	19.555	
Porcentagem da Frota de Veículos Pesados (%)	3,393	1,403
Volume Médio Diário Anual dos Veículos Pesados ao 1° ano	663,501	274,357
N° de Repetições Previstas para período de projeto de 20 anos	13.270	5.487
Carga por eixo (tonelada) x Fator de segurança de carga	7,0x1,1 = 7,7	8,2x1,1 = 9,0

Fonte: Autor

Foram testadas várias espessuras para a camada de revestimento de CCP, afim de se escolher a que melhor se comporta, considerando os critérios de consumo de fadiga e de erosão. Os resultados do método PCA/84 são mostrados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Dimensionamento do pavimento de Concreto (PCA/84)

Espessura (cm)	TE Simples	TE Duplo	FF Simples	FF Duplo	FE Simples	FE Duplo	N° Admissível de Repetições de carga				Consumo Fadiga	Dano por Erosão
							ES (7,7 toneladas)		ETD (9,0 toneladas)			
							Fadiga	Erosão	Fadiga	Erosão		
12	3,480	2,791	0,77	0,62	3,49	3,54	80x10 ¹	28x10 ⁴	Ilimitado	42x10 ⁵	1658,75 %	4,87 %
13	3,114	2,510	0,69	0,56	3,39	3,45	60x10 ²	58x10 ⁴	Ilimitado	90x10 ⁵	221,17 %	2,35 %
14	2,808	2,270	0,62	0,50	3,29	3,36	50x10 ³	10x10 ⁵	Ilimitado	27x10 ⁶	26,54 %	1,36 %
15	2,551	2,072	0,57	0,46	3,20	3,28	18x10 ⁴	18x10 ⁵	Ilimitado	40x10 ⁶	7,37 %	0,75 %
16	2,332	1,912	0,52	0,42	3,12	3,20	10x10 ⁵	30x10 ⁵	Ilimitado	10x10 ⁷	1,33 %	0,44 %
17	2,144	1,772	0,48	0,39	3,04	3,14	Ilimitado	70x10 ⁵	Ilimitado	Ilimitado	0,00 %	0,19 %
18	1,975	1,644	0,44	0,36	2,96	3,08	Ilimitado	10x10 ⁶	Ilimitado	Ilimitado	0,00 %	0,13 %
19	1,835	1,544	0,41	0,34	2,89	3,01	Ilimitado	18x10 ⁶	Ilimitado	Ilimitado	0,00 %	0,07 %
20	1,708	1,445	0,38	0,32	2,83	2,95	Ilimitado	30x10 ⁶	Ilimitado	Ilimitado	0,00 %	0,04 %

N° Admissível de Repetições de Carga

TE (Tensão Equivalente)

FF (Fator de Fadiga)

FE (Fator de Erosão)

ES (Eixo Simples)

ETD (Eixo Tandem Duplo)

Fonte: Autor

Para ilustrar como se chegou aos resultados da tabela 4.6, será exemplificado a seguir todos os procedimentos do método, adotando-se uma espessura de tentativa igual a 14cm para a placa de concreto, onde os passos para o dimensionamento são:

- a) Determinar a tensão equivalente: para tal se utiliza a tabela A.1 (Anexos), já que o pavimento é sem acostamento de concreto e os veículos circulantes na via são de eixo simples e tandem duplo apenas. Nota-se que como o coeficiente de recalque k é igual a 63 (MPa/m) se torna necessário uma interpolação dos valores. Os resultados são mostrados na equação a seguir:

$$\frac{80 - 60}{2,68 - 2,83} = \frac{80 - 63}{2,68 - TE} \quad \text{logo } TE = 2,808 \text{ MPa (Eixo Simples)} \quad (1)$$

$$\frac{80 - 60}{2,16 - 2,29} = \frac{80 - 63}{2,16 - TE} \quad \text{logo } TE = 2,270 \text{ MPa (Eixo Tandem Duplo)} \quad (2)$$

- b) Determinar o fator de fadiga: calculam-se os fatores de fadiga pela simples divisão das tensões equivalente (eixo simples e tandem duplo) pela resistência do concreto adotada para o projeto, assim mostrado nas equações a seguir:

$$\frac{TE \text{ simples}}{f_{CTM,K}} = \frac{2,808 \text{ MPa}}{4,5 \text{ MPa}} \quad \text{logo } FF = 0,62 \text{ (Eixo Simples)} \quad (3)$$

$$\frac{TE \text{ duplo}}{f_{CTM,K}} = \frac{2,270 \text{ MPa}}{4,5 \text{ MPa}} \quad \text{logo } FF = 0,50 \text{ (Eixo Tandem Duplo)} \quad (4)$$

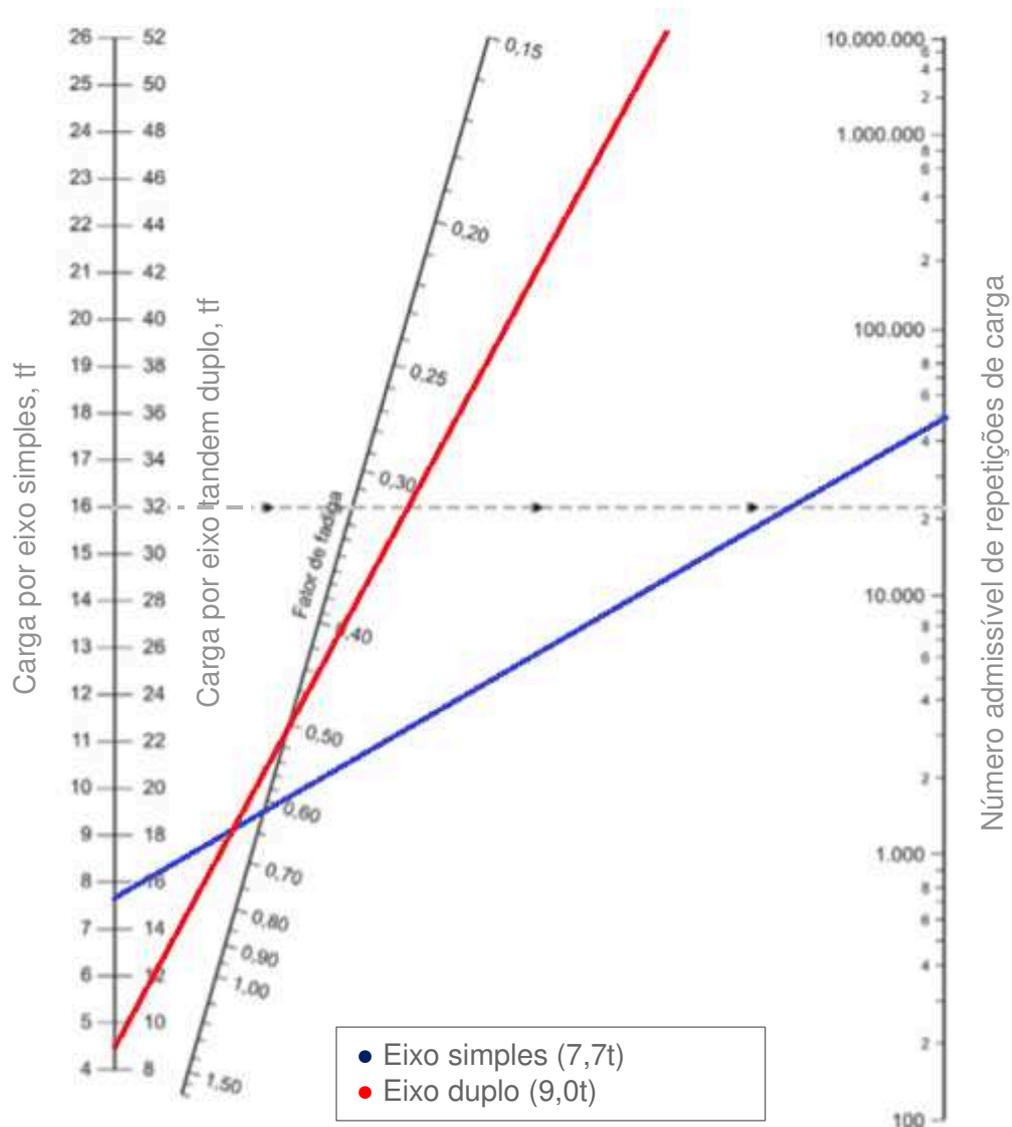
- c) Determinar os fatores de erosão: para tal se utiliza a tabela A.2 (Anexos), onde também é necessário a interpolação dos resultados, já que o coeficiente de recalque k é igual a 63 (MPa/m). As equações para se atingir os resultados são:

$$\frac{80 - 60}{3,28 - 3,29} = \frac{80 - 63}{3,28 - FE} \quad \text{logo } FE = 3,29 \text{ (Eixo Simples)} \quad (5)$$

$$\frac{80 - 60}{3,34 - 3,36} = \frac{80 - 63}{3,34 - FE} \quad \text{logo } FE = 3,36 \text{ (Eixo Tandem Duplo)} \quad (6)$$

- d) Com o fator de fadiga e as cargas por eixo (tabela 4.5), determinam-se o número de repetições de carga para os eixos simples e tandem duplo (na fadiga). O procedimento é realizado pela figura 4.3, onde se traça uma curva para eixo simples e outra para o tandem duplo, ambas passando pelo seu respectivo fator de fadiga, até a curva atingir a reta do número de repetições de carga. Nota-se que a curva azul, que representa o eixo simples de 7,7 toneladas, culminou em um número de repetições de carga de 50.000, já a curva vermelha, referente ao eixo tandem duplo de 9 toneladas, não atingiu nenhum ponto do número admissível de repetições, sendo então o valor considerado como ilimitado.

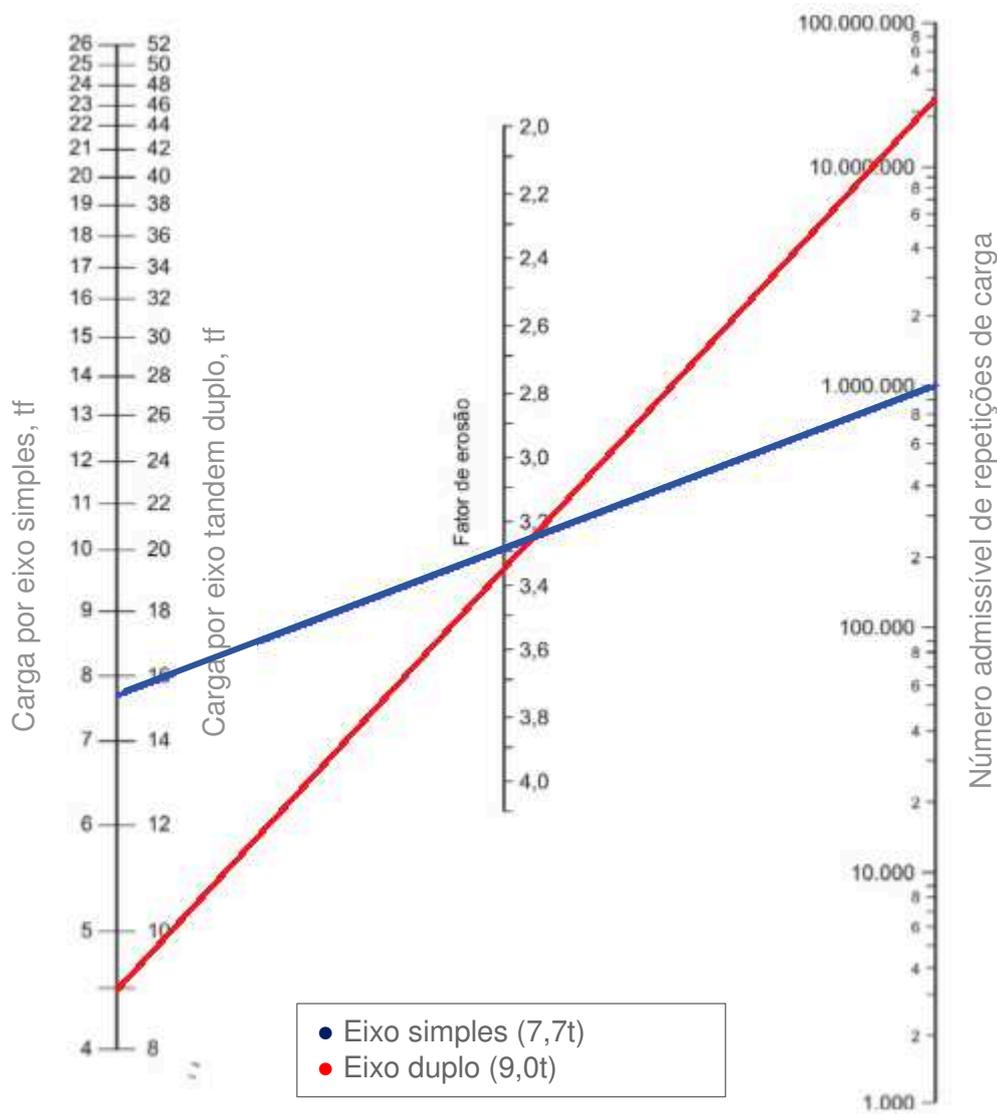
Figura 4.3 – Análise de fadiga (número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga, com ou sem acostamento)



Fonte: Adaptada do DNIT (2005)

- e) Com o fator de erosão e as cargas por eixo simples e tandem duplo (tabela 4.5) se determina o número de repetições admissíveis de carga para o fator de erosão. O procedimento é mostrado na figura 4.4, onde a curva azul representa o eixo simples de 7,7 toneladas, culminando num número de repetições de carga de 1.000.000. Já a curva vermelha, referente ao eixo tandem duplo de 9 toneladas, resultou num número de 27.000.000, assim como mostrado abaixo:

Figura 4.4 – Análise de erosão (número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão, sem acostamento de concreto)



Fonte: Adaptada DNIT (2005)

- f) Na determinação do consumo à fadiga e ao dano por erosão se dividem as repetições previstas para o período p de projeto (tabela 4.5) pelos seus respectivos números admissíveis de repetições de carga, para o eixo simples e

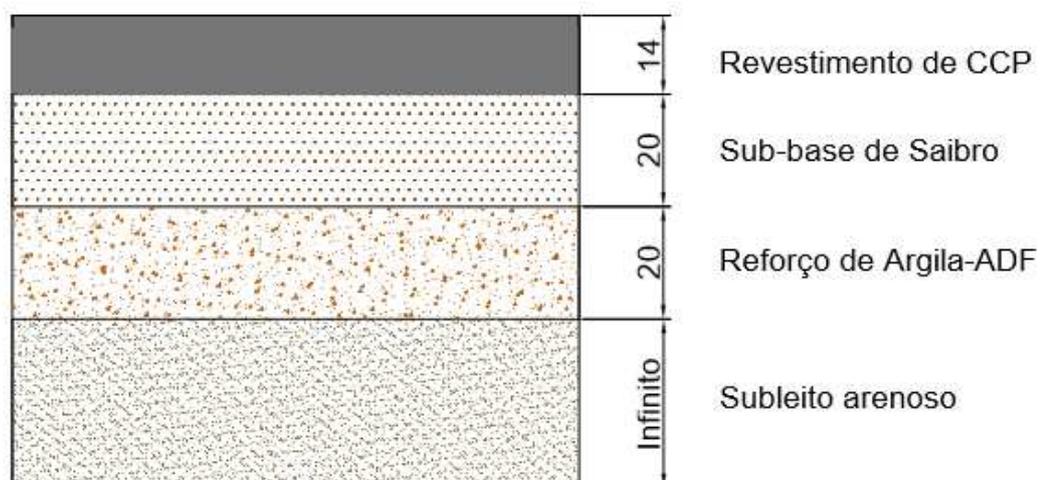
tandem duplo. O consumo à fadiga e o dano por erosão são então determinados pela soma das duas parcelas (ES e ETD), em porcentagem. A soma tem que cumprir os requisitos solicitados, isto é, não pode ser superior aos 100%, como ficou comprovado nas equações abaixo:

$$\text{Consumo à fadiga} = ES + ETD = \frac{13.270}{50.000} + \frac{5.487}{Ilim.} = 0,2654 + 0 = 26,54\% \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Dano por erosão} = ES + ETD &= \frac{13.270}{1.000.000} + \frac{5.487}{27.000.000} = 0,0133 + 0,0002 \\ &= 1,35\% \end{aligned} \quad (8)$$

Após este exemplo de como utilizar o método PCA/84 e em posse da tabela 4.6 é possível proceder com a escolha da espessura que melhor se enquadra aos critérios técnicos. Se a porcentagem de resistência à fadiga consumida ou a porcentagem de dano por erosão ficarem próximas a zero, as condições estão satisfeitas, mas a placa estará superdimensionada, devendo-se, portanto, diminuir a espessura do pavimento até se obter porcentagens o mais perto possível de 100% (DNIT, 2005). Pelo resultado da tabela 4.6 se nota que a espessura de 14 cm é a que melhor atende aos requisitos, visto que para espessura menores o limite do consumo de fadiga é ultrapassado. A figura 4.5 ilustra a estrutura final do pavimento, já com as espessuras das camadas.

Figura 4.5 – Estrutura final do pavimento rígido



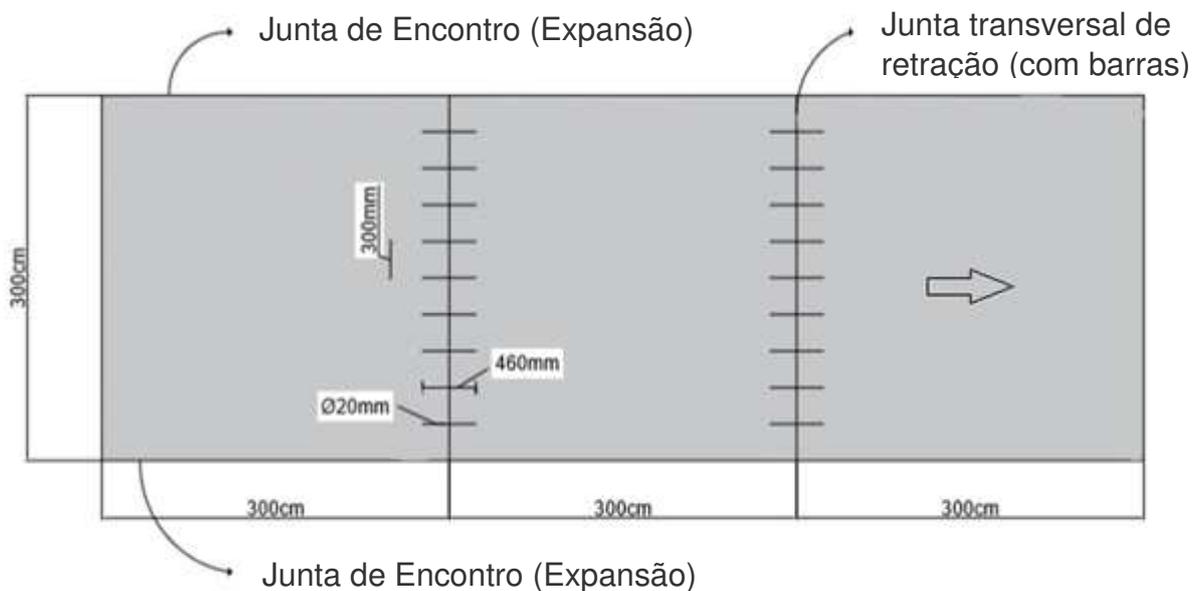
Fonte: Autor

4.3. PROJETO DE JUNTAS

Como descrito anteriormente (ver capítulo 2.3.5), as juntas são seções artificialmente enfraquecidas, espaçadas ao longo das bordas como dispositivo de controle de fissuras, forçando a ocorrência de fissuras em locais pré-determinados que permitem a expansão e contração das placas de concreto. As juntas são o elo mais frágil do sistema, logo se torna muito importante a realização de um estudo apurado do seu dimensionamento, afim de se garantir a segurança da estrutura.

Para o projeto das juntas do pavimento de concreto deste estudo é necessário a determinação das dimensões das placas de concreto. De acordo com informações obtidas das empresas que controlam o transporte coletivo de ônibus em Joinville, a distância entre eixos dos veículos utilizados no binário das ruas Dr. João Colin e Blumenau em geral estão entre 5,5 a 7,5 metros, complementarmente, a largura da pista do corredor é de 3 metros, segundo o projeto da Prefeitura do município. Com base nessas informações, optou-se pela utilização de placas com 3 metros de largura e comprimento, sendo de 0,14 metro a espessura (conforme determinado na tabela 4.6). O comprimento foi adotado de tal forma que em nenhuma hipótese a mesma placa de concreto esteja servindo como apoio a mais de um eixo do ônibus. A figura 4.6 ilustra as dimensões adotadas e o arranjo das juntas no pavimento de concreto.

Figura 4.6 – Esquemas das placas de concreto



Fonte: Autor

Nota-se pela figura 4.6 que não são utilizadas as juntas longitudinais no pavimento, visto que existe uma única faixa de rolamento, e o valor de 3 metros da largura da pista não permite utilizar as equações que consideram a carga de projeto nas bordas da junta transversal, sem que seja verificada a influência da diminuição desta largura nas tensões de tração na flexão (DNIT, 2005).

As juntas transversais de retração, adotadas na estrutura, controlam a fissuração do concreto, transferindo carga de uma placa à outra por meio de barras lisas de transferência de carga de aço CA-25. A utilização da barra lisa ao invés da corrugada melhora a transferência de carga, evitando a concentração do carregamento e a aderência, que pode gerar trincas. Outro ponto importante acerca das barras de transferência é o fato delas serem em parte (metade mais 2cm) pintadas e engraxadas, de forma a diminuir o atrito e garantir a movimentação da placa. A tabela abaixo indica as dimensões adotadas para a barra lisa de aço CA-25.

Tabela 4.7 – Especificações para barra lisa de transferência (Aço CA-25)

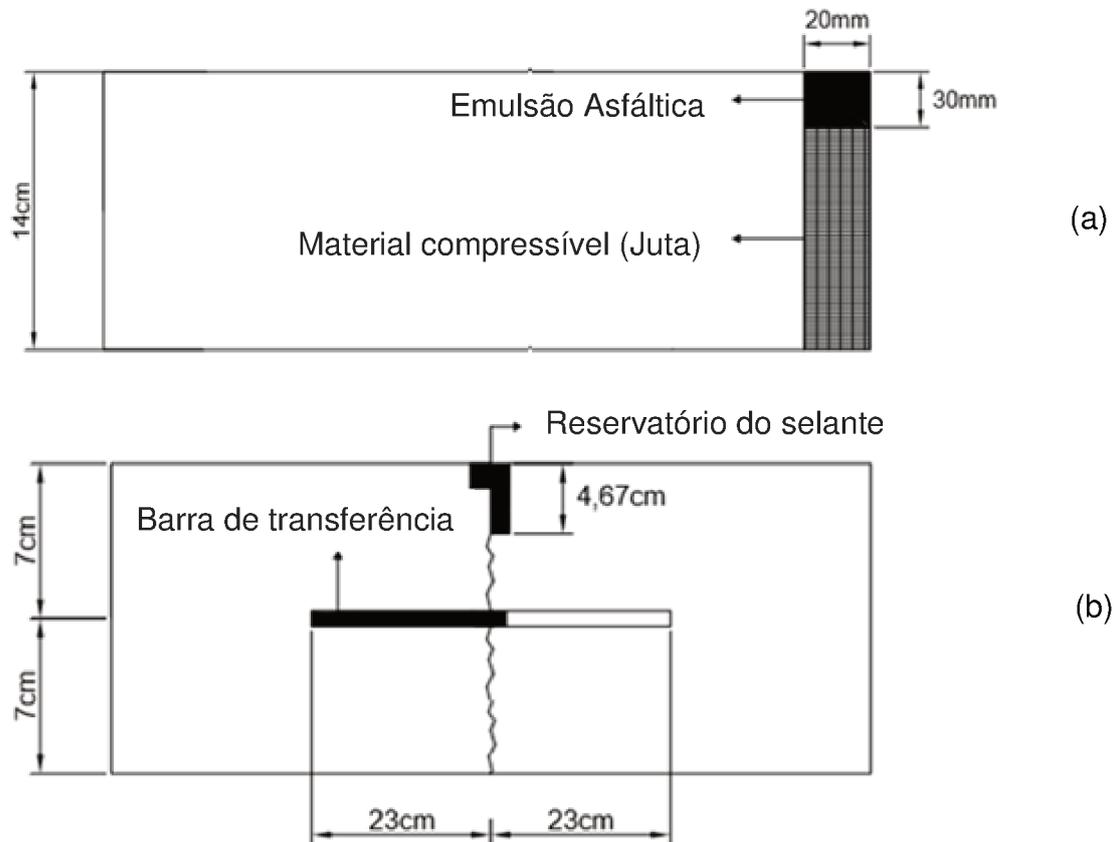
Espessura da Placa (cm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Espaçamento (mm)
Até 17,0	20	460	300
17,5 – 22,0	25	460	300
22,5 – 30,0	32	460	300
> 30,0	40	460	300

Fonte: DNIT (2005, p. 157)

Por fim, as juntas de encontro (expansão) foram dispostas nas duas bordas do pavimento rígido, já que de um lado tem o encontro com o canteiro, que separa o corredor de ônibus das vias de tráfego comum, e do outro lado tem o encontro direto entre a placa de concreto com o meio-fio, conforme se observa na figura 4.2. Nas juntas de encontro serão utilizadas selagem a quente como emulsão asfáltica e corda de juta como material compressível, por ser leve, barata e bastante resistente. As juntas de encontro não possuem barras de transferência de carga, pois as mesmas poderiam forçar a ocorrência de trincas, impedindo sua movimentação, principalmente por causa da retração volumétrica do concreto a noite.

A representação do projeto das juntas, que seguiu todas as especificações do DNIT (2005), é ilustrada na figura 4.7.

Figura 4.7 – Juntas de encontro (a) e transversal de retração com barras de transferência (b)



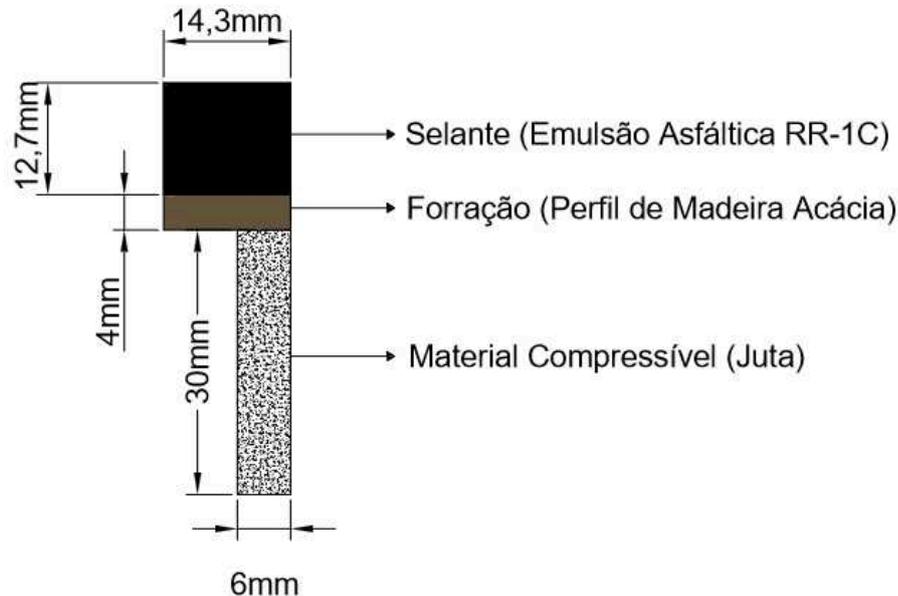
Fonte: Autor

4.3.1. Selagem das Juntas

A função básica da selagem nas juntas do pavimento de concreto é impedir a intrusão de água e materiais sólidos incompressíveis (areia, pedregulhos e outros corpos estranhos), que trazem várias consequências danosas à durabilidade do pavimento, como o bombeamento de finos, perda do suporte, desnivelamento entre a pista e o acostamento e um aumento das tensões de compressão (DNIT, 2005). Pelas consequências prejudiciais à durabilidade da via, que acarretam em despesas com reparo e manutenção, o dimensionamento do reservatório do selante e a escolha dos materiais devem receber atenção especial nos projetos de pavimentos rodoviários.

A figura 4.8 apresenta a forma do reservatório das juntas transversais de retração, onde as dimensões das aberturas, largura do selante e profundidades dos materiais são tabeladas pelo DNIT de acordo com o espaçamento entre as juntas, sendo a altura do reservatório igual a um terço da espessura da placa de concreto.

Figura 4.8 – Forma do reservatório do selante



Fonte: Autor

Um material selante adequado deve possuir propriedades bem definidas, bem como fluidez, viscosidade, adesividade, dureza, elasticidade, compressibilidade e resistência (DNIT, 2005). Portanto, como selante da junta deste estudo foi utilizado a emulsão asfáltica à quente de ruptura rápida RR-1C, vazado diretamente no local, com o objetivo de dar um comportamento viscoelástico a estrutura e garantir espaço para movimentação da placa de concreto. Conforme a norma 046 do DNIT (2004), Para o caso de ser utilizado um retardador de pega no concreto, o selante deve ter uma viscosidade maior, como o RR-2C, pois demoraria mais tempo para ocorrer a ruptura. A espessura adotada para a camada de selante foi a mínima, que segundo as recomendações do DNIT (2005) é de 12,7mm.

Um perfil com madeira de acácia foi escolhido para a forração do reservatório, impedindo que ocorra o vazamento do selante para as outras camadas. A acácia foi escolhida por se tratar de uma madeira extremamente durável, resistente, fácil de trabalhar, bastante flexível e que não transmite calor. Observa-se que a espessura do perfil de 4mm fica acima da recomendação do DNIT (entre 2 a 3mm), sendo o uso de 4mm justificado para garantir espaço suficiente para colocação do perfil de acácia e o confinamento do selante. Por fim, como material compressível foi utilizada a corda de juta (utilizada principalmente na fabricação de sacos para transportes de grãos, como o café), que se trata de uma fibra têxtil vegetal, leve, resistente e muito higroscópica.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo aplicado do dimensionamento do pavimento rígido dos corredores de ônibus dos binários das ruas Dr. João Colin e Blumenau, na cidade de Joinville-SC, atingiu todos os objetivos propostos. Durante o estudo ficou clara a importância de um dimensionamento correto do pavimento das vias exclusivas ao transporte coletivo, visto que as condições atuais de rolamento das vias objeto do estudo, conforme apresentado no trabalho, estão longe do estado satisfatório, expondo várias trincas, deformidades, trilhas de roda etc., que além de diminuir a qualidade do sistema do transporte colocam em risco a segurança do usuário.

Com intuito de sanar os problemas indicados pela condição atual do pavimento do binário, foi realizada uma investigação geotécnica no solo do subleito da via, assim como se determinou a estratigrafia do mesmo, visando se aferir as características e propriedades do material. A escolha dos outros materiais constituintes da solução do pavimento, que afetam diretamente a qualidade da estrutura projetada, deu-se a partir das opções viáveis de jazidas presentes na região de Joinville. A escolha se deu por ordem técnica, onde os ensaios laboratoriais para caracterização dos solos aprovaram ou descartaram o uso dos mesmos no projeto.

Os materiais utilizados na estrutura do pavimento se mostraram aptos, de forma a garantir que a mesma receba os esforços provenientes do tráfego e distribua de forma adequada pela estrutura. O subleito apresentou bons resultados perante os ensaios de CBR (8,77) e expansibilidade (0,096%), mesmo para energia normal de compactação, garantindo uma elevada resistência no solo não expansivo. Já o reforço do subleito, primeiramente de solo argiloso, foi adotado devido ao tráfego pesado e principalmente a falta de dados do solo da via, uma vez que apenas uma amostra de material do subleito foi retirada para toda a caracterização do binário.

Os resultados dos ensaios em laboratório para caracterização do solo argiloso na camada de reforço mostraram um material muito expansivo, sendo necessária a adição de areia descartada de fundição (ADF) na mistura (em porcentagem de 50%), que diminuiu a expansão e manteve a mistura dentro dos limites aceitáveis de resistência (CBR) para essa camada. A sub-base de saibro arenoso, de granulometria

aberta, que permite o rápido escoamento das águas, também atendeu aos requisitos de resistência, expansão e deformabilidade, garantindo a uniformidade e a boa ligação entre a placa de concreto e o subleito. Por último, o traço do concreto com adição de fibras de Polipropileno culminou num material com maior comportamento elástico, distribuindo melhor os carregamentos impostos a estrutura. O principal dado do concreto de cimento Portland, referente à sua resistência de tração na flexão, ficou entre 4,5 e 5 MPa, um valor considerado ideal segundo as principais metodologias de pavimento rígido adotadas no Brasil (DNIT, PCA e ABCP).

A respeito do estudo identificou-se um grande empirismo na concepção da metodologia utilizada no trabalho (PCA, 1984), que foi desenvolvida com base em parâmetros limitados, onde os ensaios laboratoriais não reproduzem as reais solicitações as quais o pavimento é submetido em campo. Como principal exemplo pode-se citar o índice de suporte Califórnia (CBR), que é um ensaio estático, que não representa a situação prática, na qual os veículos trafegam na via exercendo um carregamento dinâmico na mesma. Esse erro de concepção na metodologia acarreta em um processo de dimensionamento falho.

Outro ponto negativo foi referente ao poder público, visto que para a execução deste trabalho foi necessária uma parceria com o IPPUJ (Instituto de pesquisa e planejamento para o desenvolvimento sustentável de Joinville), no sentido de fornecimento de dados e informações, já que o órgão da prefeitura também tem um projeto para o novo pavimento rígido dos corredores de ônibus do binário das ruas Dr. João Colin e Blumenau.

De acordo com o projeto do IPPUJ, observou-se uma preocupante falta de dados e parâmetros fundamentais para o dimensionamento correto da estrutura. Não foram realizados, por exemplo, nenhum estudo nas vias do binário para a determinação do CBR do subleito, mesmo sendo este um dado crucial para o dimensionamento do pavimento, independente da metodologia utilizada. Também não foi possível obter dados referentes ao estudo do tráfego exclusivo nos corredores de ônibus das duas ruas, culminando em uma dificuldade adicional para a execução deste trabalho, sendo necessárias a adoção de medidas para avaliar a utilização ou não de certos resultados obtidos pelo órgão da Prefeitura de Joinville (ver capítulo 4.1).

Apesar das dificuldades encontradas na obtenção de parâmetros e critérios racionais de concepção do pavimento, bem como a limitação de materiais disponíveis nas jazidas, pôde-se dimensionar uma estrutura apta a receber as cargas solicitantes, de acordo com a metodologia utilizada.

Logo, conclui-se que a solução adotada para a estrutura do pavimento rígido neste trabalho atende as prerrogativas técnicas do método utilizado, o PCA de 1984, e também as normas do DNIT (2005) adotadas no Brasil, principalmente nos quesitos de expansão e resistência aos esforços mecânicos, constituindo uma solução que se apresenta como a mais viável para o pavimento das vias exclusivas de transporte coletivo, sujeitas a um tráfego pesado de veículos.

Como recomendações para trabalhos futuros, têm-se as seguintes preposições:

- Estudo e fomentação de outras metodologias para o dimensionamento de pavimentos rígidos, principalmente as que apresentem cunho racional ao invés do cunho empírico, aplicando adequadamente os princípios físicos e mecânicos que determinam o desempenho deste tipo de pavimento. Neste contexto se destaca a metodologia francesa, citada no trabalho, baseada em equações analíticas que simulam as situações reais de campo;
- Estudo aplicado para a criação de um ensaio simples e barato que possa vir a substituir o índice de suporte Califórnia (CBR) na verificação da resistência do corpo de prova, sendo este método baseado num carregamento dinâmico, que represente melhor os esforços aos quais o pavimento é submetido no campo;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. **Design of pavement structures**. Washington: AASHTO, 1993.
- ABNT NBR 12307 (1991), **Regularização do subleito - Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 7583 (1986), **Execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 7181 (1984), **Solo – Análise Granulométrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 6508 (1984), **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ANTT (2014), Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Relatório Anual das Rodovias**. www.antt.gov.br. Último Acesso em agosto de 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. **O pavimento de concreto nas cidades – As vias do futuro**. 40ª RAPv, Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE URBANO. **Faixas exclusivas de ônibus urbanos – Experiência de sucesso**. Brasília: NTU, 2013.
- AUTOPISTA LITORAL SUL. **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. Relatório Final, 2014.
- BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: oficina de textos, 2009.
- BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- BARRA, B. S.; LIMA Jr. U. M. **Reabilitação de pavimentos flexíveis, utilizando a técnica over-lay ultra-thin Whitetopping pavement – Pista experimental: Campus da UNAMA**. Universidade da Amazônia, Belém, 2001.
- BARRA, B. S.; HORNYCH, P.; BROSSEAUD, Y.; MOMM, L. **Metodologia Francesa para o dimensionamento de estruturas de pavimentos de concreto asfáltico**. Revista Pavimentação, v.18, p. 10-26, 2010.
- BAUER, L. A. **Materiais de construção**. São Paulo, 1995.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação base para engenheiro**. Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.

BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito. Portaria n° 63 de 2009. **Homologação dos veículos e das combinações de veículos de transporte de carga e passageiros, com seus respectivos limites de comprimento, peso bruto total – PBT e peso bruto total combinado – PBTC.** Brasília, DF. 2009.

CALDA, A. G. B. **Juntas em pavimentos de concreto.** Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2007.

CANADIAN CEMENT ASSOCIATION. **The benefits of concrete roads.** Ottawa, Canadá, 2000.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias.** Brasília: Confederação Nacional de Transporte, 2013.

DNIT. **Manual de pavimentação.** 3^o Edição. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. **Manual de pavimentos rígidos.** 2^o Edição. Rio de Janeiro, 2005.

DNIT-ES 141. **Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010.

DNER-ME 082/1994. **Solos – Determinação do limite de Plasticidade.** Departamento Nacional de Estrada e Rodagem, Rio de Janeiro (RJ).

DNER-ME 122/1994. **Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito.** Departamento Nacional de Estrada e Rodagem, Rio de Janeiro (RJ).

DNER-ME 162/1994. **Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.** Departamento Nacional de Estrada e Rodagem, Rio de Janeiro (RJ).

DNIT-EM 046/2004. **Pavimento rígido – Selante de juntas – Especificação de material.** Departamento Nacional de Estrada e Rodagem, Rio de Janeiro (RJ).

FORTES, R. M. **Estudo da aderência entre o concreto de cimento Portland e concretos asfálticos para fins de reforço ultradelgados de pavimentos.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

Fundação IPPUJ: **Joinville Cidade em Dados 2015.** Prefeitura Municipal de Joinville. Joinville. 2015. 180 pág.

Fundação IPPUJ: **Joinville Cidade em Dados 2014.** Prefeitura Municipal de Joinville. Joinville. 2015. 148 pág.

IPPUJ. **Mobilidade e acessibilidade em Joinville.** Joinville: Prefeitura de Joinville, 2014.

JORNAL ANOTÍCIA. **Integração entre modais de transporte é o caminho para a mobilidade de Joinville.** Publicado em 10/12/2013. www.anoticia.clicrbs.com.br. Último acesso em agosto 2015.

LIMA, D. A. S. **Pavimentos flexíveis para tráfego leve**. Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003.

LINDAU, L. A.; *et al.* **BRT e corredores prioritários para ônibus: panorama no continente americano**. Belém: Associação de Pesquisa de Ensino em Transportes (ANPET), 2013.

MESQUITA, J. C. **Pavimento rígido como alternativa econômica para pavimentação rodoviária – Estudo de caso: Rodovia BR-262, Miranda – Morro do Azeite–MS**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MACHADO, R. **Estudo aplicado da solução de projeto de pavimentação para pátio de estacionamento de ônibus**. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

NETO, G. L. G. **Estudo comparativo entre a pavimentação flexível e rígida**. Universidade da Amazônia. Belém, 2011.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto**. Tese (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PINTO, C. S. **“Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas”**. 3ª Edição. São Paulo, Editora Oficina dos textos, 2006.

PITTA, M. R. **Construção de pavimentos de concreto simples**. São Paulo, ABCP, 1989.

PITTA, M. R. **Whitetopping – A evolução de um conceito**. Congresso Brasileiro de Cimento, São Paulo, 1996.

PITTA, M. R. **Estudo Técnico ET-97: Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método PCA/1984**. Associação Brasileira de Concreto Portland. São Paulo, 1998.

RODRIGUES, L. F. **Juntas em pavimentos de concreto: dispositivo de transferência de carga**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RODRIGUES FILHO, S. **Estudo econômico comparativo entre tipos de pavimentos**. Tese (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2006.

SANTANA, H. **Manual de Pré-misturados a frio**. Rio de Janeiro: IBP, 1993.

SANTOS, C. R. G. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SIAN, S. V. **Recuperação de pavimento asfáltico com aplicação de whitetopping**. Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2007.

WRIGHT, L.; HOOK, W. **Manual de BRT**. Brasília: Ministérios das Cidades, 2008.

ANEXO A – TABELAS

**Tabela A.1 – Tensão Equivalente para eixos simples e tandem duplo (MPa)
PSAC (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 JSP e PSAC
(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)