

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
NÍVEL MESTRADO**

CINARA SOUZA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE OS PAVIMENTOS DE
CONCRETO ASFÁLTICO E BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO**

SÃO LEOPOLDO

2018

Cinara Souza de Oliveira

**ANÁLISE COMPARATIVA TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE OS PAVIMENTOS DE
CONCRETO ASFÁLTICO E BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo, ao Programa de Pós-
Graduação em Arquitetura e Urbanismo da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Coorientador: Prof. Me. Roberto Christ

São Leopoldo

2018

O48a Oliveira, Cíara Souza de
Análise comparativa técnico-econômica entre os pavimentos de concreto asfáltico e blocos intertravados de concreto / por Cíara Souza de Oliveira. – 2018.

107 f. : il., 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian ;
Coorientação: Prof. Me. Roberto Christ.

1. Blocos intertravados. 2. Concreto asfáltico. 3. Método.
4. Pavimento. 5. Tráfego. I. Título.

CDU 666.9

Catálogo na Fonte:
Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas aos meus avós maternos e à minha mãe, “In Memoriam”, pois sem eles muitos dos meus sonhos não se realizariam.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por permitir que tudo isso acontecesse ao longo da minha vida e que, não somente nos anos de discente, mas em todos os momentos, é o maior mestre que alguém pode conhecer.

À minha mãe Bromilda (*in memoriam*), heroína que, apesar das suas enfermidades ainda me deu apoio, incentivo nos momentos difíceis de desânimo e cansaço. Obrigada por tudo! Saudades eternas!

Ao meu marido Antônio, pelo amor, pelo incentivo e pelo apoio incondicional.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, pelo suporte no pouco tempo em que lhe coube, por suas correções e incentivos.

Ao Prof. Me. Roberto Chirst, pelo paciente trabalho de revisão da redação, pelo incentivo e foco nos resultados.

A todos os professores por proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação de caráter e afetividade, da educação no processo de formação profissional. A palavra mestre nunca fará justiça aos professores dedicados, que sem nominá-los terão meus eternos agradecimentos.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

“A sabedoria é um adorno na prosperidade e um refúgio na adversidade”.
Aristóteles

RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo comparar economicamente o pavimento de concreto asfáltico e de blocos intertravados de concreto na pavimentação urbana da Avenida Severo Dullius, considerando os custos das soluções propostas pelos métodos. A avenida em estudo é uma das principais vias radiais que compõe o anel viário que dá acesso ao Aeroporto Internacional Salgado Filho, é tida como essencial dentro do plano de mobilidade urbana do município de Porto Alegre/RS, localizada em zona urbana alagadiça, com subleito constituído de solos de baixo poder de suporte e tráfego comercial pesado. O dimensionamento foi realizado para um trecho 2,3 Km e, contou com estudos geotécnicos, com intuito de caracterizar física e mecanicamente o solo do subleito, considerou-se a contagem e classificação do tráfego atuante na via. Em seguida, foi analisado o comportamento estrutural desses pavimentos urbanos na referida situação e apresentados os métodos construtivos adequados e recomendados. Aplicou-se para o pavimento em concreto asfáltico o método de dimensionamento de pavimento flexíveis – DNER atual DNIT, e para o bloco intertravado de concreto empregou-se o método da ABCP (1998). Para permitir a comparação técnica e financeira entre os pavimentos, foram consideradas suas características estruturais e os respectivos períodos de projetos. Contabilizaram-se os custos da implantação e da conservação. Com os orçamentos disponíveis, efetuou-se uma comparação de serviços com o objetivo de identificar sua viabilidade econômica, propondo o assim o pavimento adequado para a via selecionada. Concluiu-se que para este estudo a utilização do bloco intertravado de concreto como solução final em função do custo comparado, apresentou-se uma economia de 16,93% no custo final da implantação, portanto economicamente mais vantajosa em relação ao concreto asfáltico. Diante disto, concluiu-se também, que uma análise econômica de um pavimento rodoviário, deve-se sempre abordar todos os custos e benefícios pertinentes, considerando todas as fases de sua implantação.

Palavras-chave: Blocos Intertravados. Concreto Asfáltico. Método. Pavimento. Tráfego.

ABSTRACT

This dissertation aims to compare economically the asphalt concrete and interlocking concrete blocks in the urban paving of Severo Dullius Avenue, considering the costs of the solutions proposed by the methods. The avenue under study is one of the main radial roads that makes up the ring road that accesses the Salgado Filho International Airport, and it is considered imperative to the urban mobility plan of the city of Porto Alegre / RS, located in an urban swamp area, with subsoil consisting of low support power soils and heavy commercial traffic. The sizing was carried out for a 2.3 km stretch, and it was based on geotechnical studies in order to physically and mechanically characterize the subsoil soil, considering the counting and classification of the traffic acting on the road. Next, the structural behavior of these urban pavements in the mentioned situation was analyzed and the suitable and recommended construction methods were presented. The method of sizing of flexible pavement – DNER current DNIT was applied to the asphaltic pavement, and the ABCP (1998) method was used for the interlocked block of concrete. In order to allow the technical and financial comparison between the floors, their structural characteristics and the respective project periods were considered. The costs of implementation and conservation were taken into account. With the budgets available, a comparison of services was carried out in order to identify their economic viability, thus proposing the adequate pavement for the selected route. It was concluded for this study that, as a final solution, the use of the interlocked concrete block compared with the concrete, showed a saving of 16,93% in the final cost of the implantation, thus economically more advantageous in relation to the asphalt concrete. In view of this, it was also concluded that an economic analysis of a road pavement should always address all relevant costs and benefits, considering all phases of its implementation.

Keywords: Interlocking Blocks. Asphalt Concrete. Method. Pavement. Traffic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas que compõe o pavimento.....	21
Figura 2 - Pavimento de concreto asfáltico (corte transversal)	26
Figura 3 - Distribuição do carregamento em pavimentos flexíveis	28
Figura 4 - Tensões no concreto asfáltico	33
Figura 5 - Simbologia utilizada no dimensionamento no pavimento.....	46
Figura 6 - Estrada do Império Romano	47
Figura 7 - Blocos de concreto tipo Top-Cret e Blockret.....	48
Figura 8 - Estrutura do pavimento de bloco intertravado de concreto	50
Figura 9 - Bloco de concreto tipo UNI-STEIN.....	51
Figura 10 - Formatos de blocos intertravados de concreto	52
Figura 11 - Formas de assentamento de blocos de concreto.....	53
Figura 12 - Movimento dos deslocamentos dos blocos.....	57
Figura 13 - Tipos de travamento dos blocos de concreto.....	58
Figura 14 - Fluxograma	64
Figura 15 - Imagem da Av. Severo Dullius.....	66
Figura 16 - Terminologia dos veículos	68
Figura 17 - Av. Severo Dullius, tráfego comercial atuante	74
Figura 18 - Estrutura do pavimento em concreto asfáltico da Av. Severo Dullius	83
Figura 19 - Estrutura do pavimento de blocos intertravados da Av. Severo Dullius ..	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores IS em função IG	38
Tabela 2 - Determinação do fator de operações	41
Tabela 3 - Fator Climático Regional	43
Tabela 4 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais	43
Tabela 5 - Espessuras mínimas dos revestimentos asfálticos em função <i>N</i>	44
Tabela 6 - Média do tráfego total de veículos passantes em uma semana na Av. Severo Dullius	69
Tabela 7 - Percentual dos veículos passantes (tráfego total) da Av. Severo Dullius.	70
Tabela 8 - Redistribuição do tráfego comercial em percentual da Av. Severo Dullius	70
Tabela 9 - Cálculo dos fatores de carga.....	72
Tabela 10 - Amostra dos CBR do subleito	76
Tabela 11 - Espessuras mínimas dos revestimentos asfálticos em função do <i>N</i>	79
Tabela 12 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais	81
Tabela 13 - Espessura e resistência dos blocos de revestimento	86
Tabela 14 - Custo total concreto asfáltico (construção e conservação) por m ²	87
Tabela 15 - Custo total do revestimento em bloco intertravado por m ²	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Efeito da temperatura no módulo resiliente de misturas asfálticas	32
Gráfico 2 - Fatores de equivalência de operações	41
Gráfico 3 - Espessura total do pavimento em função de N e de ISC ou CBR.....	45
Gráfico 4 - Efeito relativo e diversas cargas por eixo simples	61
Gráfico 6 - Espessura necessária de base em função do eixo padrão N	62
Gráfico 7 - Fator de equivalência de carga: ESRS, ESRD, ETD e ETT	73
Gráfico 8 - Determinação das espessuras H_{20} e H_n	80
Gráfico 9 - Espessura da camada sub-base	84
Gráfico 10 - Espessura da camada de base	85
Gráfico 11 - Comparativo de custos entre os pavimentos	89

LISTA DE SIGLAS

A.C.	Antes de Cristo
AASHO	American Association of State Highway Officials
ABCP	Associação Brasileira de cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
Av	Avenida
BR	Rodovia Federal
CBR	Califórnia Bering Rátio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DAER	Departamento Autônomo de Estrada e Rodagens
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
ESDR	Eixo simples Roda Dupla
ET	Especificação Técnica
ETD	Eixo Tandem Duplos
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
ICPC	Instituto Colombiano de Productores de Cemento
ISC	Índice de Suporte Califórnia
Km	Quilômetro
lb	Libra
m	Metro
m ²	Metro quadrado
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MR	Modulo Resiliente
N	Número Equivalente de Operações do Eixo Padrão
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
P	Período do Projeto
PCA	Portland Cement Association

PMPA	Prefeitura Municipal de Porto Alegre
t	Taxa
T	Temperatura
tf	Tonelada Força

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2 Objetivo geral	16
1.2.1 Objetivos específicos.....	17
1.3 Justificativa	17
2 PAVIMENTAÇÃO DE VIAS	19
2.1 Pavimento urbano	20
2.1.1 Tipos de pavimentos	22
2.2 Características dos pavimentos urbanos	23
2.3 Concreto asfáltico	25
2.3.1 Origem.....	25
2.3.2 Revestimento de concreto asfáltico.....	26
2.3.3 Desempenho estrutural do concreto asfáltico em vias urbanas	29
2.4 Dimensionamento dos pavimentos flexíveis	34
2.4.1 Método do extinto Departamento Nacional de Estradas e Rodagens - DNER.....	35
2.5 Blocos intertravados de concreto	47
2.5.1 Origem.....	47
2.5.2 Revestimento com blocos intertravados.....	49
2.5.3 Desempenho estrutural do pavimento de blocos intertravados de concreto	54
2.6 Dimensionamento do pavimento intertravado	59
2.6.1 Método ABCP (1999) – Estudo Técnico nº 27 – Associação Brasileira de Cimento Portland.....	59
3 MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 Método do trabalho	64
3.2 Local de estudo	65
3.3 Estudo de tráfego	67
3.3.1 Numero de <i>N</i>	69
3.4 Capacidade de suporte do subleito (ensaio de ISC)	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1 Dimensionamentos dos pavimentos	79
4.1.1 Cálculo da estrutura do pavimento concreto asfáltico	79
4.1.2 Cálculo da estrutura do pavimento em bloco intertravado de concreto	83
4.2 Análise dos custos	86

4.2.1 Cálculo do pavimento em concreto asfáltico	86
4.2.2 Cálculo do pavimento em bloco intertravado de concreto	88
4.2.3 Diferença de custo unitário para uma vida útil de 10 anos	88
4.3 Características geológicas e os sistemas propostos	89
4.3.1 Reforço do subleito	90
5 CONCLUSÕES	92
5.1 Sugestões para futuro trabalhos	94
REFERÊNCIAS.....	95
ANEXOS	104
ANEXO A - CONTAGEM DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS DA.....	104
AV. SEVERO DULLIUS.....	104
ANEXO B - MAPA PEDOLÓGICO DE PORTO ALEGRE.....	105
ANEXO C - FICHA DE SONDAGENS FL. 1.....	106
ANEXO D - FICHA DE SONDAGENS FL. 2.....	107
ANEXO E - FICHA DE SONDAGENS FL. 3.....	108

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário no Brasil é a principal alternativa para movimentação de cargas e pessoas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento socioeconômico nacional.

Segundo a Confederação Nacional de Transportes CNT (2017), a densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil é, aproximadamente, 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km² de área, o que corresponde a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional, são 21.463 Km de vias pavimentadas e 1.351.975 Km não pavimentadas, ou seja 78,6% da extensão rodoviária.

A expansão da malha rodoviária pavimentada também não acompanha o ritmo de crescimento da frota de veículos. Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (Abeda), mais de 90% das estradas pavimentadas nacionais são de revestimento asfáltico (NAKAMURA, 2011).

A qualidade do pavimento das rodovias tem impacto direto no desempenho do transporte rodoviário e na economia do Brasil. Uma rodovia com más condições de pavimento aumenta o custo operacional do transporte, reduz o conforto e a segurança dos passageiros e das cargas, além de causar prejuízos ambientais (CNT, 2017).

A grande variedade de materiais utilizados na construção civil é oriunda de fontes renováveis e de fontes não renováveis. Somente os materiais provenientes de fontes renováveis são considerados sustentáveis em termos construtivos, para a atual e para a futura geração. O conceito de sustentabilidade, de reciclagem e de ciclo de vida dos materiais é de extrema importância para minimizar os problemas ambientais.

O concreto asfáltico, empregado largamente nos pavimentos urbanos, utiliza como material aglutinante o cimento asfáltico proveniente do petróleo, uma fonte de recurso natural não renovável e limitada (SANTANA, 1993).

Sendo o concreto asfáltico um material impermeável, impossibilita a drenagem natural das águas das chuvas, aumentando o volume superficial de águas acumuladas nas zonas baixas, provocando constantes alagamentos, intensamente agravado por problemas de gerenciamento no esgotamento das águas pluviais, seja pelo processo forçado (bombas), ou pela má conservação do sistema de drenagem (poços de visitas, bocas de lobo e tubulação). Nessas condições, esse revestimento

tem pouca durabilidade, porque a presença de umidade provoca a desagregação do revestimento (IBP, 1999).

Os pavimentos permeáveis como os constituídos por blocos de concreto, é uma técnica compensatória para a solução de drenagem urbana. A utilização desse tipo de solução em ambientes que acumulam grandes quantidade de água acaba sendo uma solução barata e eficiente, sendo empregada na Europa desde da década de 1980 (PINTO, 2011).

A utilização dos pavimentos permeáveis nas vias de cidades, ou em pontos estratégicos em uma área urbana apresenta grandes benefícios, tais como o aumento de água subterrânea, a diminuição da água superficial nas cidades entre outras (KAYHANIAN et al., 2012).

Porém alguns cuidados são de extrema importância quando se trata de pavimentos permeáveis. O correto funcionamento do sistema depende da permeabilidade do solo e, caso o solo não apresente boa permeabilidade, intervenções maiores devem ser previstas em projeto, o que pode, em alguns casos, inviabilizar a implantação do sistema (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Este trabalho tem como objetivo fazer uma comparação entre o custo final dos dois tipos de revestimentos de pavimentos, abrangendo a execução, a conservação e a manutenção das camadas de revestimentos.

A pavimentação com blocos intertravados de concreto, para efeito deste trabalho, foi analisada como uma solução alternativa entre os pavimentos flexíveis asfálticos, quando a aplicação desses se tornar inviável, seja por motivos técnicos, seja por motivos econômicos.

1.2 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é realizar uma comparação técnica e econômica entre os pavimentos de concreto asfáltico e o bloco intertravado de concreto.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Comparar os resultados dos cálculos da estrutura de cada pavimento;
- Comparar os custos final da execução do revestimento de concreto asfáltico e do bloco intertravado de concreto para o trecho analisado;
- A partir das características geológicas do local estudado, analisar os benefícios de cada sistema proposto.

1.3 Justificativa

A via em estudo, Avenida Severo Dullius, é a rua de acesso ao Aeroporto Internacional Salgado Filho, e é considerada uma das principais vias de acesso ao município Porto Alegre, no que diz respeito ao escoamento do tráfego em direção Zona Norte da capital, pois liga-se a Av. dos Estados, complemento da BR-116. Sua execução tem importância fundamental em relação à ampliação do Aeroporto, que não se restringe somente à ampliação e alargamento de sua pista de aterrissagem, já que a Infraero apresentou o plano de expansão (Plano Diretor do Aeroporto), que contempla novos terminais de carga e de passageiros, implantação de complexo de hotéis, entre outras melhorias.

Desse modo, o tráfego ao longo da via é intenso, e, além disso, considerado pesado. Portanto, as execuções de melhorias que darão as condições de operacionalidade e trafegabilidade da via são de suma importância para o município de Porto Alegre.

O pavimento é uma estrutura sujeita a tensões e deformações, que derivam do tráfego e do clima e devem ser compatibilizadas com a resistência de cada material empregado em cada uma das camadas. Com a evolução e o aumento do número de veículos, tornou-se necessário melhorar também a técnica da pavimentação. Agregaram-se às funções iniciais de conforto e segurança, as funções estruturais, ou seja, as funções de resistir às cargas por tempos cada vez maiores, condicionados aos materiais disponíveis.

Foi avaliada a aplicação do pavimento de concreto asfáltico nessas circunstâncias, seu comportamento em presença de umidade excessiva, com altas

temperaturas no verão, na existência de recalques do subleito, em presença de tráfego pesado.

O emprego de blocos intertravados de concreto para pavimentação de vias urbanas, também foi avaliado, como solução alternativa ao concreto asfáltico. Destacando-se também a segurança devido à coloração clara da superfície com maior visibilidade à noite proporcionando economia de energia elétrica e segurança aos usuários. Foi avaliada a relação custo-benefício em médio e longo prazo, considerando-se a durabilidade e a vida útil dos dois pavimentos.

A utilização de soluções que necessitem de um investimento mais econômico, e que garantam a durabilidade prevista para a estrutura são indispensáveis, pois interferem diretamente no orçamento e nos investimentos em obras de pavimentação nos municípios. Diante do exposto, as vantagens e desvantagens dos sistemas de pavimentação urbana também devem ser divulgadas, contribuindo, assim, para tomadas de decisão do poder público.

2 PAVIMENTAÇÃO DE VIAS

Desde a antiguidade se sabia que as vias implantadas no terreno natural necessitam ser calçadas, a fim de oferecerem boas condições de tráfego em qualquer época do ano às viaturas e aos pedestres. Apareceram, assim, os primeiros pavimentos em forma de calçamentos, blocos de pedra de grandes dimensões sobre o terreno natural regularizado.

Há mais de 2.000 anos a.C., os egípcios já construíam primorosas vias calçadas como a Estrada de Elefantina localizada na Ilha do rio Nilo perto de Assuão, mas foram os romanos que se celebrizaram por terem sido os primeiros a aplicar os princípios da Mecânica dos Solos à construção de estradas, com pavimentação em camadas com revestimento de blocos de pedra (KNAPTON, 1996).

Das vias romanas, a mais conhecida de todas, a Via Ápia, foi a primeira a ser nomeada em homenagem ao seu construtor, Appius Claudius, que a criou em 312 a.C., durante a segunda Guerra Samnita, cujo objetivo era ligar Roma a Cápuia (195km) (BERNUCCI et al., 2007).

No início, o termo calçada significava uma via calçada de pedra tendo como sinônima via romana. No Brasil de 1989, era definida como “rua, caminho calçado de pedra, sendo o calceteiro aquele que calça as ruas”. Atualmente, o termo calçada é aplicado para as vias de pedestres e calçamento aplicado às vias de veículos (SANTANA, 1993).

Historicamente, o objetivo maior da pavimentação de ruas era melhorar a sua trafegabilidade sob qualquer condição climática, poeiras, etc. Pode-se fazer um paralelo dessa evolução com a situação da pavimentação urbana, no sentido da hierarquização das ruas. Em locais pouco trafegados por veículos pesados, com pouca densidade habitacional, uma pavimentação terá mais o sentido de conforto e proteção às condições climáticas. Nos grandes eixos de tráfego urbanos, a essas funções deve-se, necessariamente, agregar o dimensionamento estrutural.

A importância da pavimentação das vias urbanas para a maioria das pessoas (técnicos, políticos e usuários) é bastante clara, embora por motivações diversas. No entanto, a fase seguinte, que é a manutenção das vias construídas, não é tão evidente para a maioria, pelo menos daqueles que tem o poder decisório nas mãos (SANTANA, 1993).

Conforme Senço (2007), o pavimento é a estrutura construída sobre a terraplenagem e destinada econômica, técnica e simultaneamente a:

- a) resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego.
- b) melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança.
- c) resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

2.1 Pavimento urbano

Segundo DNIT (2006a), o pavimento de uma rodovia é superestrutura constituída por sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semiespaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou o terreno de fundação, a qual designada de subleito.

O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez dessas e do subleito, bem como da interação entre a diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI et al. 2007). De acordo com NBR 7207 (ABNT, 1982) seu dimensionamento propõe oferecer aos usuários boas condições de rolamento, conforto e segurança.

Para Melo (2010), os pavimentos devem possuir as seguintes características:

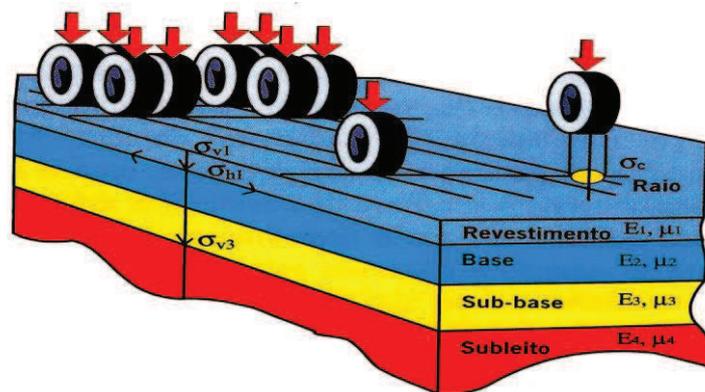
- a) ter resistência para suportar os esforços verticais decorrentes do tráfego de veículos e distribuí-los sobre o terreno em que está construído;
- b) resistir, aos esforços horizontais produzido pelo tráfego;
- c) melhorar as condições de rolamento de forma segura e cômoda;
- d) conservar suas qualidades sob a ação dos agentes intempéricos.

DNIT (2006a, p. 95) ao abordar sobre pavimento faz a seguinte definição,

O pavimento, por injunções de ordem técnico econômicas é uma estrutura de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocadas em contato resultando daí um elevado grau de complexidade no que respeita ao cálculo de tensões e deformações e atuantes nas mesmas resultantes pelas cargas imposta pelo do tráfego.

Os pavimentos são compostos basicamente pelas camadas: subleito, reforço de subleito, se necessário, sub-base, base e revestimento (AUGUSTO JÚNIOR, 1992). Essas camadas são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Camadas que compõe o pavimento



Fonte: Albernaz (1997).

Para Bernucci et al. (2007), os agregados que formam as diversas camadas são escolhidos de acordo com seu custo, qualidade e disponibilidade, bem como do tipo de aplicação.

A seleção dos materiais utilizados nessas camadas depende das propriedades de cada um quando estão compactados, tais como boa resistência à compressão e à tração, baixa deformação permanente e permeabilidade à água, coerente com seu papel estrutural (BERNUCCI et al., 2007).

A camada da superfície externa é denominada camada de rolamento e será aquela que ficará em contato direto com o tráfego (SENÇO, 2007). As camadas inferiores são denominadas base e sub-base, quando houver duas. O solo natural, nesse caso, é denominado de subleito e tem a função de suportar o pavimento.

Segundo Bernucci et al. (2008), os pavimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e de materiais asfálticos, podendo ser de duas maneiras principais, por penetração ou por mistura.

Os pavimentos devem ser projetados especificamente para cada situação. Não existe uma regra que defina qual o tipo ideal de pavimento a ser utilizado em rodovias ou vias urbanas. Deve-se considerar, principalmente, as características geotécnicas e geométricas, com ênfase no sistema de drenagem superficial, especialmente quando se trata de vias urbanas.

Em síntese, todos os pavimentos desde que devidamente dimensionados e bem executados, apresentam ótimo desempenho. A adoção de um tipo de pavimento deve ser analisada sobre os aspectos técnicos, financeiros e de sustentabilidade. Ou seja, há a necessidade de estudos e projetos bem elaborados.

2.1.1 Tipos de pavimentos

Os pavimentos são denominados rígidos ou flexíveis de acordo com o seu comportamento quando submetido às cargas previstas de uso. Sua camada de rolamento pode ser de concreto de cimento Portland, concreto asfáltico, pavimentos de pedra irregular ou paralelepípedo e blocos de concreto (ABCP, 1999).

O pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, portanto absorve todas as tensões decorrentes dos carregamentos aplicados (PINTO; PREUSSLER, 2002).

O pavimento de concreto, também conhecido de pavimento rígido, por absorver grandes tensões de tração na flexão produzidas pelo carregamento, não requer, necessariamente, uma fundação de grande suporte, mas sim, um suporte constante e uniforme. Este tipo de pavimento produz uma bacia de deformação, na fundação, menor que aquela produzida por pavimentos flexíveis. Devido a isto, as camadas subjacentes são mais protegidas quanto às deformações (RODRIGUES, 2003).

Pavimentação flexível é aquela em que todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes nas camadas. Um exemplo típico é o pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica (DNIT, 2006a).

Pavimento semi-rígido é executado com base cimentada e revestimento flexível, esse tipo de pavimento apresenta nível de deformação intermediário, superior ao do flexível e inferior ao do rígido. Esse tipo está presente em vias nas quais trafegam veículos pesados. Sujeito a deformações, seu aproveitamento não é indicado para locais em que existem cargas estáticas, como nos pontos de ônibus.

O pavimento semi-rígido apresenta maior facilidade de manutenção e implantação se comparado ao rígido, por isso é uma opção interessante para obras que visam a menores custos de execução. Assim como o flexível, esse também pode passar pelo processo de reciclagem. O revestimento semi-rígido mais comum é com peças pré-moldadas de concreto (AUGUSTO JÚNIOR, 1992).

O pavimento intertravado é considerado na NBR 15953 (ABNT, 2011) como flexível devido à distribuição de tensões em suas camadas. Nos próximos itens

desta dissertação foi realizada uma revisão da literatura dos revestimentos de vias urbanas com concreto asfáltico e bloco intertravado, que é o foco do comparativo econômico neste estudo.

2.2 Características dos pavimentos urbanos

O pavimento, sendo uma estrutura de múltiplas camadas, de diversos materiais, construída para suportar o peso das cargas dos veículos, deve proporcionar a todos esses, um deslocamento seguro e confortável em qualquer situação climática. Essa definição clássica, permite distinguir alguns conceitos, que estão implícitos, mas, muitas vezes, ficam esquecidos na prática diária dos técnicos e dos tomadores de decisão (MOTTA, 1995).

Começando pela palavra “estrutura” que exprime o fato de que o sistema, constituído pelas várias partes do pavimento, formará um conjunto solidário que sofrerá deslocamentos e tensões como forma de resistir às cargas impostas pelos veículos e pelo clima. Como qualquer outra estrutura da engenharia civil, trata-se de distribuir as cargas de forma compatível com a resistência de cada camada construída e do subleito existente no local.

Porém, diferente das outras estruturas sofre sobremaneira a influência do clima e tem vida útil curta se comparada a uma barragem ou a um edifício (MEDINA, 1997).

A atualização dos métodos de dimensionamento é uma realidade e uma necessidade para qualquer tipo de via. O desenvolvimento de técnicas e projetos voltados para a pavimentação urbana é urgente e tem facetas bem diferenciadas em relação ao pavimento rodoviário.

O pavimento é uma estrutura de multicamadas sujeita a tensões e deformações que derivam do tráfego e do clima e que devem ser compatibilizadas com a resistência de cada material empregado em cada uma das camadas (ABPv,1995). O entendimento da forma de atuação do pavimento permite estabelecer critério de ruptura que deverão ser atendidos durante sua vida útil (MOTTA, 1995).

A caracterização dos materiais deve ser adequada, ou seja, é necessário determinar o módulo de elasticidade ou módulo de resiliência de cada um deles, por meio de ensaios triaxiais, nas condições que serão empregados (MEDINA, 1997).

Para Motta (1995), dimensionar um pavimento é mais que somente determinar a espessura de cada camada: é necessário compatibilizar a rigidez relativa dos materiais disponíveis. Segundo Medina (1997), dimensionar um pavimento é, portanto, calcular as espessuras de cada um dos materiais, que sejam necessárias e suficientes para proteger as camadas inferiores em termos de capacidade de carga. Para isso, limitam-se tensões e/ou deformações em pontos específicos.

Para um dimensionamento racional, é necessário obter as propriedades elásticas de todos os materiais, que compõe o pavimento e o subleito. Ensaio adequados, que permitam obter modelos de comportamento tensão-deformação, são indispensáveis para fornecer dados de entrada para cálculos dos estados de tensão na estrutura, sob o carregamento, por exemplo, do eixo padrão. Os ensaios que normalmente têm sido empregados nessa caracterização são os triaxiais de carga repetida (DNER ME-131/94) para solos e britas e os de compressão diametral para misturas asfálticas e misturas cimentadas (DNER ME-133/94).

Os materiais diversos, que normalmente são utilizados para compor o pavimento mais comum no Brasil (pavimento asfáltico), são pré-qualificados por uma série de exigências estabelecidas de maneira empírica, para parâmetros físicos e mecânicos de comportamento (granulometria, plasticidade e índice de suporte, por exemplo) (ABPv, 1995). Essa visão deveria sofrer modificações para englobar os novos estudos e aproveitar o máximo possível os materiais e as soluções alternativas.

O deslocamento seguro e confortável em qualquer situação climática é um aspecto de extrema importância para o usuário. No entanto, a maior parte das vezes não é considerado ao longo da vida útil do pavimento. Está associado intrinsecamente ao revestimento, na maioria dos seus aspectos, já que exprime a interação pneu-pavimento. No entanto, vale dizer que o aspecto do conforto de rolamento deve ter critérios bastante amplos quando se trata de pavimentação urbana.

Revestimentos aceitáveis para ruas de pouco tráfego e baixa velocidade não podem ser comparados a outros de autoestrada, por um mesmo índice de qualidade de conforto ao rolamento. Exemplificando: um pavimento de blocos de concreto não pode ter o mesmo índice de conforto ao rolamento que um pavimento de concreto asfáltico usinado a quente. No entanto, pode ser muito adequado um calçamento

desse tipo em ruas de bairro e transversais de pouco movimento, sobretudo em oposição à alternativa de asfaltar tudo e depois instalar quebra-molas para reduzir a velocidade dos veículos (RESTOM, 1993).

A segurança para rolamento engloba muitos aspectos, desde a sinalização adequada até a aquaplanagem, que, em termos de pavimentação, é o item mais importante desse aspecto da definição, já que envolve aspectos diretamente relacionados à textura do revestimento.

A prática, atualmente tão valorizada de uso de concreto asfáltico em vias urbanas, superficialmente tão fechado e fino, não manifesta a preocupação de manter um coeficiente de atrito adequado, principalmente sob lâmina d'água, além da excessiva impermeabilização obtida (RESTOM, 1993).

A atitude mais comum, quer no dimensionamento quer na avaliação de pavimentos urbanos, tem sido transplantar de maneira direta a prática rodoviária sem nenhuma adaptação, o que pode levar a situações não adequadas. Para Restom (1993), simplesmente transfere-se para a via urbana a técnica rodoviária. Na via urbana, há que se considerar a tensão tangencial de frenagem e aceleração, a tensão estática nos pontos de estacionamento, a qual deforma plasticamente o asfalto (observa-se nos pontos de ônibus a massa asfáltica subir ao meio-fio por frenagem). A força centrífuga nos cruzamentos, o atrito dos pneus, a ação dos solventes dos resíduos de escapamento do veículo. Para todas as camadas dos pavimentos urbanos, a questão das cargas estáticas e o acúmulo de deformações dinâmicas parecem ser mais importante em relação às condições das rodovias (IBP, 1999).

2.3 Concreto asfáltico

2.3.1 Origem

Os primeiros registros são de 3000 a.C., quando ele era usado para conter vazamentos de água em reservatórios, já passando pouco depois a pavimentar estradas no Oriente Médio. Nessa época, ele não era extraído do petróleo, mas feito com piche retirado de lagos pastosos. A partir de 1909, iniciou-se o emprego de asfalto derivado do petróleo, devido à sua maior pureza e viabilidade econômica, sendo esse o principal meio de produção de asfalto atualmente.

De acordo com Battagin (2009), a palavra cimento é originada do latim *caementu*, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado.

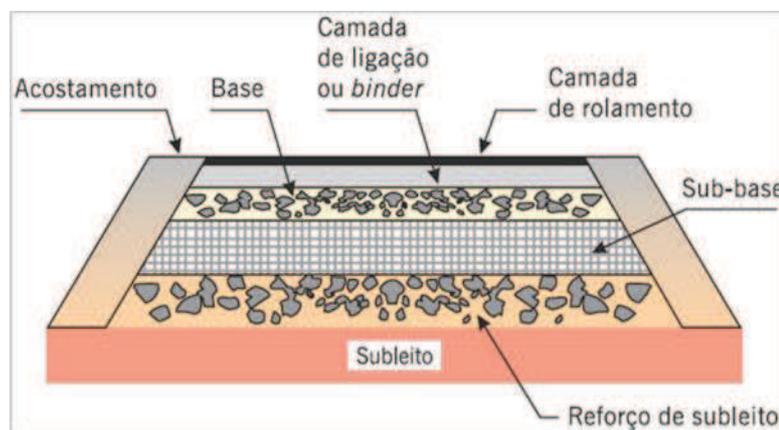
Revisando a história, mais recentemente, Senço (2007) aponta que o uso de asfaltos naturais, provenientes de jazidas, foi usado primeiramente pelos franceses, em 1802. Os americanos, em 1838, e os ingleses, em 1869, executaram pavimentações de ruas e pátios. Somente em 1870, os americanos executaram o primeiro pavimento com mistura fina, o *sheet asphalt*, também com asfalto natural.

Segundo Castro (2010), os primeiros asfaltos ocorriam na natureza e eram encontrados em camadas geológicas, ora como argamassas moles e prontamente utilizáveis, ora como veios negros duros e friáveis de formação rochosas. Esses passaram a ser conhecidos como asfaltos naturais e foram amplamente utilizados até o início do século 20.

2.3.2 Revestimento de concreto asfáltico

Esses pavimentos são formados por uma camada de rolamento contínua de concreto asfáltico, sem qualquer tipo de junta e cuja espessura é variável em função do tráfego. Normalmente, as camadas da estrutura se apoia sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros, conforme Figura 2 (BERNUCCI et al., 2007).

Figura 2 - Pavimento de concreto asfáltico (corte transversal)



Fonte: Bernucci et al. (2007).

O asfalto utilizado na pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e tem propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto em contato com o ar e água passa por um processo de envelhecimento por oxidação (BERNUCCI et al., 2007).

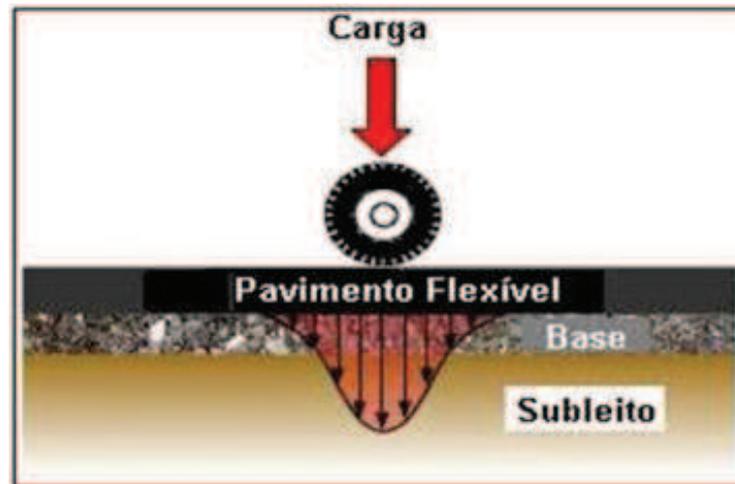
São denominados também de pavimentos flexíveis. O pavimento flexível é caracterizado por apresentar baixo Módulo de Rigidez, isso é, diluir tensões verticais em função apenas de sua espessura (h), sem sofrer significativas tensões de tração e contribuir de modo significativo para a formação e a propagação de sulcos nas trilhas de roda, que consiste de uma depressão longitudinal na superfície do pavimento, que ocorre no trajeto por onde passam as rodas dos veículos (SANTANA, 1993).

Os termos rígido e flexível compreendem as reações estruturais dos materiais isoladamente como também as respostas estruturais do pavimento como um todo. Logo, descreve o desempenho do pavimento sobre ações de esforços externos (BALBO, 2007).

Esse tipo de pavimento é dimensionado, normalmente, pela compressão e pela tração na flexão, e os carregamentos provocados pelo tráfego dão origem a bacias de deformações, o que leva a deformações permanentes e ao rompimento por fadiga na estrutura (SENÇO, 2007).

Para Yoder e Witczak (1975), nos pavimentos flexíveis existe uma concentração dos esforços nos pontos de aplicação das cargas, ou seja, as tensões são distribuídas em uma área relativamente pequena. Desse modo, existe a concentração dos esforços nos pontos em que são aplicados, o que gera um acúmulo de esforços pontuais que desgastam a estrutura, como demonstra Figura 3.

Figura 3 - Distribuição do carregamento em pavimentos flexíveis



Fonte: adaptado de Medina (1997).

O revestimento asfáltico é a camada superior responsável por receber diretamente os esforços provenientes do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, além de estar suscetível à ação dos agentes climáticos, tais como sol, chuva e variações de temperatura. Outra atribuição dessa camada é proporcionar conforto e segurança aos usuários, além de proteger as camadas anteriores por meio da impermeabilização do pavimento (BERNUCCI et al., 2007).

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é o mais empregado no Brasil. Trata-se do produto da mistura de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante (NAKAMURA, 2011).

O cimento asfáltico é especificamente obtido para apresentar características apropriadas à pavimentação, podendo ser obtido por destilação do petróleo em refinarias ou do asfalto natural encontrado em jazidas. O cimento asfáltico oriundo de petróleo. O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na elaboração de revestimentos, podendo ser obtido pela destilação do petróleo em refinarias ou pelo asfalto natural, encontrado em jazidas.

O cimento asfáltico atua como um fluido viscoso e em baixas temperaturas (abaixo de 0°C), o cimento se torna elástico, atuando como uma borracha: quando recebe um carregamento, o material se deforma, quando o carregamento é retirado, o material volta ao estado original (SPECHT; CERATTI; PALUDO, 2004).

O CAP, Asfalto Convencional, foi utilizado na comparação neste trabalho. Dentro das especificações da Agência Nacional de Petróleo (ANP), Regulamento Técnico 03/2005, tem-se quatro tipos de CAP: CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200. A nomenclatura de cada tipo de asfalto deve-se à profundidade de penetração de uma agulha de 100g, a 25°C em um intervalo de 5 segundos. Para pavimentação CAP 50/70 é o mais utilizado. Isso ocorre pois ele não é rígido de mais como o 30 /45 e nem fluido demais como o 150 /200 (ABEDA, 2017).

2.3.3 Desempenho estrutural do concreto asfáltico em vias urbanas

O concreto asfáltico, também chamado de concreto betuminoso usinado à quente ou simplesmente CBUQ, é um material de pavimentação constituído de ligante asfáltico e agregado mineral. O ligante asfáltico atua como um elemento de ligação, colando as partículas minerais, formando uma massa coesa. Como o ligante é insolúvel em água, também atua como um agente impermeabilizante da mistura. O esqueleto mineral, quando unido por um ligante asfáltico, forma um sistema tenaz e resistente ao impacto. Como o CBUQ contém tanto agregado mineral quanto ligante asfáltico, o comportamento da mistura é afetado tanto pelas propriedades de seus componentes individuais, quanto pela relação entre eles.

O ligante asfáltico por si só é um material de construção muito interessante de se trabalhar. Sua principal característica, a suscetibilidade à temperatura, é uma virtude e, por vezes, sua fraqueza, pois suas propriedades são muito dependentes da temperatura. Por isso, quase toda a caracterização, tanto do ligante quanto de sua mistura com agregados deve estar acompanhada da temperatura em que foi realizada (IBP, 1999).

Frequentemente, o cimento asfáltico é chamado de visco elástico, pois apresenta, ao mesmo tempo, características elásticas e viscosas. Em altas temperaturas, o cimento asfáltico se comporta quase que totalmente como um fluido viscoso. Em outras palavras, quando aquecido a temperaturas suficientemente altas, superiores a 100°C, esse apresenta a consistência de um óleo lubrificante automotivo. Em temperaturas muito baixas, inferior a 0°C, o cimento asfáltico se comporta quase como um sólido elástico, isso é, comporta-se como uma peça de borracha. Quando carregado, estica ou se comprime, assumindo uma forma diferente; quando descarregado, retorna facilmente à sua posição original. Em

temperaturas intermediárias, que é o que se espera que ocorra no pavimento, o cimento asfáltico apresenta tanto as características de um fluido quanto as de um sólido (IBP, 1999).

Existe uma outra característica importante do cimento asfáltico. Como esse é formado por moléculas orgânicas, reage com o oxigênio do meio ambiente. Essa reação é chamada de “oxidação” e isso modifica a estrutura e a composição das moléculas do asfalto. Quando o asfalto reage com o oxigênio, é formada uma estrutura mais dura e rígida e essa é a origem do termo “endurecimento oxidativo” ou “endurecimento por velhice” (IBP, 1999).

O asfalto tem sido o principal material aglutinante utilizado na construção de rodovias e vias urbanas. Entretanto, o aumento do número de veículos comerciais e da carga transportada por eixo tem levado à degradação prematura dos pavimentos, resultando em aumento dos custos de manutenção, engarrafamentos e atrasos aos usuários. O asfalto é um excelente material aglutinante, fácil de aplicar e barato, porém apresenta algumas limitações.

A resistência à tração do asfalto diminui à medida em que esse é esticado, ou seja, o betume perde a sua resistência mecânica quando o pavimento sofre deflexões. Em baixas temperaturas, torna-se rígido e quebradiço, sujeito a trincas, em altas temperaturas amolece e flui, causando deformações plásticas ao pavimento. Apresenta tendência ao envelhecimento, sofrendo oxidação.

A deformação permanente é um defeito caracterizado por uma seção transversal que não está em sua posição original. Ela é dita “permanente”, pois representa uma acumulação de pequenas parcelas de deformação que ocorrem a cada carregamento, não pode ser recuperada e ocorre nos primeiros anos de vida do pavimento (IBP, 1999).

O afundamento de trilha de roda é a forma mais comum de deformação permanente, podendo ter diversas causas. Em um dos casos, o afundamento da trilha de roda é causado pela repetição de tensões aplicadas no subleito (solo original), estendendo-se a todas as camadas do pavimento. Outro importante tipo de afundamento de trilha de roda resulta da acumulação de deformação nas camadas betuminosas. Esse tipo de afundamento é causado por misturas que têm pequena resistência ao cisalhamento, insuficiente para resistir à passagem de cargas repetidas.

Quando uma mistura asfáltica afunda, significa que essa tem baixa resistência ao cisalhamento. Cada vez que um caminhão pesado aplica carga, ocorre uma pequena deformação cisalhante, caracterizada por afundamento e escorregamento lateral da mistura. Um pavimento apresentando afundamento de trilha de roda representa perigo, pois pode acumular água, causando aquaplanagem. O afundamento de trilha de roda em misturas betuminosas é um fenômeno característico de altas temperaturas, ocorrendo preferencialmente no verão, em presença de altas temperaturas (IBP, 1999).

Para Balbo (2007), a profundidade das trilhas de rodas pode ser utilizada como indicador para necessidade da reabilitação dos pavimentos asfálticos. O emprego de pavimentos flexíveis nos corredores de ônibus tem se mostrado insatisfatório no que diz respeito à sua durabilidade, devido à ocorrência precoce e continuada de defeitos típicos, como a deformação plástica no revestimento, o afundamento na trilha da roda e buracos.

Nas paradas de ônibus, o revestimento de concreto asfáltico sofre o efeito dissolvente e desagregador provocado pela ação simultânea dos pneus dos ônibus e óleos lubrificantes e combustíveis derramados na superfície, associada, ainda, aos efeitos da trilha de roda, levando à destruição precoce do pavimento e a grandes despesas de conservação.

O fluxo de veículos na via urbana não é contínuo, de modo geral, existem vários pontos de retardamento (paradas obrigatórias e involuntárias) ao longo dos segmentos, o que leva a velocidades operacionais baixas. O pulso de carga transiente gerado quando da passagem de uma carga de eixo em baixa velocidade faz com que o revestimento asfáltico opere com módulos de resiliência menores, em função de um tempo de solicitação maior. Associam-se a esse efeito, nos pontos de retardamento, os esforços horizontais gerados nas operações de frenagem e aceleração dos veículos.

Módulo de resiliência é o módulo de elasticidade determinado por meio de ensaios dinâmicos laboratoriais ou de carga repetida, triaxiais para solos e materiais granulares, e de compressão diametral para as misturas betuminosas, com equipamentos que simulem as condições de campo (PINTO; PREUSSLER, 2002).

O defeito mais comum, derivado desse tipo de situação, é o escorregamento de massa ou ondulação. Observou-se que, em revestimentos com sucessivos recapeamentos e grandes espessuras de concreto asfáltico, a existência de tráfego

canalizado à acentuação desse tipo de defeito com a elevação das temperaturas. Esse fenômeno acontece entre os meses de novembro e março, quando a temperatura média do ar fica em 28°C, no sul do país (PINTO; PREUSSLER, 2002).

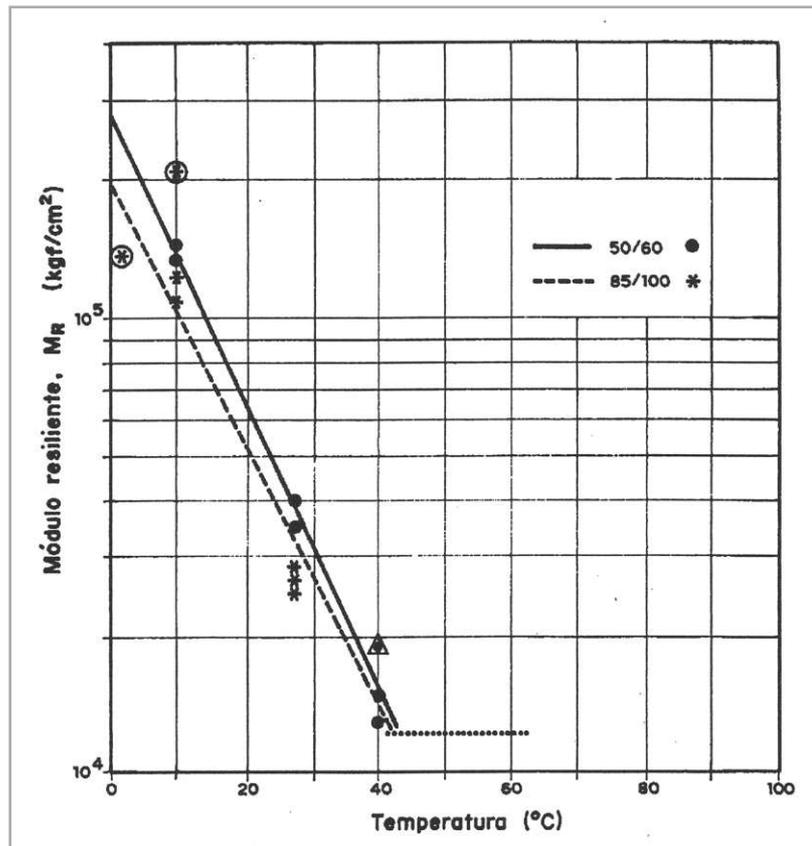
O Gráfico 1 mostra a variação do módulo de resiliência com a temperatura para as amostras preparadas com dois ligantes. Aquecidas as amostras dos ligantes acima de 35°C, o ensaio de compressão diametral perde o sentido por preponderarem as deformações plásticas ou permanentes. A curva média de variação do módulo resiliente com a temperatura tem a expressão aproximada:

$$\text{Log}M_R = 5,38-003T$$

Sendo M_R = Módulo resiliente

T = temperatura

Gráfico 1- Efeito da temperatura no módulo resiliente de misturas asfálticas



Fonte: Medina (1997).

É corrente a observação de que o defeito mais frequente nos pavimentos asfálticos em vias urbanas é o afundamento e o escoamento do revestimento na trilha de rodas, resultante de deformações permanentes irreversíveis (plásticas), seja

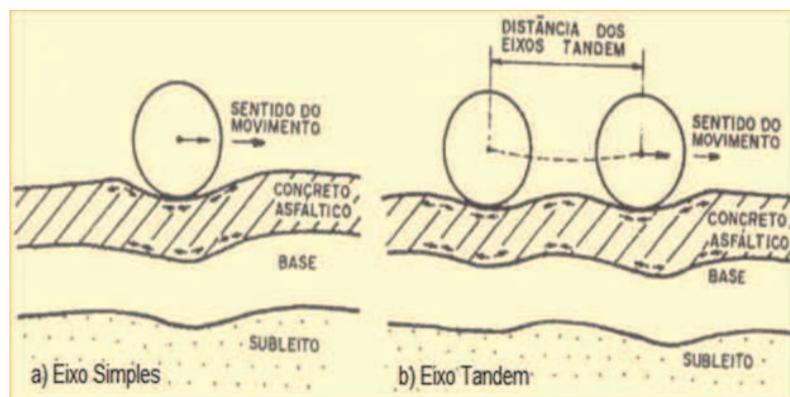
nos corredores de ônibus ou em áreas de circulação e estacionamento de veículos comerciais (MEDINA, 1997). Pode-se medir o afundamento ou flecha na trilha das rodas com uma treliça de alumínio de 1,20 m de base, que tem uma régua vertical corrediça no centro. Essa se apoia no ponto mais fundo da trilha para medir o afundamento (MEDINA, 1997).

Em alguns países, o valor máximo admissível é de 10 mm, ao atingir 20 mm exige reparo imediato. Em Mecânica de Pavimentos, convencionou-se chamar de deformação resiliente a deformação elástica ou recuperável dos materiais empregados na estrutura de um pavimento, sob a ação de cargas repetidas (MEDINA, 1997).

Outro fator que influencia o desempenho dos pavimentos é a geometria longitudinal e transversal da via. Os defeitos são, em geral, de maior gravidade em segmentos com rampas com declividades mais acentuadas. Os pavimentos das vias com rampas ascendentes tendem a apresentar mais defeitos do que aqueles com rampas descendentes (MEDINA, 1997).

Segundo Medina (1997), a repetição de cargas das rodas dos veículos imprime flexão à camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso. Iniciam-se as trincas, geralmente, na parte inferior do revestimento, que se propagam para cima até atingir a superfície. Em revestimentos muito espessos, de 20 cm ou mais, podem iniciar trincas na superfície pela curvatura convexa próxima às rodas (MEDINA, 1997). A Figura 4 mostra-se de modo esquemático as deformações desenvolvidas num revestimento de concreto asfáltico sob a passagem de rodas de um veículo, para eixo simples e eixo tandem (duplo).

Figura 4 - Tensões no concreto asfáltico



Fonte: Medina (1997).

Um dos defeitos mais frequentes e característicos nos pavimentos dos grandes centros urbanos é a deformação plástica e permanente causada pela elevada e intensa solicitação do tráfego, principalmente nas áreas de frenagem, faixas seletivas de carga e paradas de ônibus, que leva ao desconforto e à insegurança do usuário ao transitar por essas vias. O grau de severidade desses defeitos é acelerado com o aumento da temperatura local e com o tipo de ligante betuminoso empregado na fabricação das misturas asfálticas (MEDINA, 1997).

2.4 Dimensionamento dos pavimentos flexíveis

No dimensionamento de um pavimento flexível, na grande maioria das vezes, busca-se a solução econômica mais viável, levando em consideração o desgaste futuro da estrutura e o seu desempenho funcional quando submetida aos carregamentos decorrentes do tráfego.

Senço (2007, p. 409) faz a seguinte afirmação quanto ao dimensionamento de um pavimento:

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

No dimensionamento, considera-se que as cargas aplicadas são estáticas, porém, a estrutura é submetida a cargas repetidas o que acarreta deformações permanentes e elásticas com intensidade de acordo com o número dessas repetições (SENÇO, 2007).

Os métodos de dimensionamento podem ser classificados basicamente em: métodos mecanísticos, métodos empíricos e métodos empíricos-mecanicista.

Os métodos mecanísticos são aqueles que utilizam uma teoria para prever as tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima na estrutura do pavimento. São baseados na teoria da elasticidade, em que são utilizados programas computacionais para prever o funcionamento da estrutura quando solicitada, permitindo, assim, a alteração dos materiais ou das espessuras das camadas de modo que o conjunto seja solicitado de forma equilibrada, sem

sobrecarregar nenhuma das camadas, evitando a ruptura precoce do pavimento (PINTO; PREUSSLER, 2002).

O método mecanístico-empírico tem o objetivo de dimensionar os pavimentos em função principalmente desses dois fatores, levando em consideração as tensões, deformações e deslocamentos que são impostos pelas cargas de tráfego e a capacidade resistente dos materiais que constituem a estrutura (MOTTA, 2003; FRANCO, 2007).

Para Moraes (2017) com a diversificação do tráfego atualmente, essa capacidade de estudo mais detalhado do pavimento tem importante contribuição para a melhoria do desempenho funcional e estrutural do pavimento. Outro avanço do método empírico-mecanicista é a abordagem dos efeitos das condições ambientais e de tráfego de forma inovadora e mais precisa para as diferentes situações (MORAES, 2017). Além disso, é visto como o método mais promissor, pois é o único existente que pode permitir a absorção de aspectos relacionados a progressão de fraturas dos materiais futuramente (BALBO, 2007).

No Brasil, apesar de já existirem ferramentas de análise de pavimentos que utilizam conceitos mecanicistas, a maioria das estruturas de pavimentos são dimensionadas através de métodos empíricos.

2.4.1 Método do extinto Departamento Nacional de Estradas e Rodagens - DNER

Dimensionar um pavimento significa determinar as espessuras das camadas que o constituem de forma que estas camadas (reforço do subleito, sub-base, base e revestimento) resistam e transmitam ao subleito as pressões impostas pelo tráfego, sem levar o pavimento a ruptura ou deformações e a desgastes excessivos (BALBO, 2007).

Os métodos empíricos de dimensionamento têm como base o método do CBR.

O método do DNER é uma variante do critério do CBR, o qual simula os efeitos de repetições de carga de um eixo padrão de 18.000 libras (80kN) (BALBO, 2007). Essa metodologia foi concebida pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza no início da década de 1960. Baseou-se, na adaptação para rodovias, no método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, originalmente destinado a pavimentos de aeroportos. Esse método, foram empregadas as mesmas

formulações adotadas por Turnbull et al. (1962), porém com pequenas adaptações como a variação de carga com profundidade e adoção de carga única (eixo-padrão 80kN), em vez de par de rodas duplas (BALBO, 2007).

O ensaio de CBR é utilizado para dimensionar as camadas que compõem estrutura do pavimento flexível. Como parâmetros, também são usados coeficientes de equivalência estrutural que foram baseados em resultados obtidos de experimentos realizados na Pista Experimental do AASHO Road Test. No caso do subleito e camada de reforço do subleito, são encontrados valores estatísticos de CBR considerando-se um trecho homogêneo em termos de solo. Ao dimensionar-se as camadas de base e sub-base, deve-se atentar aos valores mínimos de CBR de 80% e 20%, respectivamente (DNIT, 2006a).

Para Balbo (2007), o processo do DNER roteiriza o dimensionamento de pavimentos flexíveis em função dos seguintes fatores:

- a) capacidade de subleito (CBR) e índice de plasticidade do grupo IG;
- b) número equivalentes de operações do eixo padrão (N), e;
- c) espessura total de pavimento durante um período de projeto.

Com base na espessura total, determinam-se as espessuras das camadas constituintes, multiplicando-se as espessuras obtidas para o material padrão (base granular) pelos coeficientes estruturais correspondentes a cada tipo de material.

O subleito e as diferentes camadas do pavimento devem ser compactados de acordo com os valores fixados nas Especificações Gerais, recomenda-se que, em nenhum caso, o grau de compactação deve ser inferior a 100% (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Recomendações do método (DNER, 1996):

- a) Materiais para reforço do subleito devem apresentar:
 - CBR maior que do subleito;
 - Expansão ≤ 1 % (medida com sobrecarga de 10 lb).
- b) Materiais do subleito:
 - CBR ≥ 2 %;
 - Expansão ≤ 2 % (medida com sobrecarga de 10 lb).
- c) Materiais de sub-base devem ter:
 - CBR ≥ 20 %;
 - IG= 0 (Índice de Grupo);
 - Expansão $\leq 1,0$ % (medida com sobrecarga 10 lb).

d) Materiais para a base do pavimento:

- CBR ≥ 80 % (para $N \geq 5 \times 10^6$);
- CBR ≥ 60 % (para $N < 5 \times 10^6$);
- Expansão $\leq 0,5$ % (medida com sobrecarga 10 lb);
- Limite de liquidez ≤ 25 %;
- Índice de plasticidade ≤ 6 % (DNIT, 2006a).

Caso o limite de liquidez seja superior a 25% e/ou o índice de plasticidade seja superior a 6%; o material pode ser empregado na base (satisfeitas as demais condições), desde que o equivalente de areia seja superior a 30% (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Para avaliação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais que irão compor as camadas do pavimento é utilizado o ensaio CBR. A fim de uma maior segurança a norma recomenda utilizar o Índice de Suporte (I.S), que é um CBR corrigido em função do índice de Grupo (IG), conforme a expressão a seguir:

$$IS = \frac{IS_{CBR} + IS_{IG}}{2}$$

Onde:

IS_{CBR} = índice de suporte numericamente igual ao Índice de Suporte Califórnia (CBR- obtido no ensaio e dado em %);

IS_{IG} = índice de suporte derivado do índice de grupo, correspondente praticamente a uma inversão de escala, fazendo com que solos de boa qualidade tenham os maiores valores de IS_{IG} , Tabela 1.

Tabela 1 - Valores IS em função IG

Índice de Grupo(IG)	Índice de Suporte (IS _{IG})
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Fonte: DNER (1996).

O método impõe a condição de que o Índice de Suporte (IS) máximo seja igual ao valor do CBR; isto significa que quando o IS for maior que o CBR, o valor adotado para IS será o próprio CBR.

✓ Número equivalente de operações de eixo padrão - N

Para Magalhães (2016) outra variável necessária para o dimensionamento das camadas é a determinação do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão. Para Pinto e Preussler (2002), o número equivalente N , necessário ao dimensionamento de uma rodovia, é definido pelo número de repetições equivalentes de um eixo-padrão de 8,2 tf, durante o período de vida útil do projeto, calculado pela equação 2.1. Normalmente, os órgãos responsáveis pelas rodovias brasileiras adotam 10 anos como período de projeto para pavimentos asfálticos flexíveis.

$$N = V_t \times (FE) \times (FC) \times (FR) \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em que:

N = número equivalente de operações de eixo padrão;

V_t = volume total de tráfego, no período de projeto;

FE = Fator de eixos;

FC = Fator de equivalência de carga por eixo.

FR = Fator climático regional.

✓ Volume total de tráfego - V_t

Para a determinação do volume diário médio (V_m) de tráfego, no sentido mais utilizado, inicialmente, adota-se uma taxa de crescimento anual para as regiões às quais a via serve, visto que sofrerá influência do tráfego (BALBO, 2007). Ainda, para Balbo (2007), nessa taxa, deve-se considerar o tráfego atraído ou desviado, crescimento histórico do tráfego da via a ser pavimentada (caso de implantação).

O volume total de tráfego foi determinado pela a equação 2.2.

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad (\text{Equação 2.2})$$

Em que:

P = Período do projeto;

V_m = Volume diário médio de veículos no período de projeto.

Aplicam-se duas formas de taxa de crescimento: progressão linear ou progressão geométrica.

Sendo o V_0 volume diário médio de tráfego no ano de abertura, num único sentido e admitindo-se uma taxa ($t\%$) de crescimento anual, o volume diário médio (V_m) de tráfego, durante um período (P) anos, teremos:

Progressão linear, equação 2.3:

$$V_m = \frac{V_0 [2 + (P \times t / 100)]}{2} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Progressão geométrica, equação 2.4:

$$V_t = \frac{365 \times V_0 \times [(1 - t / 100)^{p-1}]}{t / 100} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Em que:

V_0 = Volume diário inicial do tráfego;

t = Taxa de crescimento do tráfego ao ano.

✓ Fator de equivalência de carga – FE

O fator de eixos (FE) é um coeficiente que multiplicado pelo número de veículos, fornece o número de eixos correspondentes que solicitam o pavimento durante o período de projeto (BALBO, 2007). Esse fator transforma o tráfego de

número de veículos comerciais, no sentido dominante, em número de passagens de eixos equivalentes (MORAES, 2017).

A obtenção do valor FE pode ser feita pela equação 2.5, a seguir.

$$FE = \frac{(p_2)2 + (p_3)3 + \dots + (p_n)n}{p_{co}} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Sendo:

p_2 - Porcentagem de veículos de 2 eixos;

p_3 - Porcentagem de veículos de 3 eixos;

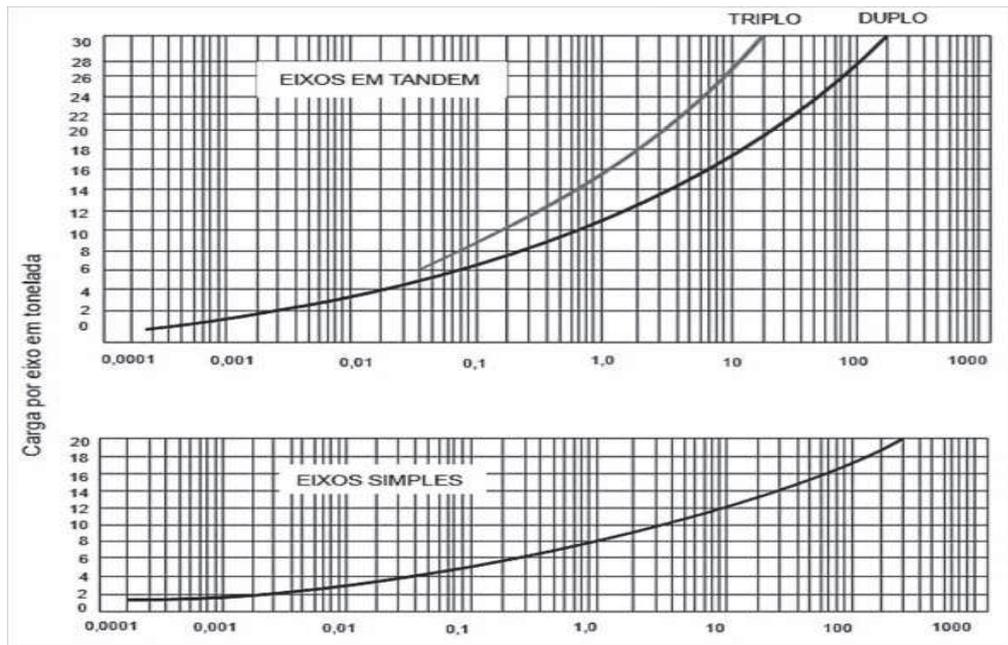
p_n - Porcentagem de veículos de n eixos;

p_{co} - Porcentagem de veículos comerciais no total.

✓ Fator de equivalência de carga por eixo - *FC*

O fato de cargas (*FC*) é número que multiplicado pelo número de eixos que operam, resulta no número de eixos equivalentes ao eixo padrão (BALBO, 2007). Esse fator baseia-se no Fator de Equivalência de Operações (*f*) relacionando o efeito da passagem para qualquer tipo de veículo com o efeito de passagem de um veículo padrão. Segundo Moraes (2017), o fator de equivalência é obtido a partir das cargas dos diferentes tipos de eixos que solicitam o pavimento, podendo ser tandem ou simples. Para determinação desse fator, o DNIT (2006a) fornece um ábaco através de seu Manual de Pavimentação, conforme Gráfico 2.

Gráfico 2 - Fatores de equivalência de operações



Fonte: DNIT (2006a).

Após os dados de carga serem obtidos através da leitura do Gráfico 2, o DNIT (2006) fornece uma tabela onde organiza-se os diversos eixos por intervalos de carga, representada pela Tabela 2.

Tabela 2 - Determinação do fator de operações

(1)	(2) percentagem	(3) Fator de equivalência	(4) Fator de operações
Eixo Simples(t)			
Eixo tandem (t)			

Fonte: DNIT (2006a).

Com os valores dos fatores de equivalência (coluna 3) obtidos do Gráfico 2, é possível obter os valores dos fatores de operações (coluna 4) através do produto entre as colunas 2 e 3. Os eixos de veículos não comerciais também são desprezados nos cálculos. Por fim, o fator de cargas (*FC*) pode ser calculado a partir do somatório dos fatores de operações, que é definido como Equivalência.

A Equação 2.6 demonstra como o valor de *FC* pode ser obtido.

$$FC = \frac{\sum \text{fatores de operação}}{100} = \frac{\text{equivalência}}{100} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Com os parâmetros *FE* e *FC* encontrados, é possível determinar o fator veículo (*FV*) através da Equação 2.7.

✓ Fator de Veículos - *FV*

Balbo (2007) aduz, o fator veículo (*FV*) tem função de transformar o tráfego real, que solicita o pavimento durante o período de projeto, em um tráfego equivalente. Assim, o fator veículo (*FV*) é o produto de dois outros fatores, o fator de eixos (*FE*) e o fator de cargas (*FC*). A contagem do tráfego e a caracterização dos tipos de veículo que o compõem é essencial para a determinação dessas variáveis (MORAES, 2017).

$$FV = (FE) \times (FC) \quad (\text{Equação 2.7})$$

✓ Fator Climático - *FR*

FR é o fator climático regional, para se levar em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano (o que se traduz em variações de capacidade de suporte dos materiais), o número equivalente de operações de eixo-padrão ou parâmetro de tráfego, *N*, deve ser multiplicado por um coeficiente (*FR*) que, na pista experimental da AASHO, variou de 0,2 (ocasião em que prevalecem baixos teores de umidade) a 5,0 (ocasião em que os materiais estão praticamente saturados) (DNIT, 2006a).

Esse coeficiente também denominado como fator chuva por alguns autores, é obtido em função da altura média anual de chuva da região estudada. O coeficiente final a adotar é uma média dos diferentes coeficientes sazonais, levando-se em conta o espaço de tempo em que ocorrem. Como, durante um ano, as condições ambientais variam, deve-se fazer uma média ponderada para o período de análise do projeto, considerando o tempo em que os diferentes fatores climáticos atuam. A Tabela 3 ilustra a correlação sugerida por DNER (1960) entre a altura média das chuvas anual (mm) e o Fator Climático (*FR*).

Na ausência, tem-se adotado um *FR* = 1,0 face aos resultados de pesquisas desenvolvidas no IPR/DNER.

Tabela 3 - Fator Climático Regional

Índice Pluviométrico Anual (mm)	Fator Climático Regional (FR)
Até 800	0,7
De 800 a 1.500	1,4
Mais que 1.500	1,8

Fonte: adaptado do DNER (1996).

✓ Espessuras das camadas e coeficientes de equivalência estrutural

O método do extinto DNER, tendo base no critério CBR, apresenta como critério de ruptura o acúmulo de deformações plásticas causado por esforços de cisalhamento no subleito e nas camadas granulares do pavimento ao longo de seu período de projeto (BALBO, 2007). Devido a isso, o método fundamenta-se em determinar espessuras equivalentes de material granular para que não ocorram essas deformações excessivas. Para os diferentes materiais granulares que podem constituir as camadas de um pavimento, o DNIT (2006a) apresenta os coeficientes estruturais para seus respectivos materiais, conforme Tabela 4.

A AASHTO apresenta diversas formas de se obter o valor do coeficiente estrutural, em geral por meio de correlações com outras propriedades mecânicas dos materiais (CBR, módulo de resiliência, etc.) (BALBO, 2007).

Tabela 4 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais

Tipo de Material	Coeficiente Estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio de graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Base Granulares	1,0
Sub-base granulares	0,77 (1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Base Solo-Cimento ou BGTC com resistência à compressão aos 7 dias superior a 4,5 MPa	1,7
Base de BGTC com resistência à compressão aos 7 dias entre 2,8 a 4,5 MPa	1,4
Base Solo-Cimento com resistência à compressão aos 7 dias entre 2,8 a 4,5 MPa	1,2
Base de Solo melhorado com Cimento, com resistência à compressão aos 7 dias, menor que 2,1 MPa	1,0

Fonte: adaptado do método DNIT (2006a).

Os coeficientes de equivalência estrutural para sub-base granular e reforço do subleito podem ser calculados em função da relação ente CBR dessas camadas e o CBR do subleito:

$$K_{Ref} \text{ ou } K_s = (CBR_1 / 3 \times CBR_2)^{1/3}$$

Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

<i>Coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito</i>	K_{Ref}
<i>Coeficiente de equivalência estrutural da sub. base</i>	K_s
<i>CBR do reforço ou sub-base</i>	CBR_1
<i>CBR do Subleito</i>	CBR_2

Observação: o coeficiente de equivalência estrutural da sub-base granular ou do esforço do subleito deverá ser 1,0 toda vez que o CBR desses materiais for igual ou superior a três vezes o CBR do subleito.

Com o número de solicitações N , o CBR das camadas e os coeficientes de equivalência estrutural (K), mediante a análise do ábaco de dimensionamento forma-se o sistema de inequações para obtenção das espessuras das camadas.

✓ Espessuras mínimas de revestimentos

São dadas em função de N e do tipo de material do revestimento, finalidade: proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego e preservar o revestimento de uma ruptura (BALBO, 2007).

As espessuras recomendadas e apresentadas na Tabela 5 visam, especialmente, às bases de comportamento puramente granular e são ditadas pelo que se observa (BALBO, 2007).

Tabela 5 - Espessuras mínimas dos revestimentos asfálticos em função N

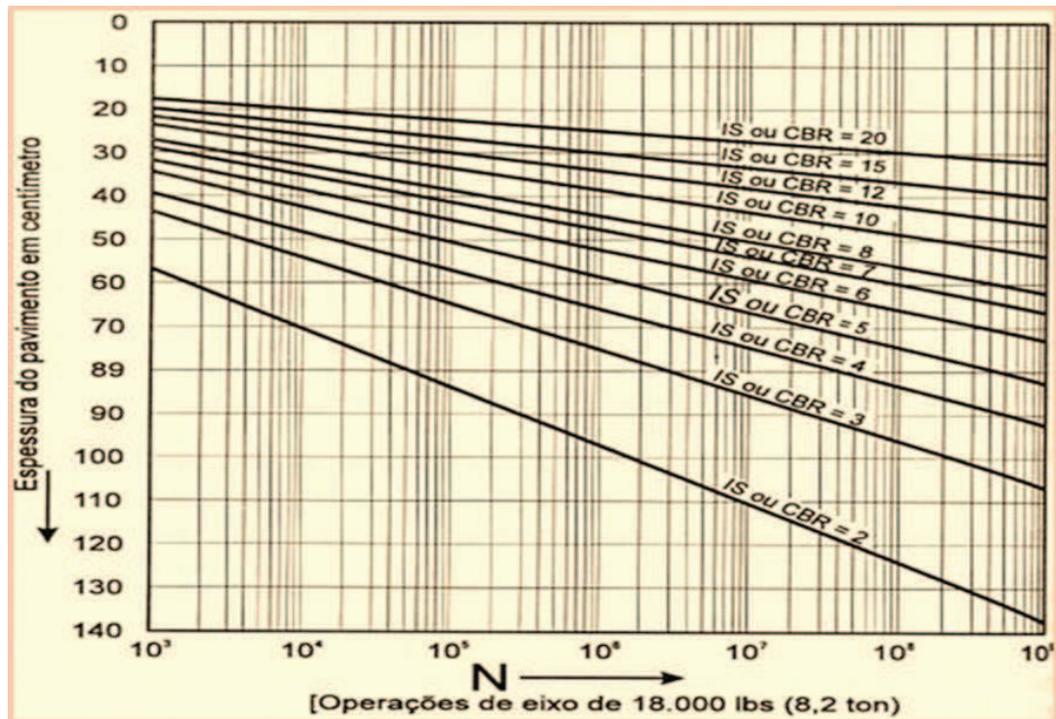
N	Espessuras mínimas
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos asfálticos com 5 cm
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Revestimentos asfálticos com 7,5 cm
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Revestimentos asfálticos com 10,0 cm
$N > 5 \times 10^7$	Revestimentos asfálticos com 12,5 cm

Fonte: adaptado do método do DNER (1996).

No caso de ocorrência de materiais do subleito com CBR inferior a 2%, deve ser feita a remoção e substituição por material com CBR superior a 2% (BALBO, 2007). No caso da adoção de tratamentos superficiais, as bases granulares devem apresentar coesão, pelo menos aparente, seja devido à capilaridade ou ao entrosamento de partículas (BALBO, 2007).

O Gráfico 3 fornece a espessura total do pavimento, em função do número de operações do eixo padrão de 8,2 tf e do valor do ISC do subleito. Entra-se no eixo das abscissas com o valor de N , procede-se verticalmente até a reta representativa do ISC do subleito, procedendo-se horizontalmente, encontra-se no eixo das ordenadas a espessura estrutural total do pavimento (H_m).

Gráfico 3 - Espessura total do pavimento em função de N e de ISC ou CBR



Fonte: método do DNER (1996).

Supõe-se, sempre, que há uma drenagem superficial adequada e que o lençol freático foi rebaixado a, pelo menos 1,50 m em relação do greide de regularização (BALBO, 2007).

Para Balbo (2007), a simbologia, Figura 5, do dimensionamento do pavimento, uma vez determinada as espessuras H_m , H_n , H_{20} , pelo Gráfico 3, e R (revestimento) da Tabela 5, as espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução das seguintes inequações abaixo:

$$RK_R+BK_B \geq H_{20} \quad (\text{Equação 2.8})$$

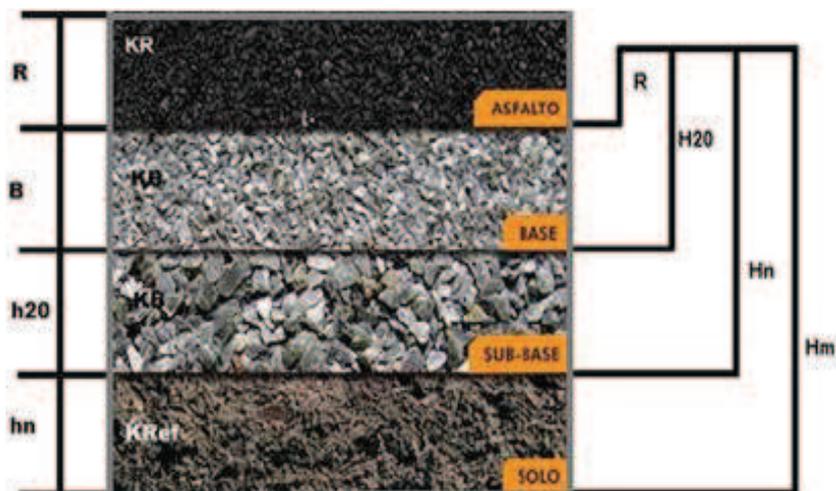
$$RK_R+BK_B+h_{20}K_S \geq H_n \quad (\text{Equação 2.9})$$

$$Rk_R+Bk_B+h_{20}K_S+h_nK_{ref} \geq H_m \quad (\text{Equação 2.10})$$

Mesmo que o CBR da sub-base seja superior a 20%, a espessura de pavimento necessário para protegê-la é determinada como se este valor fosse 20% e, por essa razão, usamos sempre, os símbolos H_{20} e h_{20} para designar as espessuras de pavimento (BALBO, 2007).

Quando o CBR da sub-base for maior ou igual a 40% e para $N \leq 10^6$, admite-se substituir na inequação (2.8), H_{20} , por $0,8 \times H_{20}$. Para $N > 10^7$, recomenda-se substituir, na inequação (2.8), H_{20} por $1,2 \times H_{20}$.

Figura 5 - Simbologia utilizada no dimensionamento no pavimento



Fonte: adaptado do método DNER (1996).

- Observação 1: As espessuras máxima e mínima da compactação das camadas granulares são de 20 cm e 10 cm, respectivamente.
- Observação 2: Espessura construtiva mínima (base mais sub-base) = 15 cm.

Em que:

R : Espessura do revestimento asfáltico;

K_R : Coeficiente estrutural do revestimento;

B : Espessura da base;

K_B : Coeficiente estrutural da base;

H_{20} : Espessura do pavimento para CBR 20 %;

h_{20} : Espessura da sub-base;

K_S : Coeficiente estrutural da sub-base;

H_n : Espessura do pavimento para CBR do reforço de subleito;

h_n : Espessura do reforço de subleito;

K_{Ref} : Coeficiente estrutural do subleito;

H_m : Espessura total do pavimento para CBR do subleito.

2.5 Blocos intertravados de concreto

2.5.1 Origem

O conceito de intertravamento de pavimentos de concreto remonta às estradas do antigo Império Romano como pode ser visto na Figura 6. Eles foram construídos com pedras cortadas de dimensões semelhantes e assentadas próximas umas das outras, no solo que se desejava pavimentar (ICPI, 2011).

Figura 6 - Estrada do Império Romano



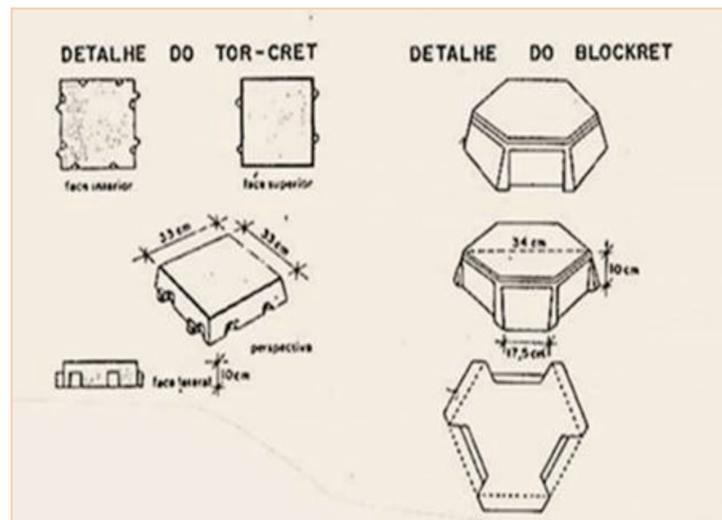
Fonte: ICPI (2011).

Os calçamentos de blocos intertravados de concreto tiveram grande desenvolvimento na Europa, nas reconstruções após a 2ª Guerra Mundial (1939 - 1945). As primeiras pesquisas sobre projetos de dimensionamento de blocos intertravados de concreto tiveram início na América do Sul e na África do Sul na

década de 1960, seguidas na década de 1970 de experiências em Modelos de Laboratório e Pistas Experimentais na Inglaterra, Austrália, Nova Zelândia e África do Sul, sendo de grande destaque os estudos de J. Knapton e B. Shackel. Em 1984, a Associação de Cimento Portland Americana publicou o seu método de dimensionamento para os blocos intertravados de concreto (ABPv,1995).

No Brasil, a produção começou timidamente no final da década de 1950, deslançando na década de 1970, tendo como pioneiros os chamados blocos articulados TOR-CRET e BLOCKRET Figura 7 (SANTANA, 1993).

Figura 7 - Blocos de concreto tipo Top-Cret e Blockret



Fonte: Santana (1993).

A reação no Brasil começou na década de 1980. Foi publicado em 1984 a ET-27 da Associação Brasileira de Cimento Portland, completada pelo Engenheiro Humberto Santana no mesmo ano.

A pavimentação intertravada com uso de blocos de concreto é amplamente utilizada, sendo indicadas tanto para tráfego leve, no caso de calçadas, praças e vias públicas, como para tráfego pesado, no que se incluem estacionamentos de veículos pesados e pátio de cargas. A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1999) menciona que o uso das peças intertravadas que utilizam cimento Portland detém um dos mais expressivos consumos dentro dos produtos pré-moldados.

2.5.2 Revestimento com blocos intertravados

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), pavimento intertravado é definido como pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base) seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção (ABNT, 2013).

O bloco intertravado de concreto é um revestimento que suporta diversos tipos de tráfego. Constitui-se de blocos maciços de concreto, com boa durabilidade e resistência permitindo uma vida útil longa gerando economia em relação ao custo benefício.

Propriedades dos blocos intertravados de concreto, conforme Júnior (2007):

- a) apresentam menor absorção da luz solar, evitando o desconforto da elevação exagerada da temperatura ambiente;
- b) podem ter, simultaneamente, capacidade estrutural e valor paisagístico;
- c) permitem fácil reparação quando ocorre recalque no subleito que comprometa a capacidade estrutural do pavimento;
- d) possibilitam fácil acesso a serviços subterrâneos, e o reparo não deixa marcas visíveis;
- e) podem ser reutilizados;
- f) não necessitam mão de obra especializada;
- g) os materiais chegam até a obra prontos para a aplicação;
- h) liberação rápida do tráfego, logo após a conclusão.

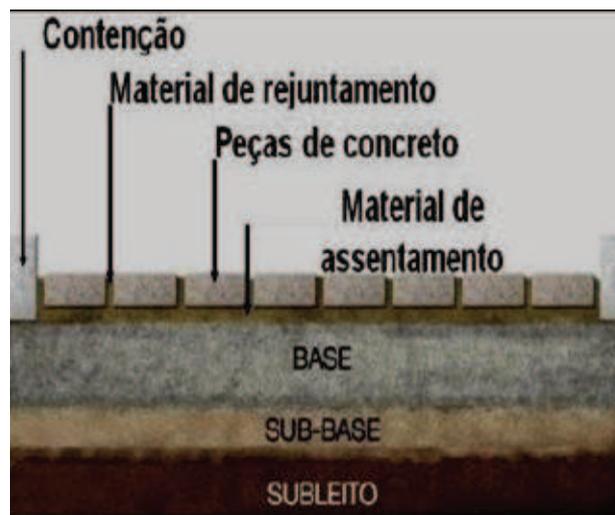
Os blocos intertravados de concreto são obtidos a partir de uma mistura homogênea de cimento Portland, agregados graúdos e miúdos, adequadamente dosada para a resistência exigida na pavimentação.

A fabricação dos blocos destinados à pavimentação de vias urbanas, como calçadas, ruas, parques, estacionamentos, deve atender a requisitos dimensionais e de resistência à compressão. A NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece os requisitos e métodos de ensaio exigíveis para aceitação de peças de concreto para pavimentação intertravada sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos (ABNT, 2013).

Segundo Wiebbelling (2015) a estrutura do pavimento intertravado caracteriza-se pelo revestimento em blocos com alta durabilidade e resistência, assentados sobre uma camada de areia, e camadas subjacentes: base, sub-base e subleito. O revestimento e a areia de assentamento são contidos lateralmente, em geral, por meio-fio, e o rejuntamento entre os blocos é feito com areia (WIEBBELLING, 2015). A Figura 8 ilustra uma seção transversal típica do pavimento com blocos intertravados de concreto.

De acordo com Fioriti (2007) e Piorotti (1984), se forem seguidos alguns requisitos básicos, como uma sub-base bem executada, blocos de qualidade e assentamento correto, um pavimento blocos intertravados pode chegar a 25 anos de vida útil.

Figura 8 - Estrutura do pavimento de bloco intertravado de concreto



Fonte: ABCP (1999).

As espessuras das camadas constituintes do pavimento intertravado, assim como nos pavimentos de concreto asfáltico, dependerão das características do tráfego imposto no pavimento, características do terreno de fundação e da qualidade dos materiais constituintes das demais camadas (ABCP, 1999).

A superfície do pavimento de blocos intertravados de concreto é antiderrapante, oferecendo melhor aderência e mais segurança. Por sua rugosidade, esse pavimento apresenta uma área de frenagem menor que outros tipos, o que se traduz em segurança tanto para pedestres como para veículos. Os blocos intertravados de concreto apresentam a superfície descontínua, constituída por vazios superficiais, o que lhes confere a propriedade antiderrapante (ABCP, 1999).

A camada de rolamento é constituída, nesse caso, por blocos de concreto maciços, colocados de forma intertravadas uns aos outros. Tais blocos se assentam sobre uma camada de areia e as juntas entre eles são preenchidas e seladas também com areia. A camada de blocos intertravados de concreto pode estar apoiada sobre uma base ou sobre o conjunto de uma base mais uma sub-base, cujas espessuras são ligeiramente menores do que as dos pavimentos asfálticos.

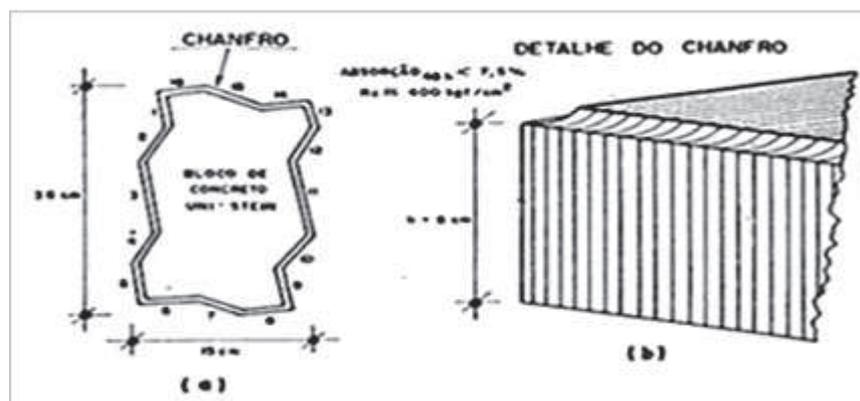
Cruz (2003, p.11) ressalta que a camada que corresponde à base é o elemento estrutural que recebe as tensões distribuídas pela camada de revestimento. A base tem como função proteger o subleito das cargas externas, evitando a aceleração da deterioração do pavimento.

✓ Formato

Knapton e Cook (1992) aduz, o formato do bloco de concreto não exerce uma influência significativa no mecanismo de funcionamento do pavimento. De acordo com Cruz (2003), não há consenso entre os pesquisadores sobre a influência do formato dos blocos na durabilidade dos pavimentos intertravados.

No Brasil, tem sido muito bem aceito o tipo denominado UNI-STEIN chanfrado e com 16 faces de travamento Figura 9 (SANTANA,1993).

Figura 9 - Bloco de concreto tipo UNI-STEIN



Fonte: Santana (1993).

Posteriormente, apareceram nos mercados internacional e também no brasileiro, blocos de concreto com outros formatos: (a) holandês, (b) unistein, (c) formato em i, representados na Figura 10.

Figura 10 - Formatos de blocos intertravados de concreto



Fonte: adaptado de ABCP (1999).

✓ Espessura

A espessura dos blocos é padronizada em 6,0cm, 8,0cm e 10cm, sendo que essa definida em projeto, conforme sua necessidade, usualmente realizada por meio da análise de tráfego imposto no local (SHACKEL, 1979, 1990). ABCP (1999) menciona que a relação comprimento/espessura do bloco deve ser sempre menor ou igual a 4,0.

Os blocos intertravados de concreto que possuem relação comprimento/espessura menor que 4 são apropriadas para tráfego de veículos e são utilizadas no pavimento intertravado permeável (ABCP 2011). Já o ICPI (2011), mostra que, para este uso, a relação de aspecto (comprimento/espessura) deve ser menor ou igual 3.

A norma brasileira para pavimento intertravado de peças pré-moldadas de concreto, NBR 9781 (2013), normatiza que a variação entre as dimensões das espessuras fornecidas pelo fabricante e as dimensões reais não devem ultrapassar 5,0mm.

✓ Arranjo

O arranjo de assentamento das peças deve ser previamente definido, pois é importante para o alinhamento entre o eixo das peças e o da via. O arranjo ou modelos de assentamento dos blocos intertravados influencia diretamente no intertravamento entre as peças (CRUZ, 2003).

Em condições de tráfego pesado, todos os autores pesquisados relatam que o arranjo que possui melhores níveis de desempenho em relação a deformações permanentes é o arranjo espinha de peixe, com suas vantagens se estendendo no combate dos deslocamentos horizontais, podendo citar Shackel (1990), Hallack (1998) e ABCP (1999). O arranjo espinha de peixe pode ser no formato de 45° ou

reto. Os tipos de arranjo podem ser divididos em trama, fileiras, espinha de peixe e outros Figura 11.

Figura 11 - Formas de assentamento de blocos de concreto



Fonte: adaptado de Santana (1993).

A coloração mais clara e homogênea dos blocos intertravados, em relação aos outros produtos mais escuros, reduz significativamente a absorção de calor pela superfície do pavimento, melhorando em muito o conforto térmico e diminuindo a formação das ilhas de calor nos grandes centros urbanos, tornando sua aplicação ecológica (ABCP,1999). A redução de temperatura pode chegar a 17°C.

Além do conforto térmico, o pavimento intertravado oferece a capacidade de poupar energia elétrica. Ele é capaz de aumentar a reflexão da luz devido à coloração clara dos blocos de assentamento, esse ganho é em torno de 30%, se comparado ao pavimento flexível das ruas, que é de concreto asfáltico. Em termos práticos, isso permite gerar economia de iluminação pública (MARCHIONI; SILVA, 2011).

O pavimento intertravado de concreto pode contribuir para uma maior infiltração da água da chuva. Marchioni e Silva (2011) apontam que sempre haverá um potencial de permeabilidade por meio das juntas, o atendimento da distribuição granulométrica recomendada, possibilita atingir o coeficiente de permeabilidade dos agregados na ordem de $3,5 \times 10^{-3}$ m/s, o que garante um eficaz funcionamento do sistema.

Existem vários tipos de revestimentos que podem ser considerados permeáveis, dentre eles, o revestimento poroso, seja concreto asfáltico poroso (CPA) ou concreto de cimento Portland poroso e blocos de concreto intertravados, comumente utilizados no Brasil (PINTO, 2011). De acordo com a NBR16416 (ABNT, 2015), os pavimentos de blocos intertravados permeáveis podem ser feitos basicamente com três tipos de revestimento: blocos de concreto com juntas

alargadas, blocos de concreto permeável e blocos de concreto com aberturas de drenagem ou áreas vazadas (BALBO; CARGIN; ONO, 2017).

Segundo NBR 16416 o revestimento de blocos de concreto com juntas alargadas, a percolação da água ocorre pelas juntas entre as peças de concreto (ABNT, 2015). Tratam-se de blocos de utilização comum em pavimentação que contam como auxílio de espaçadores para a criação da junta mais larga no momento da execução (VIRGILIIS, 2009).

Segundo Virgiliis (2009), outro fator importante é a colmatação, que, em zonas urbanas é função de fatores locais, como a variedade e a quantidade de material pulverulento depositado nas juntas. O tráfego também interfere na colmatação, visto que, onde existe tráfego intenso, há uma sucção provocada pela passagem de veículos, que tende a descolmatar os vazios.

Para Shackel & Candy (1988) a infiltração de água: há um senso comum de que os pavimentos intertravados tornam-se “impermeáveis” ao longo de sua utilização devido à “selagem” das juntas pela deposição de detritos, borracha e óleo. O problema maior verifica-se nos primeiros períodos após a construção. Dessa forma, recomendam-se cuidados redobrados na selagem das juntas com areia adequada, o confinamento da areia de assentamento, a utilização de peças chanfradas na face superior de modo a diminuir o efeito de sucção dos selantes das juntas pela passagem dos pneus, a construção de dispositivos de drenagem e prover ao pavimento caimento superior a 2 % (SHACKEL, 1990).

2.5.3 Desempenho estrutural do pavimento de blocos intertravados de concreto

O revestimento com blocos intertravados de concreto constitui uma versão moderna e aperfeiçoada dos antigos calçamentos de paralelepípedos. Suas homogeneidade e formas bem definidas permitem o assentamento de maneira que haja transferência de carga de um bloco aos adjacentes, o que alivia as pressões unitárias transmitidas ao subleito e à sub-base, reduzindo, assim, suas deformações. Essa característica lhe confere uma forma de trabalho muito similar à do pavimento de concreto constituído por placas, sem deixar de funcionar como pavimento semi-rígido (ABCP, 1999).

A NBR 9781 (ABNT, 2013) divide os blocos em duas classes, 35,0 MPa e 50,0 MPa, sendo a primeira, utilizada para tráfego leve, médio e pesado, enquanto

os blocos de 50,0 MPa são indicados em situações nas quais o revestimento sofre intensos carregamentos e desgastes por atrito, caso de pátios industriais e portos.

Os pavimentos de blocos intertravados distribuem as pressões verticais que recebem dos veículos devido ao intertravamento entre os diversos blocos, como será visto mais adiante na análise do desempenho desse pavimento. Não diluem as pressões verticais por sua espessura, nem às custas de grandes tensões de tração na flexão, pois são flexíveis.

A NBR 9781 (ABNT, 2013) alerta que a utilização de peças que não atingem a resistência mínima ou que estejam quebradas, comprometem a qualidade da obra, gerando perdas por abrasão, rachaduras e peças soltas.

Entre as propriedades dos blocos intertravados, destacam-se as elevadas resistências à compressão, à abrasão e à ação de agentes agressivos, proporcionando grande durabilidade ao pavimento. Devido a essas propriedades, nas vias urbanas localizadas em morros, com declividades entre 20 e 30%, os blocos de concreto têm ótimo desempenho, apresentando resistência satisfatória à erosão das águas, além de permitir drenagem natural parcial por meio das juntas das peças (ABCP, 1999).

Nas zonas de várzeas de riachos e rios, onde a drenagem superficial é deficiente e os alagamentos são constantes, esse tipo de revestimento permite a drenagem natural e parcial, sendo também resistentes às águas das chuvas acumuladas. Pelas características e propriedades dos materiais empregados (cimento Portland e agregados minerais), e pelas elevadas resistências à compressão e à abrasão obtidas, as peças pré-moldadas não sofrem a ação desagregadora pela presença da água acumulada no pavimento. A água não interfere na interface pasta de cimento e agregado, que constitui o concreto das peças (ABCP, 1999).

Em locais onde o efeito afundamento “trilha das rodas” se acentua, o pavimento de blocos se torna mais resistente às deformações plásticas devido ao intertravamento entre as suas peças, aumentado pelo abaulamento e pelo confinamento transversal. Os principais aspectos relacionados a um travamento eficiente das peças são o formato, a espessura e o arranjo dos blocos de concreto (SANTANA, 1993).

✓ Intertravamento

O assentamento dos blocos, garante o intertravamento, característica principal do pavimento Serafim (2010), que é definida como a capacidade das peças de concreto de resistir a deslocamentos individuais, sejam eles verticais, horizontais, de rotação ou giração em relação às peças adjacentes (SILVA e MARCHIONI, 2011).

As pressões verticais são absorvidas pelo intertravamento entre as peças pré-moldadas, o que significa que os blocos se articulam entre si, formando um conjunto que distribuem as pressões recebidas numa área muito maior que a de recepção, isto é, diluem as pressões verticais.

O termo articulação significa que não há transmissão de momento fletor, mas apenas de esforços cortantes, isto é, os blocos não sofrem aquela grande tensão de tração na flexão, como a desenvolvida por uma tradicional placa de concreto.

A contribuição estrutural está fortemente ligada às características de intertravamento presentes no pavimento, auxiliando na distribuição das tensões para as camadas inferiores e suportando as tensões cisalhantes causadas pelas rodas dos veículos (MACIEL, 2007).

O desempenho estrutural está ligado ao intertravamento dos blocos (ICPI, 2011). Os principais aspectos relacionados a um travamento eficiente das peças são o formato, a espessura e o arranjo dos blocos de concreto (SANTANA, 1993).

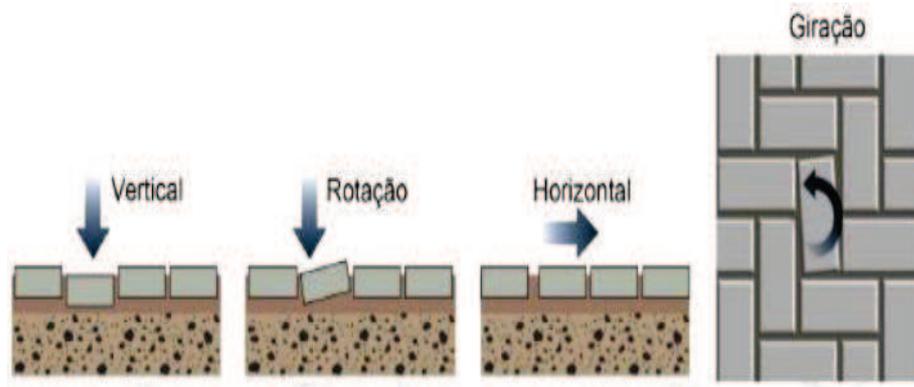
Hallack (2001), Knapton (1996), Shackel (1990) e Burack (2002) define o intertravamento dos blocos como sendo a capacidade dos blocos possuem de adquirir resistência aos movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal, de rotação ou giração em relação às peças vizinhas Figura 12 (ABCP, 1999).

Para Dias et al. (2016), intertravamento vertical Figura 12, que é a restrição das peças ao movimento vertical em relação às peças vizinhas. Esse tipo de intertravamento é obtido através dos esforços de tensão tangencial absorvidos pelo rejuntamento de areia entre as peças e a capacidade estrutural das camadas inferiores do pavimento, mediante o uso de peças especiais com formatos e encaixes reentrantes. Dessa forma, quando houver uma carga vertical sobre a peça existe um contato do tipo macho-fêmea distribuindo os esforços para as peças vizinhas. Aduz ainda Dias et al. (2016), que existe também o tipo de intertravamento vertical que independe do formato das peças. Este ocorre em função da malha de juntas formadas pelos grãos de areia bem compactados lateralmente e a

estabilidade estrutural do colchão de areia compactado e confinado. Esse fenômeno ocorre, geralmente, em função do tipo e da frequência do tráfego, especialmente em áreas de frenagem, aceleração e tensões radiais de pneus (curvas) (DIAS; MENEGASSO; QUINTEIRO; SERAFIM, 2016).

O intertravamento giratório ou rotacional Knapton (1996), Figura 12 descreve o intertravamento como a incapacidade de a peça girar em relação ao seu próprio eixo em qualquer direção. Este tipo de intertravamento é obtido por meio de uma constante espessura das juntas entre as peças e consequente confinamento oferecido pelas vizinhas (NABESHIMA; ORSOLIN; SANTOS, 2011). A rotação dos blocos de concreto ocorre geralmente nas áreas de maior frenagem, aceleração e curvas, além de regiões de confinamento duvidoso (CRUZ, 2003).

Figura 12 - Movimento dos deslocamentos dos blocos

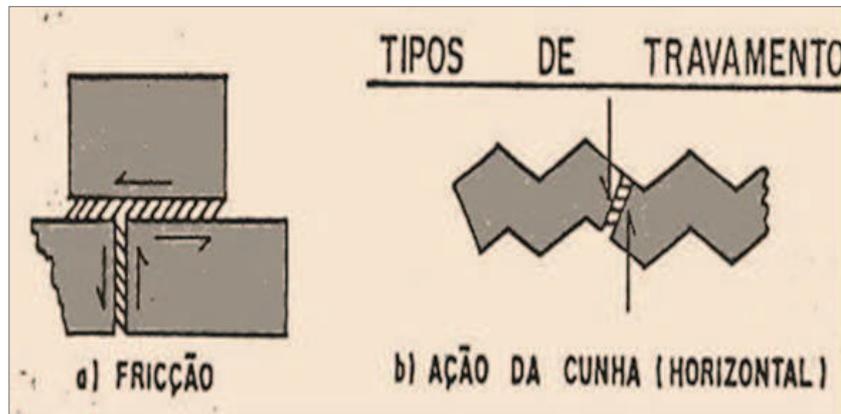


Fonte: adaptado da ABCP (1999).

O intertravamento Figura 13, por fricção Figura 13.a, considerado o essencial, existe em qualquer formato de bloco, mas é o único possível para bloco de formato retangular.

O intertravamento horizontal contribui na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal sob a atuação do tráfego, principalmente em áreas de aceleração e frenagem. Ressalte-se, ainda, que o intertravamento por efeito de horizontal Figura 13.b depende do formato do bloco. Estas características influenciam na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal sob a atuação do tráfego, principalmente nos momentos de aceleração e frenagem dos veículos.

Figura 13 - Tipos de travamento dos blocos de concreto



Fonte: Santana (1993).

Existem casos especiais em que a aplicação desse tipo de pavimento torna-se particularmente recomendada, como em locais sob os quais certamente serão instaladas redes subterrâneas de água, esgoto, telefone, etc., ou sobre aterros recentemente concluídos e ainda sujeitos a recalques acentuados. Essas aplicações são possíveis pela possibilidade de remoção, parcial ou total do pavimento de forma rápida, sem quebra ou perda de blocos e com reaproveitamento dos blocos removidos, facilitando as operações de reparo e de manutenção. Por essa razão, tal aplicação apresenta baixo custo de manutenção, cerca de 95% dos blocos podem ser reaproveitados (ABCP, 1999).

Esse pavimento pode ser liberado ao tráfego imediatamente após a conclusão, pois não necessita de nenhum período de cura como outros tipos. Pelo acabamento dos blocos proporciona boa superfície de rolamento para velocidades de até 80 km/h; lembrando que o limite de velocidade urbana é de 60 km/h (ABCP, 1999).

Os pavimentos de blocos intertravados podem apresentar problemas superficiais, que não exigem reforço estrutural, como a quebra de peças e falhas no rejuntamento (CARVALHO, 1998). Nestes casos, exige-se apenas a troca das peças e a re-execução do rejuntamento.

Na opinião de Carvalho (1998), como as peças são intertravadas, a retirada torna-se difícil, sendo às vezes necessária a quebra de algumas delas. Como vantagem, o autor apresenta a possibilidade de reaproveitamento de algumas peças, quando estas são tratadas por meio de raspagem e uso de substâncias apropriadas.

A manutenção estrutural é exigida em pavimentos intertravados quando ocorre a perda do suporte da fundação (CARVALHO, 1998). Nestes casos, além da troca e rejuntamento dos blocos, é necessária a reconstrução das camadas inferiores.

Para Muller (2005), os pavimentos de blocos possuem como vantagens a necessidade reduzida de manutenção e sua simplicidade de execução, quando comparados aos pavimentos asfálticos.

2.6 Dimensionamento do pavimento intertravado

Mesmo com a utilização crescente de pavimentos intertravados de peças de pré-moldados de concreto, os aspectos técnicos em relação ao dimensionamento não são tão difundidos como nos pavimentos de concreto asfálticos e rígidos.

Os parâmetros utilizados para obtenção das espessuras constituintes do pavimento são o número N de solicitações do eixo padrão e CBR do subleito. Todos os métodos pesquisados são voltados para um tráfego considerado leve e médio, porém a partir dos ábacos, é possível o dimensionamento de pavimentos com tráfegos mais intensos.

Um dos métodos mais utilizado para pavimentos de peças de concreto intertravado no Brasil é o Método da ABCP ET-27 (1999).

2.6.1 Método ABCP (1999) – Estudo Técnico n° 27 – Associação Brasileira de Cimento Portland

O método de dimensionamento do Eng. Marcos Dutra de Carvalho, recomendado pela Associação Brasileira de Cimento Portland, é baseado no método de A.A. Lilley e B.J. Walker, da Cement and Concrete Association da Inglaterra. Nesse método, o parâmetro representativo do subleito será o valor de CBR do material, na energia normal de compactação (CARVALHO, 1998).

O método de dimensionamento ABCP (1999) para pavimentos intertravados tem grande utilização em vias urbanas, seus parâmetros de dimensionamento são o tráfego imposto e a capacidade de suporte do subleito, sendo o eixo padrão de projeto considerado com uma carga solicitante de 10 toneladas sob a configuração de eixo simples de rodagem dupla (ESRD).

A classificação do tráfego imposto no local é realizada por meio da classificação do número (N) de solicitações do eixo padrão. Caso não seja possível a caracterização real em campo.

É recomendado que, quando o valor de CBR for inferior a 2%, seja colocada uma camada de 30 cm de reforço de subleito, com CBR no mínimo 5% superior ao do subleito. O material de sub-base também é definido pelo valor de CBR mínimo necessário, que juntamente com a espessura da camada, será em função do tráfego e das condições de suporte de subleito.

Estudos teóricos e práticos mostraram que os melhores materiais para a base são aqueles que proporcionam a formação de uma camada impermeável e de considerável resistência mecânica. Assim, uma mistura de solo-cimento e o concreto rolado é a que melhor atende a esses requisitos, pois reduz sensivelmente as pressões verticais transmitidas às camadas inferiores do pavimento.

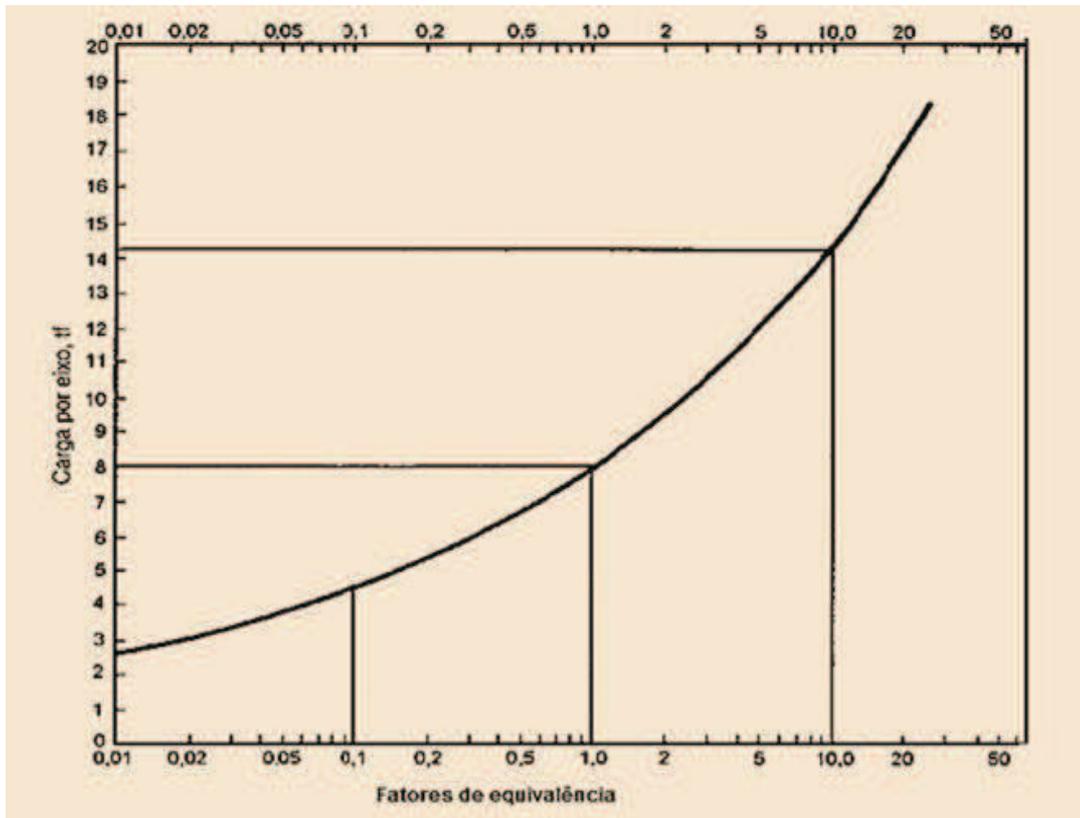
✓ 1º Gráfico

Esse método recomenda para o dimensionamento da camada, o Gráfico apresentado pela Cement and Concrete Association, baseado nos estudos feitos por Knapton (1996), que fornece a espessura necessária de solo-cimento ou de concreto rolado em função do tráfego solicitante.

O Gráfico 4 permite a possibilidade de transformar o número previsto de solicitações de uma determinada carga por eixo, no número de solicitações equivalentes de uma carga padrão de 8,2 tf por eixo simples. Também é capaz de fornecer o fator de equivalência, que multiplicado pelo número de solicitações diárias previstas para determinada carga, leva a número equivalente de solicitações diárias de carga padrão (WIEBBELING, 2015).

Na ocorrência de eixos tandem duplos ou triplos, é considerada a carga total como dividida por 2 ou 3 eixos simples.

Gráfico 4 - Efeito relativo e diversas cargas por eixo simples



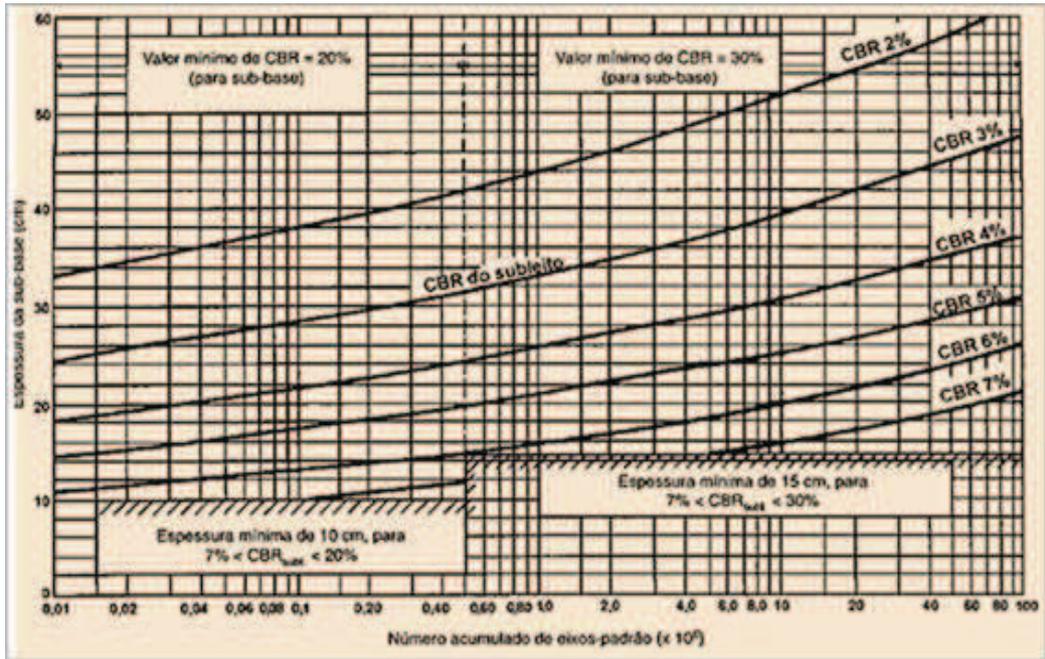
Fonte: Carvalho (1998).

✓ 2º Gráfico

O Gráfico 5 fornece as espessuras necessárias de sub-base em função do valor de CBR (CBR) do subleito e do número de solicitações do eixo padrão N .

- $N \geq 0,5 \times 10^6$ e o material de sub-base deve apresentar um CBR mínimo de 30%.
- $N < 0,5 \times 10^6$ e o material de sub-base deve apresentar um CBR mínimo de 20%.
- $N < 0,5 \times 10^6$ e o subleito apresentar um CBR igual ou superior a 20%, não é necessária a camada de sub-base.
- $N \geq 0,5 \times 10^6$ e o subleito apresentar um CBR igual ou superior a 30%, não é necessária a camada de sub-base.

Gráfico 5 - Espessura necessária de sub-base em função do eixo padrão *N*

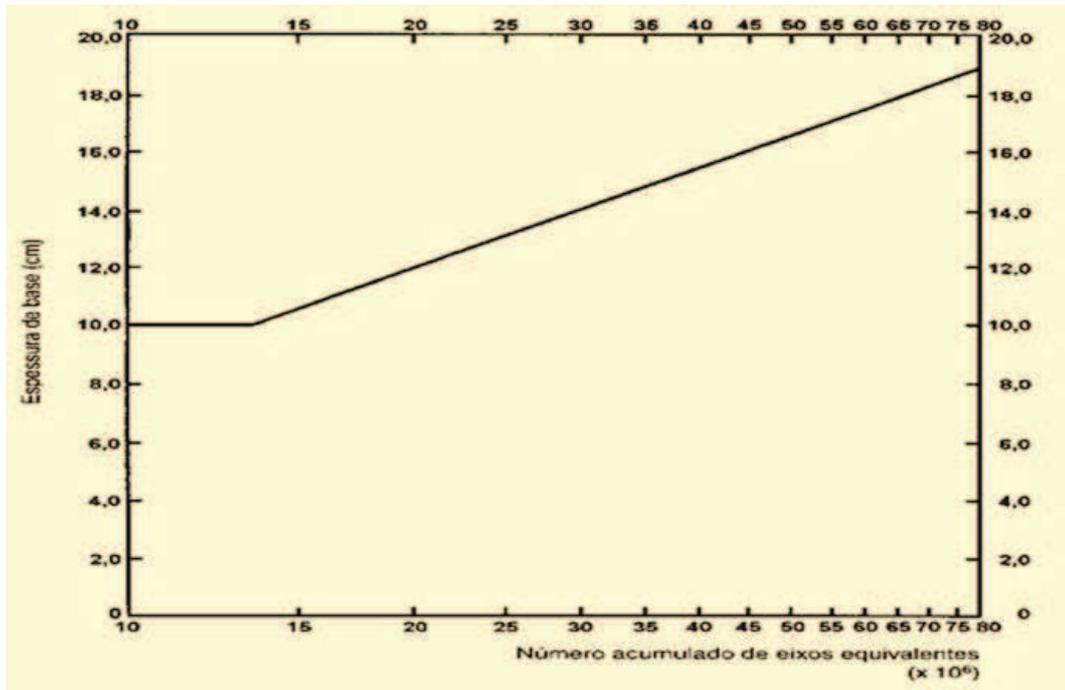


Fonte: Carvalho (1998).

✓ 3º Gráfico

A leitura do Gráfico 6 demonstra a espessura necessária de base de concreto magro ou solo-cimento, em função do número de solicitações do eixo padrão.

Gráfico 6 - Espessura necessária de base em função do eixo padrão *N*



Fonte: Carvalho (1998).

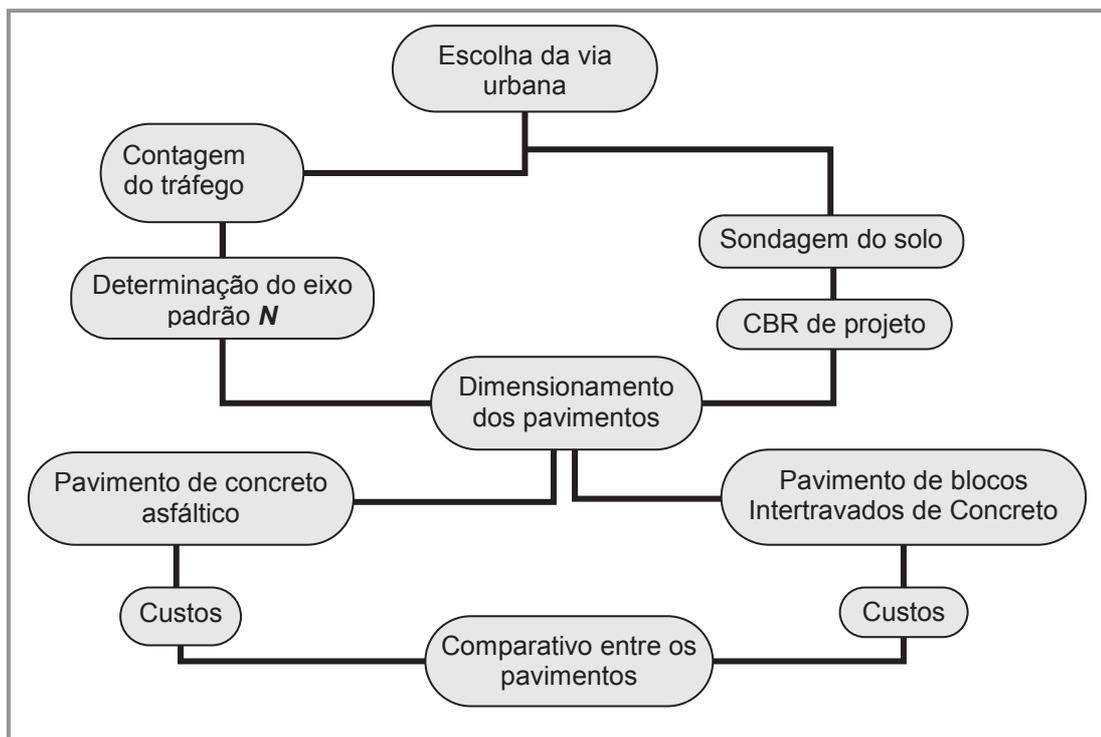
É importante observar que, quando o número de solicitações do eixo padrão N for inferior a $1,5 \times 10^6$, a camada de base não será necessária. No entanto, recomenda o método, o emprego dessa camada com a espessura mínima de 10 cm, quando o número de solicitações N estiver compreendido entre $1,5 \times 10^6$ e 10^7 .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o estudo comparativo entre os diferentes tipos de pavimentos rodoviários e para que se tenha os mesmos parâmetros de análise, se faz necessário que os materiais envolvidos no estudo estejam sob um mesmo cenário. Diante disso, escolheu-se uma via urbana localizada na cidade de Porto Alegre, localizada em zona alagadiça, com solo com baixo suporte e tráfego comercial pesado.

O fluxograma a seguir, Figura 14, demonstra as etapas para o dimensionamento dos pavimentos para posteriormente realizar o comparativo técnico e econômico.

Figura 14 - Fluxograma



Fonte: elaborado pela autora (2018).

3.1 Método do trabalho

Este trabalho compara dois pavimentos, com diferentes métodos de dimensionamento, então, é evidente que os custos dos projetos não serão os mesmos. Para atingir o objetivo proposto, serão dimensionados os pavimentos,

considerando, para efeito comparativo, técnico os seguintes fatores para os dois tipos de pavimentos:

- capacidade de suporte do subleito CBR;
- número equivalente de operações do eixo padrão *N*.

O projeto estrutural do pavimento baseia-se nos valores referentes ao número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 tf (tráfego) e nos ensaios tecnológicos realizados no subleito ao longo do trecho projetado.

Por essa razão, surge a necessidade de se determinar a capacidade de suporte do subleito nas condições naturais. A determinação da capacidade de suporte do subleito é feita pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), em corpos-de-prova moldados em laboratório nas condições de massa específica aparente seca máxima e com umidade ótima, determinadas pelo ensaio normal de compactação. Para cada furo executado no campo, deverão ser extraídas três amostras e determinados os respectivos valores de CBR, ensaios de caracterização, expansão e compactação (ABPv, 1995). O número de furos (frequência) depende do comprimento do trecho a pavimentar, em média, um furo para cada 50 metros.

Com o Eixo Padrão *N* e CBR de projeto determinados foi dimensionado o pavimento em concreto asfáltico, utilizando o Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER/DNIT (1996) e o pavimento de blocos intertravados de concreto foi desenvolvido, utilizando o Método da ABCP (1998). Foram realizados os dimensionamentos, orçando o custo de cada pavimento com base na tabela de preços da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, com a correção mensal do CUB/RS, sem oneração de Bonificação de Despesas Indiretas – BDI.

Os custos foram apurados após a determinação das espessuras das camadas e dos materiais que são, então, utilizados nos projetos de concreto asfáltico e blocos intertravados.

Orçados os custos dos pavimentos, foi efetuado o comparativo econômico entre os dois pavimentos e qual a alternativa adequada para uso na via urbana indicada.

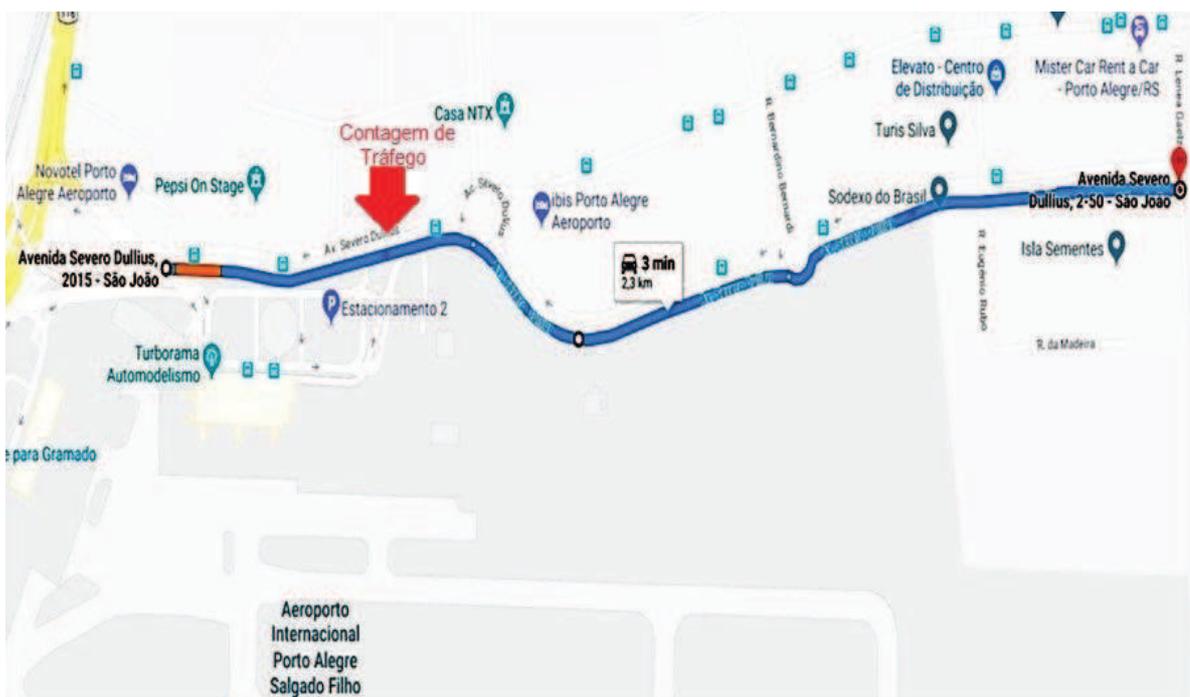
3.2 Local de estudo

Para subsidiar este estudo entre os dois pavimentos, dimensionou-se um trecho da Av. Severo Dullius, situada no Bairro São João, cidade de Porto

Alegre/RS, é considerada como uma das principais vias arteriais do plano de mobilidade urbana do município. A obra permitirá eliminar 30% do tráfego atual concentrado na Av. Sertório, com uma rápida ligação entre a região do Aeroporto Internacional Salgado Filho à Zona Nordeste de Porto Alegre e com as cidades de Cachoeirinha e Gravataí, através do franco acesso à Avenida Assis Brasil, sendo fundamental para a complementação do plano de circulação viária da região.

A via em estudo foi construída em 2001, considerada várzea do Rio Gravataí e, portanto, zona crítica pois sofre constantes alagamentos, devido a intensidade das chuvas e às dificuldades do sistema de drenagem. O trecho da Av. Severo Dullius, é integrante do plano de mobilidade urbana desenvolvido pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre, possui uma extensão de 2,3 km. O gabarito final é de 47 metros, que inclui duas pistas de 7,0 metros de largura, um canteiro central de 25 metros dois passeios de 4,00 metros. Existem duas interseções projetadas em rótula, situadas na Av. das Industrias e na Rua Bernardino Bernardi, respectivamente. As inclinações das seções transversais são de 2,5%. No canteiro central, foi projetado e construído um canal de drenagem pluvial, para captação e escoamento das águas pluviais da bacia de acumulação da área, onde está situada a Avenida Figura 15.

Figura 15 - Imagem da Av. Severo Dullius



Fonte: Google Maps (2018).

3.3 Estudo de tráfego

Segundo DNIT (2006b, p.19), o objetivo dos estudos de tráfego é obter, através de métodos sistemáticos de coleta, dados relativos aos cinco elementos fundamentais do tráfego (motorista, pedestre, veículo, via e meio ambiente) e seu inter-relacionamento. Com base nos dados obtidos nas etapas que compreendem o estudo de tráfego, torna-se possível determinar o número de veículos que circulam em uma via em certo espaço de tempo, bem como prever o aumento deste fluxo para que o projeto atenda às necessidades futuras da via.

O tráfego rodoviário é composto por veículos que apresentam diversas configurações de eixos com relevantes diferenças de magnitude de cargas, os veículos comerciais (caminhões e ônibus) são aqueles que efetivamente interessam para situações de dimensionamento e análise de pavimentos, tendo em vista que os veículos leves causam danos insignificantes às estruturas se comparados aos demais (BALBO, 2007).

À média dos volumes de veículos que circulam durante 24 horas em um trecho de via é dada a designação de “Volume Médio Diário” (VMD). Ele é computado para um período de tempo representativo, o qual, salvo indicação em contrário, é de um ano (DNIT, 2006b).

A quantificação dos volumes de veículos na via é realizada com as contagens em campo. Segundo Manual de Estudo de Tráfego do DNIT as contagens classificatórias e volumétricas são realizadas em períodos:

- a) Volume Médio Diário Anual: número total de veículos trafegando em um ano dividido por 365.
- b) Volume Médio Diário Mensal: número total de veículos trafegando em um mês dividido pelo número de dias do mês. É sempre acompanhado pelo nome do mês a que se refere.
- c) Volume Médio Diário Semanal: número total de veículos trafegando em uma semana dividido por 7. É sempre acompanhado pelo nome do mês a que se refere. É utilizado como uma amostra do.
- d) Volume Médio Diário em um Dia de Semana: número total de veículos trafegando em um dia de semana (DNIT, 2006b).

Utilizando-se equipamentos automatizados instalados em pista ou por meio de levantamento visuais em campo.

O levantamento visual, com equipes de campo são realizados em período sequencias de uma hora, o que permite a verificação de flutuações horárias ocorridas no volume de tráfego. As variações sazonais devem estar bem caracterizadas nos estudos de tráfego, o que pode ser feito pelo uso de fatores de expansão (horários, diários, semanais ou mensais) (BALBO, 2007).

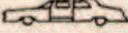
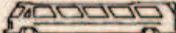
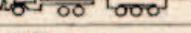
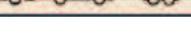
O Volume de Tráfego (ou Fluxo de Tráfego) como o número de veículos que passam por uma seção de uma via, ou de uma determinada faixa, durante uma unidade de tempo. É expresso normalmente em veículos/dia (vd) ou veículos/hora (vh) (DNIT, 2006b).

Os fatores de expansão podem ser obtidos por meio de series históricas, quando conhecidas ou por método indireto.

✓ Cargas sobre o pavimento

As cargas transmitidas ao pavimento pelos veículos são regulamentadas por lei, em cada país. No Brasil, como na maioria dos países, a carga máxima por eixo simples é de 10 toneladas, Figura 16 (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Figura 16 - Terminologia dos veículos

Classe	Símbolo	Configuração	Descrição
1			Automóvel
2	2c		Ônibus
3			Utilitário
4	2c		Caminhão
5	3c		Caminhão
6	2s1		Semi-reboque
7	2s2		Semi-reboque
8	2s3		Semi-reboque
9	3s2		Semi-reboque
10	3s3		Semi-reboque
11	2c2		Reboque
12	4c		Caminhão
13	2c3		Reboque

Fonte: Adaptado do DNIT (2006b).

3.3.1 Numero de N

Para Pinto e Preussler (2002, p. 164), o número equivalente N , necessário ao dimensionamento de uma rodovia, é definido pelo número de repetições equivalentes de um eixo-padrão de 8,2 tf, durante o período de vida útil do projeto.

Considerando que, no trecho estudado, não havia tráfego, utilizou-se fluxo de trânsito mais próximo. Para contagem de tráfego foi apurado o número total de veículos que trafegaram em uma semana no trecho, desta contagem obteve-se a média dos veículos diários trafegados que originou o Anexo 1.

A contagem de tráfego de veículos foi realizada pela Administração Pública Estadual/DAER, durante a execução do projeto do Complexo Viário implantado no entroncamento da compilação da Av. Severo Dullius com a BR 602, apontado na Figura 15.

A Tabela 6 demonstra a contagem e a classificação de veículos de acordo com a Figura 16 para o tráfego para a Av. Severo Dullius.

Tabela 6 - Média do tráfego total de veículos passantes em uma semana na Av. Severo Dullius

Veículos Leve	Veículos Médio	Veículos Pesado	Reboque	Ônibus	Total
3.294	336	232	336	103	4.301

Fonte: elaborada pela autora (2018).

Segundo DINT, 2006 a corrente de tráfego é composta por veículos que diferem entre si quanto ao tamanho, peso e velocidade. O conhecimento da composição dos volumes é essencial pelas seguintes razões:

- a) os efeitos que exercem os veículos entre si dependem de suas características. A composição da corrente de veículos que passa por uma via influi em sua capacidade;
- b) as percentagens de veículos de grandes dimensões determinam as características geométricas que devem ter as vias, e os seus pesos as características estruturais;
- c) os recursos que podem ser obtidos dos usuários de uma via, dependem entre outros fatores, da composição do seu tráfego.

Diante dos resultados, apresenta-se o total de veículos que circulam na Av. Severo Dullius em percentual (%). Observa-se que os veículos leves para fins de cálculo não influenciam no tráfego comercial, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Percentual dos veículos passantes (tráfego total) da Av. Severo Dullius

Tipo veículos	% por veículos	%
Carros e caminhões leves	76,60	76,60
Caminhões médios e ônibus	10,19	
Caminhões pesados	5,40	23,40
Reboques e semi-reboques	7,81	
Total	100,00	100,00

Fonte: elaborada pela autora (2018).

Na metodologia indicada pelo DNER (1996), consideram-se os caminhões e os ônibus e reboques e semi-reboques (veículos comerciais), como sendo os únicos veículos existentes na corrente de tráfego. O que se justifica pelo fato de que os automóveis apresentam um efeito muito pequeno em função de seu peso muito baixo.

Com a exclusão dos veículos leves, o total de veículos é igual a 1007 veículos comerciais. Logo a redistribuição do tráfego comercial, apresenta o seguinte percentual (%), Tabela 8.

Tabela 8 - Redistribuição do tráfego comercial em percentual da Av. Severo Dullius

Tipos de veículos	%
Caminhões médios e ônibus	43,59
Caminhões pesados	23,04
Reboques e semi-reboques	33,37
Total	100,00

Fonte: elaborada pela autora (2018).

O volume de tráfego comercial diário inicial, será o número total de veículos passantes multiplicado pelo percentual de comerciais, Tabela 8, corresponderá ao seguinte valor:

$$V_0 = \frac{V_t \times 100\% \text{comerciais}}{100} \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$V_0 = \frac{4.301 \times 23,40}{100}$$

$$V_0 = 1.006 \text{ veículos comerciais/dia}$$

Adotando-se 50% do trânsito em cada faixa de rolamento, resulta para o volume de tráfego comercial diário inicial:

$$V_0 = 0,50 \times 1.006 = \mathbf{503 \text{ veículos comerciais/dia}}$$

Para o cálculo de volume total de tráfego comercial foi considerada uma taxa de crescimento de 5% ao ano, para o período de projeto de 10 anos. O volume médio diário será calculado pela equação 3.2.

$$V_{md} = \frac{V_0 [2 + (P \times t / 100)]}{2} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Em que

V_{md} = volume médio diário;

V_0 = volume de tráfego diário inicial = 503 veículos;

t = taxa de crescimento = 5% (DNER, 1996);

P = período de projeto = 10 anos.

$$V_{md} = \frac{503 [2 + (10 \times 5 / 100)]}{2} = 629 \text{ veículos}$$

Portanto, para um período de projeto de 10 anos, o volume total do tráfego comercial será fornecido pela equação 3.3.

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

V_t = volume de tráfego comercial total;

P = período do projeto = 10 anos;

V_m = volume de tráfego comercial médio diário = 629 veículos.

$$V_t = 365 \times 10 \times 629 = \mathbf{2.295.850 \text{ veículos}}$$

Ressalta-se que a determinação dos volumes de tráfego deve ser baseada em contagens volumétricas classificatórias realizadas no trecho em análise. A

contagem de veículos e a utilização de fatores de expansão permitem a definição do perfil de tráfego ao longo de um ano inteiro, o que servirá de base para o projeto de tráfego para qualquer ano no horizonte de projeto.

O número equivalente de operações do eixo padrão é determinado por meio da aplicação da equação 3.4.

$$N = FR \times FV \times V_t \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

FR = fator climático regional = 1,4 (DNER, 1996);

FV = fator de veículo = $FE \times FC$;

FE = fator de eixo;

FC = fator de carga;

V_t = volume total de veículos.

Cálculo do número equivalente de operações do eixo padrão N) para o período de projeto de 10 anos.

Os fatores de carga do tráfego comercial são determinados pela Tabela 9.

Tabela 9 - Cálculo dos fatores de carga

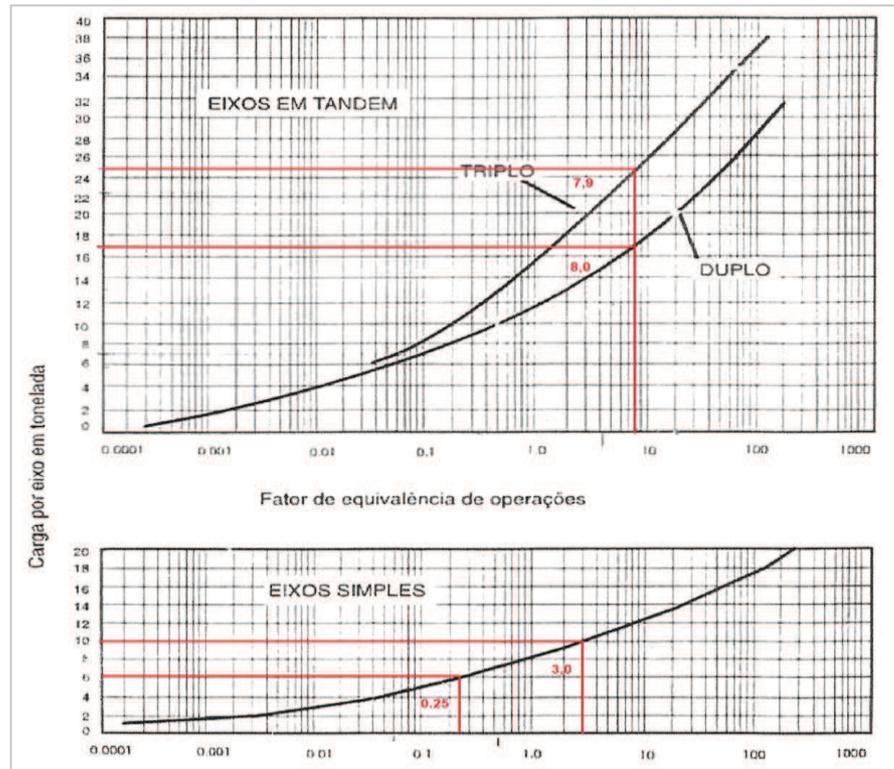
Tipo de Eixo	Peso Máximo Admissível	Número de Eixos	%	Fator de Equivalência	Equivalência
Simple (Roda Simple)	6t	629	42,8	0,25	157,25
Simple (Roda Dupla)	10t	419	28,6	3	1.257,00
Tandem Duplo	17t	210	14,3	8	1.680,00
Tandem Triplo	25,5t	210	14,3	7,9	1.659,00
Total	-	1.468	100	-	4.753,25

Fonte: adaptado do DNER (1996).

Observação: o número de eixos é obtido considerando para cada tipo de eixo o número de veículos comerciais atuantes. O fator de equivalência ao eixo padrão de 8,2 tf para cada eixo comercial, é obtido através do método do DNER (1996). O fator de carga

Os fatores de equivalência por carga foram apurados no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Fator de equivalência de carga: ESRS, ESRD, ETD e ETT



Fonte: DNIT (2006b).

✓ Cálculo do fator de eixo e de carga.

Número de veículos: $V_m = 629$ veículos;

$$\text{Fator de eixo: } FE = \frac{\text{soma de n}^\circ \text{ de eixos}}{V_m} = \frac{1.468}{629} = 2,334$$

$$\text{Fator de carga: } FC = \frac{\text{soma dos FC por eixo}}{\text{soma do n}^\circ \text{ de eixos}} = \frac{4.753,25}{1.468} = 3,24$$

Para o cálculo de N, considera-se a equação 3.3 e o valores obtidos na tabela 8, tem-se:

$$N = 1,4 \times 2,334 \times 3,24 \times 2.295.850 = 2,43 \times 10^7$$

A Figura 17 ilustra o tráfego comercial como predominante na Av. Severo Dullius, onde se observam veículos de carga pesadas.

Figura 17 - Av. Severo Dullius, tráfego comercial atuante



Fonte: registrada pela autora (2018).

3.4 Capacidade de suporte do subleito (ensaio de ISC)

Para Silva (2016) o conhecimento das características do solo é relevante, pois este basicamente terá função de fundação do pavimento, características estas que são: textura ou granulometria, teor de umidade, densidade máxima, teor de umidade ótimo, índice de suporte, limite de plasticidade e limite de liquidez.

Solo é o produto resultante da decomposição da crosta terrestre e seus principais fatores de formação são (BAPTISTA, 1978):

- Matéria de origem, ou rocha mãe;
- Água;
- Topografia do local;
- Clima do local;
- Organismos vivos.

Segundo Senço (2007), solo é uma estrutura natural, de natureza solta e removível e de espessura variável, resultante da transformação de uma rocha mãe, pela influência de diversos processos físicos, físico-químicos e biológicos.

LIRA (2013), ainda destaca que os conhecimentos geológicos da região onde as obras da Engenharia Civil irão ser construídas devem ser levados em consideração para que estas obras alcancem viabilidade técnica e econômica.

Conforme mapa pedológico do município de Porto Alegre Anexo B, a região onde está localizada a Avenida Severo Dullius é composta pela associação dos solos: Gleissolos e Planossolos e tipos de terreno. Os Gleissolos são solos minerais formados em condições de saturação com água, presentes principalmente em planícies ou várzeas inundáveis. Sua textura, variável de arenosa à argilosa. As limitações mais comuns dos Gleissolos são sua elevada frequência de inundações e o longo período de solo saturado por água, consequência de cheias dos cursos d'água ou da elevação do lençol freático. E os Planossolos são geralmente, pouco profundos, com horizonte superficial de cores claras e textura arenosa ou média (leve), de textura média, argilosa ou muito argilosa, adensado, pouco permeável, com cores de redução, decorrente de drenagem imperfeita, e responsável pela formação de lençol suspenso temporário (EMBRAPA, 2009).

De acordo com CAPECHE (2008), esses tipos de estruturas estão relacionados à presença de argila de alta atividade que se contraem e expandem de maneira mais acentuada por efeito dos alternados ciclos de secagem e umedecimento do solo.

Para CAPUTO (1988), os problemas que se observam nos projetos e execução das fundações e obras de terra se relacionam, principalmente, com os referentes à deformação do solo e a ruptura de uma massa de solo. O primeiro abrange o estudo do recalque da obra, enquanto o segundo envolve as questões referentes à capacidade de carga do solo, estabilidade dos maciços terrosos e empuxo da terra.

Para desenvolvimento do estudo foram realizadas análises físicas dos solos existentes na via. A determinação da capacidade de suporte do subleito é feita através do índice de Suporte Califórnia (ISC), em corpos-de-prova moldados em laboratório nas condições de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, determinadas pelo ensaio normal de compactação. Para cada furo executado no campo deverão ser extraídas três amostras e determinados os respectivos valores de ISC, ensaios de caracterização, expansão e compactação (ABPv, 1995). O número de furos depende da extensão do trecho a pavimentar, em média um furo a cada 50 metros.

Foram distribuídos 46 furos de sondagens ao longo da Av. Severo Dullius, utilizando-se pá ou trado, até uma profundidade de 1,5 m, com a verificação dos horizontes, identificação visual dos materiais, definição das espessuras das camadas e coleta de amostras para a realização de ensaios de caracterização dos materiais, moldagens, ensaios de compactação e determinação do CBR dos materiais do subleito, conforme constam nas fichas de sondagens (Anexos A, B e C).

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi determinado pelo tratamento estatístico dos valores de ISC do subleito. Inicialmente, foram desconsideradas as amostras com CBR maior do que 20% e expansão superior a 2%, que resultam, respectivamente, de solos não locais (aterros) e solos argilo-siltosos muito expansivos em presença de água (DNER, 1996).

As amostras não coletadas coincidiram com restos de concreto, banhado, ou pavimentos existentes. Os valores da expansão das amostras consideradas, são ≤ 2 %.

As amostras incluídas e as desconsideradas são as constantes da Tabela 10.

Tabela 10 - Amostra dos CBR do subleito

(Continua)

Furos	Estaca	CBR	Expansão	Obs.
1	5+00	21	0,8	Desconsiderada
2	10+00	19	4	Desconsiderada
3	15+00	24	0,5	Desconsiderada
4	20+00	38	0,2	Desconsiderada
5	25+00	27	0	Desconsiderada
6	30+00	20	0,3	Desconsiderada
7	38+10	15	0,4	Considerada
8	43+10	6	1,9	Considerada
9	48+10	58	0	Desconsiderada
10	53+10	-	-	Não coletada
11	58 + 10	18	0	Considerada
12	63 + 10	10	0,2	Considerada
13	68 + 10	-	-	Não coletada
14	73 +10	13	0,4	Considerada
15	78 +10	23	4	Desconsiderada
16	83 + 10	1	6,1	Desconsiderada
17	88 +10	10	4	Desconsiderada
18	93 +10	13	0,5	Considerada
19	98 +10	43	0	Desconsiderada

(Conclusão)

Furos	Estaca	CBR	Expansão	Obs.
20	103 +10	18	4,2	Desconsiderada
21	108 +10	-	-	Não coletada
22	113 +10	1	5	Desconsiderada
23	118 +10	16	0	Considerada
24	0 + 00	-	-	Não coletada
25	10 +00	7	1,7	Considerada
26	15 + 00	6	1,6	Considerada
27	20 +00	5	0,2	Considerada
28	25 + 00	8	0,3	Considerada
29	30 +00	6	0,4	Considerada
30	36 +00	12	0,9	Considerada
31	41 +00	14	0,3	Considerada
32	46 +00	9	0,8	Considerada
33	51 +00	-	-	Não coletada
34	56 +10	52	0,1	Desconsiderada
35	61 +10	23	0,2	Desconsiderada
36	66 +10	-	-	Não coletada
37	71 +10	24	0,1	Desconsiderada
38	76 +10	22	0,3	Desconsiderada
39	81 +10	7	0,3	Considerada
40	86 +10	5	1	Considerada
41	91 +10	8	1	Considerada
42	96 +10	6	0,4	Considerada
43	101 +10	26	0,2	Desconsiderada
44	106 +10	8	0,1	Considerada
45	111 +10	6	0,7	Considerada
46	116 +10	5	0,4	Considerada

Fonte: elaborada pela autora (2018).

A partir das amostras consideradas, determinou-se o intervalo de pesquisas por meio da Equação 3.5

$$ISC = \overline{ISC} \pm \left[\frac{1,29 S}{\sqrt{n}} + 0,68s \right] \quad (\text{Equação 3.5})$$

Em que:

 ISC =intervalo de pesquisa; \overline{ISC} =média aritmética dos valores de ISC.

$$\overline{ISC} = 8,87$$

$s = \text{desvio padrão} = 4,27$

$n = \text{número de amostras} = 23$

O intervalo definido foi:

$ISC_{\text{min.}} = 4 \%$

$ISC_{\text{máx.}} = 13 \%$

Eliminando os valores extremos e com o intervalo definitivo, calculou-se o CBR final, por meio da Equação 3.6.

$$ISC = \overline{ISC} - \frac{1,29s}{\sqrt{n}} \quad (\text{Equação 3.6})$$

$$ISC = 7\%$$

As exigências para os materiais de reforço do subleito e base estabilizada, são as seguintes:

- Para reforço do subleito: características geotécnicas superiores ao do subleito, demonstradas pelos ensaios de I.S.C, e de caracterização (Granulometria, LL., LP);
- Para sub-base granulometricamente estabilizadas: $ISC \geq 20$ e Índice do Grupo $IG=0$ para qualquer tipo de tráfego;

Para base estabilizada granulometricamente:

- Limite de Liquidez máxima: 25%;
- Índice de Plasticidade máximo: 6%;
- Equivalente de Areia mínimo: 30% (DNIT, 2006a).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se os resultados e as discussões da análise comparativa econômica entre o pavimento de concreto asfáltico e o pavimento de blocos intertravados de concreto, considerando as condições da Av. Severo Dullius.

Os projetos estruturais dos referidos pavimentos serão desenvolvidos a partir dos valores referentes ao tráfego comercial atuante e dos ensaios tecnológicos realizados no subleito (ensaio de ISC), ao longo do trecho projetado, considerando-se os métodos de dimensionamento recomendados.

4.1 Dimensionamentos dos pavimentos

4.1.1 Cálculo da estrutura do pavimento concreto asfáltico

O pavimento, com revestimento em concreto asfáltico, foi dimensionado pelo Método do DNER (1996). Em função do número de repetições de eixo padrão adotado anteriormente ($N = 2,43 \times 10^7$), e para um período de projeto de 10 anos e considerando-se o valor do ISC= 7 %, foi possível determinar as espessuras das camadas que compõe o pavimento.

A primeira camada a ser dimensionada é o revestimento. Em função do número de repetições de eixo padrão adotado anteriormente ($N = 2,43 \times 10^7$), foi possível determinar a espessura e o tipo de revestimento a ser adotado. Conforme a Tabela 11 obteve-se uma espessura de 10 cm de revestimento em concreto betuminoso usinado a quente.

Tabela 11 - Espessuras mínimas dos revestimentos asfálticos em função do N

N	Espessuras mínimas
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos asfálticos com 5 cm
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Revestimentos asfálticos com 7,5 cm
$\rightarrow 10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Revestimentos asfálticos com 10,0 cm
$N > 5 \times 10^7$	Revestimentos asfálticos com 12,5 cm

Fonte: adaptado do método do DNER (1996).

Logo após a definição da espessura da camada de revestimento, pode se chegar a espessura de cada camada constituinte do pavimento, por meio dos gráficos e a resolução das equações apresentadas abaixo. Segue o descritivo de cálculo realizado para dimensionamento das demais restantes camadas do pavimento flexível.

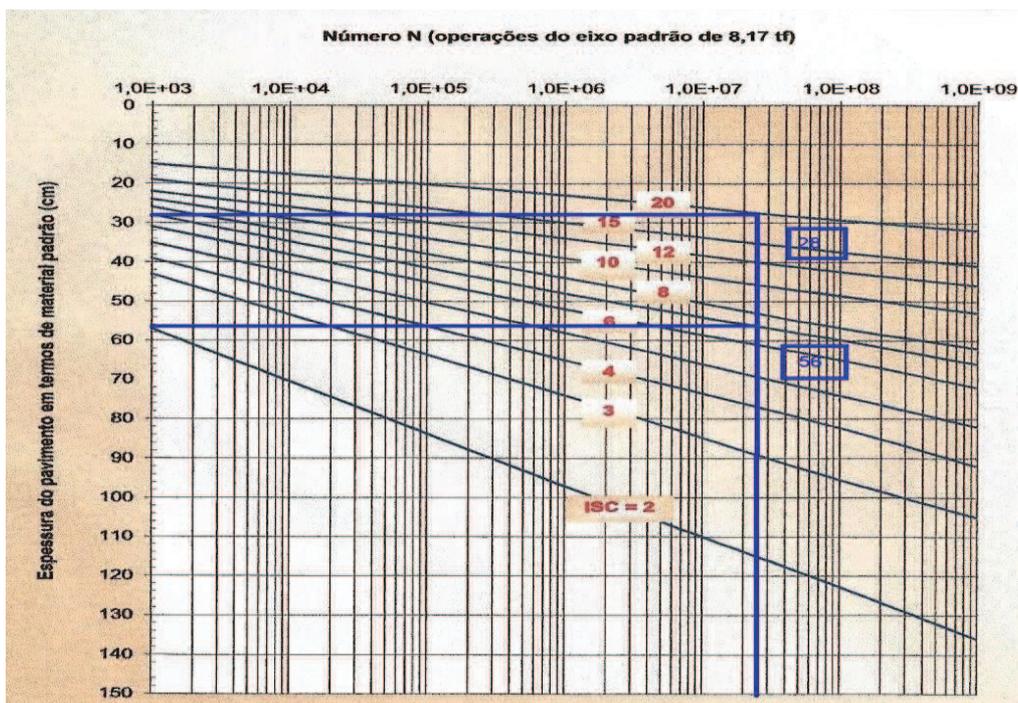
De acordo com as recomendações do Manual de Pavimentação do DNIT (2006a), independentemente do valor do CBR ou ISC da sub-base, a espessura do revestimento necessária para protegê-la é determinada como se esse valor fosse 20%, e para o caso de alto volume de tráfego, o CBR da camada de base deve ser superior ou igual a 80%. Por essa razão, usam-se sempre os símbolos H_{20} e h_{20} , para designar a espessura do revestimento sobre a sub-base e a própria espessura da sub-base, respectivamente. Assim, essas espessuras são responsáveis pela proteção dessas camadas contra deformações cisalhantes excessivas.

O ábaco Gráfico 8 permite a determinação dessas espessuras, que estão em função do CBR da camada subjacente e do número N .

Entrando no Gráfico 8 determina-se:

- $N = 2,43 \times 10^7$ e para ISC = 20%, tem-se $H_{20} = 28$ cm;
- $N = 2,43 \times 10^7$ e para ISC = 7 % tem-se $H_n = 56$ cm.

Gráfico 8 - Determinação das espessuras H_{20} e H_n



Fonte: DNER (1996).

Após este cálculo preliminar, devem ser calculadas de fato as espessuras das camadas que formarão o pavimento. No qual devem estar contemplados as características de resistência pertinentes a cada tipo de camada, fator este que é denominado coeficiente de equivalência estrutural – k . Conforme Senço (1997) e o DNIT (2006), abaixo é mostrada Tabela 12 com os seguintes valores de coeficiente de equivalência estrutural.

Tabela 12 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais

Tipo de Material	Coeficiente (K)
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio de graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Base Granulares	1,0
Sub-base granulares	0,77 (1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Base Solo-Cimento ou BGTC com resistência à compressão aos 7 dias superior a 4,5 MPa	1,7
Base de BGTC com resistência à compressão aos 7 dias entre 2,8 a 4,5 Mpa	1,4
Base Solo-Cimento com resistência à compressão aos 7 dias entre 2,8 a 4,5 MPa	1,2
Base de Solo melhorado com Cimento, com resistência à compressão aos 7 dias, menor que 2,1 MPa	1,0

Fonte: adaptado do método do DNIT (2006a).

Portanto, os coeficientes estruturais adotados nos dimensionamentos, pelo Método do DNER, foram os seguintes:

Revestimento Concreto Betuminoso $\rightarrow K_R = 2,00$

Base Granular $\rightarrow K_B = 1,00$

Sub-base Granular $\rightarrow K_S = 1,00$

As espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução das seguintes equações 4.1 e 4.2, que levam em consideração os coeficientes de equivalência estrutural apresentados anteriormente.

- Cálculo da espessura camada de Base (B)

$$R_{KR} + B_{KB} \geq H_{20} \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$10 \times 2 + B \times 1,0 \geq 28 \text{ cm}$$

$$B \geq 8 \text{ cm}$$

De acordo com as orientações do DNER (1996) a espessura mínima construtiva para as camadas granulares é de 15 cm, porém o caderno de encargos da Prefeitura Municipal de Porto Alegre- PMPA (2011) determina espessura mínima de 20 cm. Diante ao exposto adotou-se a espessura de base 20 cm.

$$B_{adotado} \geq 20 \text{ cm}$$

- Cálculo da camada da sub-base (h_{20})

Diante dos valores da equação 4.2, tem-se:

$$R_{KB} + B_{KB} + h_{20}K_s \geq H_n \quad (\text{Equação 4.2})$$

$$10 \times 2 + 20 \times 1,0 + h_{20} \times 1,0 \geq 56 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 16 \text{ cm}$$

$$h_{20adotado} \geq 20 \text{ cm}$$

Em função das precárias condições do subleito, com aterros heterogêneos de solos moles saturados de baixo poder de suporte e presença de lençol freático elevado sem condições de rebaixamento, tornou-se necessário uma camada de reforço de subleito.

Bernucci, Motta, Ceratti e Soares (2007, p.358), afirmam que:

Em subleitos de baixa capacidade de suporte, emprega-se largamente o “rachão”, material granular de grandes dimensões, denominado “pedras-de-mão”, que, por cravamento e posterior intertravamento, reduz significativamente as deformações permanentes e auxilia na construção das demais camadas subseqüentes por oferecer um aumento substancial de suporte.

Adotou-se a brita rachão de 60 cm para aumentar a capacidade de suporte do subleito, adicionada a sub-base $h_{20} = 20$ cm, teremos o total de 80 cm.

Para a execução da camada do reforço de subleito, foi necessária a remoção de igual espessura do material de subleito. Essa espessura do reforço de subleito, com emprego de brita rachão, evita que as camadas superiores sejam atingidas pelas águas, por contato direto ou pela ação da capilaridade, e forma uma estrutura de suporte para os equipamentos, durante a construção do pavimento. Além disso, o emprego de material inerte (brita) evita a ação da água, na alteração da resistência mecânica do material de reforço (ISC). O método do DNER (1996) prevê a remoção de solos com baixo poder de suporte e com expansão maior do que 2 %, e a execução de reforço com ISC maior que o do subleito.

A Figura 18 demonstra as espessuras obtidas no dimensionamento em concreto asfáltico.

Figura 18 - Estrutura do pavimento em concreto asfáltico da Av. Severo Dullius



Fonte: elaborada pela autora (2018).

4.1.2 Cálculo da estrutura do pavimento em bloco intertravado de concreto

Considerando os dados obtidos para a Av. Severo Dullius, do Índice de Suporte Califórnia (ISC) obtido e número de operações do eixo padrão (N), para o período de projeto de 10 anos, determinou-se a estrutura do pavimento em blocos de concreto, empregando-se o Método de dimensionamento da ABCP, baseado no método de A.A. Lilley e B.J. Walker da Cement and Concrete Association – Inglaterra (CARVALHO, 1998).

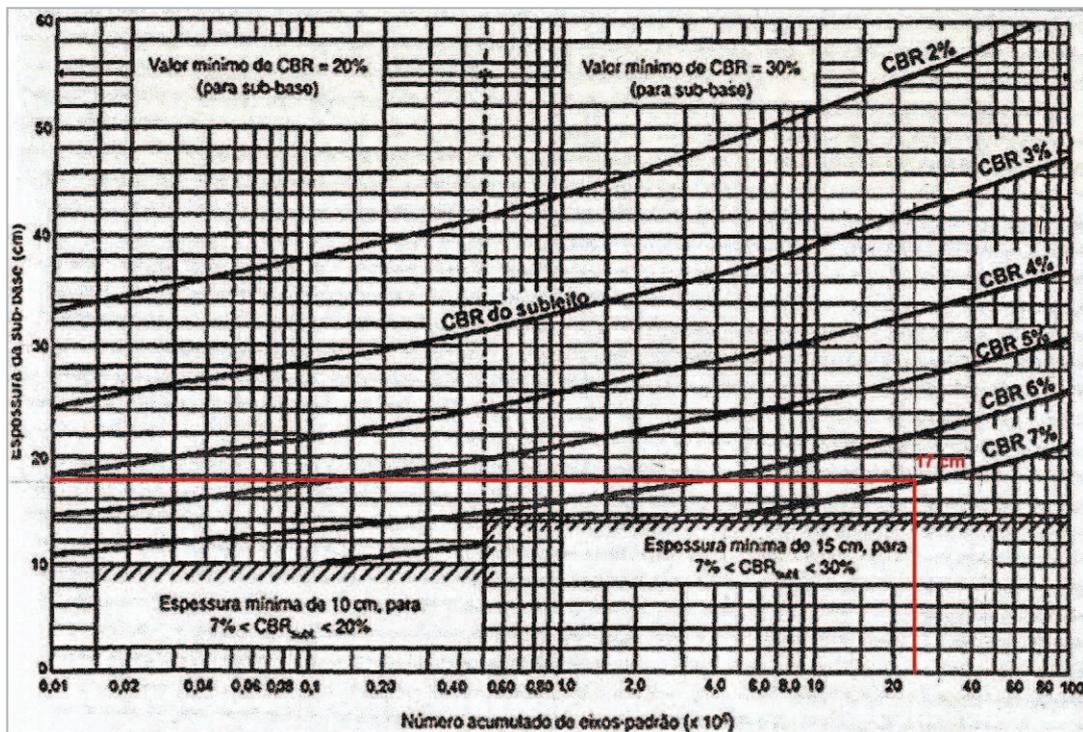
O método utiliza-se, basicamente, de dois gráficos de leitura direta, fornecendo as espessuras necessárias das camadas constituintes do pavimento de blocos intertravados de concreto.

Para esse método, o parâmetro representativo do subleito é o valor do ISC do material, na energia normal de compactação. O material do reforço de subleito é definido pelo valor do CBR mínimo necessário, que, juntamente com a espessura da camada, será em função do tráfego e das condições de suporte do subleito.

a) Cálculo da espessura da camada de sub-base.

Considerando o Gráfico 9, o valor do número de operação equivalente do eixo padrão determinado no estudo do tráfego, $N = 2,43 \times 10^7$, e o valor do ISC do subleito 7 %, determina-se a espessura de 17 cm para a camada de sub-base. Conforme recomendações do método (Gráfico 9), utilizou-se rachão como material para sub-base com diâmetro máximo de 10 cm.

Gráfico 9 - Espessura da camada sub-base



Fonte: Carvalho (1998).

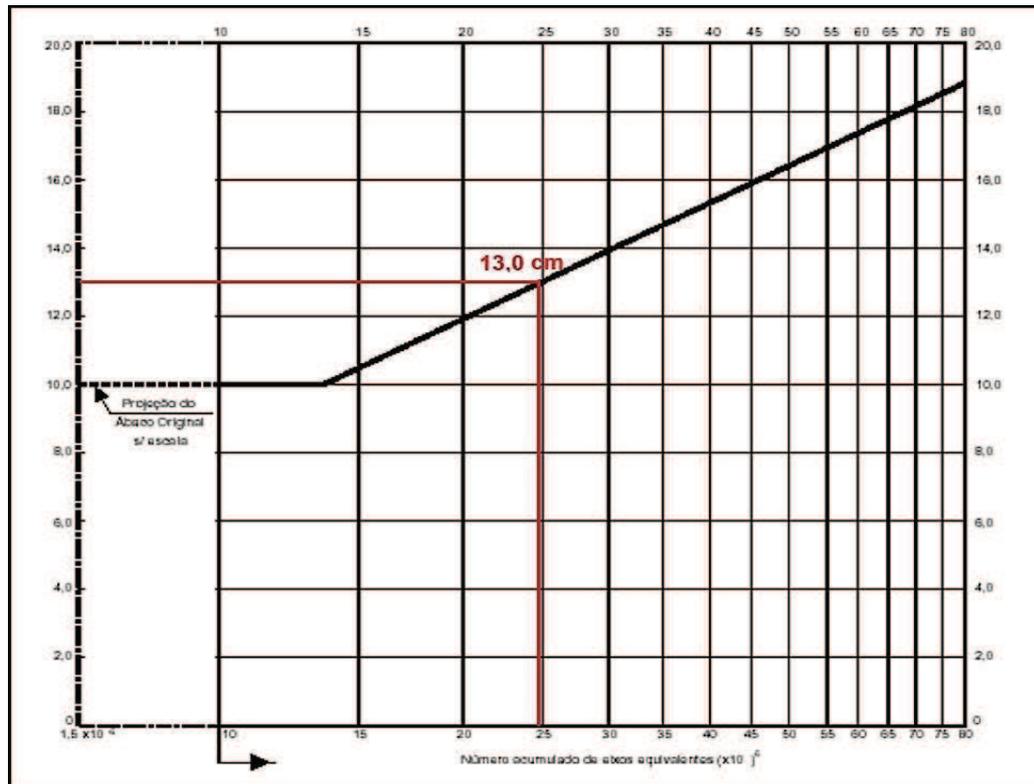
Conforme recomendações do método (Gráfico 9), utilizou-se rachão como material para sub-base com diâmetro máximo de 10 cm.

b) Cálculo da espessura da camada de base.

No Gráfico 10, ao observar-se o valor do número de operação do eixo padrão, $N = 2,43 \times 10^7$, encontra-se a espessura de 13 cm para a base do pavimento.

De acordo com o método, o material a empregar é o concreto magro ou solo-cimento. Por razões econômicas, optou-se pelo emprego de brita graduada com diâmetro máximo de 2", de acordo com caderno de encargos da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA, 2011).

Gráfico 10 - Espessura da camada de base



Fonte: Carvalho (1998).

A espessura da camada de base de brita graduada, considerando os coeficientes de equivalência estrutural do solo-cimento e da brita graduada $K= 1,4$, passa a ser de 19 cm.

Pelas mesmas razões apontadas anteriormente no dimensionamento do pavimento de concreto asfáltico e pelas condições precárias do subleito foi adotada uma camada complementar de reforço do subleito com brita rachão de 63 cm, adicionando a sub-base de 17 cm, resultando a espessura total de 80 cm, para a sub-base mais o reforço de subleito com rachão.

c) Espessura do bloco intertravado

Adotou-se a espessura de 10 cm para o bloco pré-moldado de concreto para o revestimento, face às recomendações da NBR 9781 (ABNT, 2013) Tabela 13, em função das características do tráfego pesado atuante na Av. Severo Dullius, com uma camada de assentamento de areia média de 5 cm, totalizando para o revestimento a espessura de 15 cm.

Tabela 13 - Espessura e resistência dos blocos de revestimento

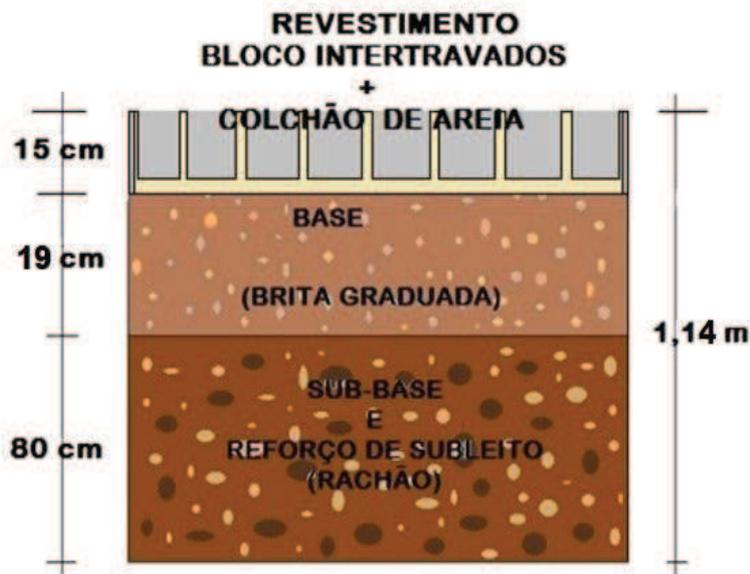
Tráfego	Espessura do Revestimento	Resistencia a compressão Simples
$N \leq 5 \times 10^5$	6 cm	35 MPa
$5 \times 10^5 < N < 10^7$	8 cm	35 a 50 MPa
$N > 10^7$	10 cm	50 MPa

Fonte: Carvalho (1998).

Utilizou-se o bloco de concreto pré-moldado tipo Unistein e a disposição das peças na formação “espinha de peixe”, que confere ao revestimento um maior intertravamento, adequado às condições críticas do pavimento daquela Avenida.

A Figura 19 mostra as espessuras adotadas no dimensionamento da alternativa em blocos de concreto.

Figura 19 - Estrutura do pavimento de blocos intertravados da Av. Severo Dullius



Fonte: elaborada pela autora (2018).

4.2 Análise dos custos

4.2.1 Cálculo do pavimento em concreto asfáltico

Considerando que a obra está situada na cidade Porto Alegre, foi adotada tabela de preços da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, vigente em março de 2018, com correção mensal do CUB/RS categoria R-8N. Nos valores apontados, não foram considerados os custos com oneração de Bonificação de Despesas

Indiretas - BDI na obtenção do custo final. As obras de drenagem e terraplenagem não foram computadas por serem equivalentes aos dois pavimentos.

Na determinação do custo unitário de construção e conservação do revestimento em concreto asfáltico, Tabela 14, foi considerado o período de vida útil de 10 anos. Para podermos equiparar o revestimento de concreto asfáltico ao período de vida útil ao projeto de pavimento dos blocos intertravados, considerou-se o reforço: operação onde se aproveita o valor residual da estrutura do pavimento e acrescenta nova camada de mistura asfáltica (recapeamento). Atualmente, pode incluir a fresagem de parte do revestimento antigo além da colocação de nova camada estrutural de revestimento ou camadas de reposição de conforto ao rolamento (BERNUCCI et al., 2007). Diante do exposto adicionou-se no custo o recapeamento com espessura de 5 cm.

Tabela 14 - Custo total concreto asfáltico (construção e conservação) por m²

Construção do Revestimento de Concreto Asfáltico (m²)			
Material	Espessura cm	Volume litro/m²	Custo R\$
Concreto asfáltico	10,0	-	61,22
1ª Imprimação	-	0,5	8,30
2ª Imprimação	-	1,0	
Brita Graduada (Base)	20,0	-	19,52
Brita Rachão (Sub- base + reforço de Subleito)	80,0	-	67,96
Subtotal por m ² (1)	-	-	157,00
Conservação do Revestimento de Concreto Asfáltico (m²)			
Atividade	Espessura cm	Volume litro/m²	Custo R\$
Fresagem	5,0	-	7,07
Imprimação	-	0,5	3,06
Recapeamento	5,0	-	30,59
Subtotal por m ² (2)	-	-	40,72
Custo total por m ² (1+2)	-	-	197,72
*CUB/RS	-	-	0,14 CUBs

Fonte: elaborada pela autora (2018).

* Observação: Valor do CUB/RS, R-8N, mês de mar/2018 R\$ 1.451,80.

4.2.2 Cálculo do pavimento em bloco intertravado de concreto

O período de vida útil para esse pavimento é de 20 anos, no mínimo, diante disso não foi adotada a conservação da via no período de projeto (10 anos). Na prática, observa-se que o pavimento concluído em blocos de concreto permanece em razoável estado de conservação durante o período de vida útil, pois sendo de concreto de cimento Portland apresenta alta resistência mecânica e grande durabilidade. Tabela 15 apresenta os custos para implantação deste sistema.

As vantagens deste tipo de pavimentação são as facilidades construtiva e de restauração, resultando em baixo custo inicial de implantação e futuros de manutenção, já que não necessita de equipamentos especiais para sua execução, uma vez o trabalho consiste basicamente na retirada dos blocos na região danificada, realização de serviços de reparo e recolocação das peças (COSTA; LIMA; SANTOS; SUZUKI, 2015).

Tabela 15 - Custo total do revestimento em bloco intertravado por m²

Construção do Revestimento em Bloco Intertravado (m²)		
Material	Espessura cm	Custo R\$
Blocos de concreto	10,0	77,74
Base de brita graduada	19,0	18,54
Brita Rachão (Sub- base + reforço de Subleito)	80,0	67,96
Custo total por m ²	-	164,24
*CUB/RS	-	0,113 CUBs

Fonte: elaborada pela autora (2018).

*Observação: valor do CUB/RS, R-8N, mês de mar/2018 R\$ 1.451,80.

4.2.3 Diferença de custo unitário para uma vida útil de 10 anos

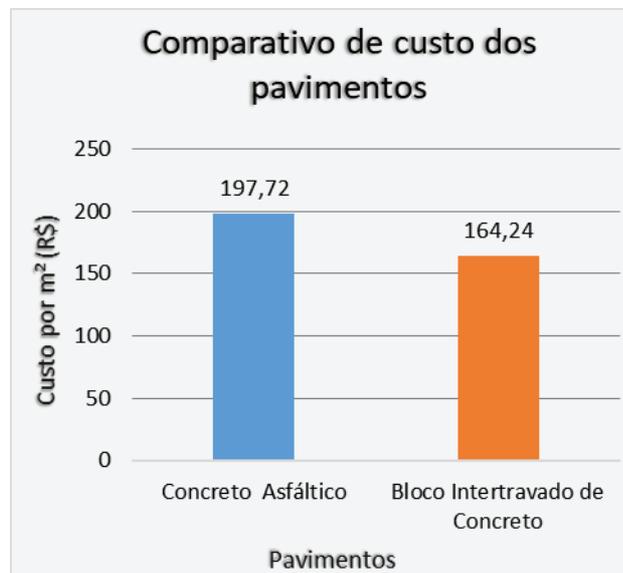
Comparando os custos obtidos para os dois pavimentos, resulta uma diferença de custo unitário de R\$ 33,48 m² ou 0,023 CUBs, a favor do bloco de intertravado de concreto.

A diferença no custo total da obra corresponde ao valor de R\$ 1.078.056,00 ou 742,56 CUBs, se for considerado a extensão da avenida de 2,3 km e a largura

total das pistas de 14 metros, levando-se em conta apenas os custos diretos. Não foram considerados os custos e os benefícios indiretos resultantes do emprego dos dois tipos de pavimentos, tais como: mão de obra, equipamentos, transporte de material, rejeitos da construção e impacto ambiental pela utilização do concreto asfáltico como aterro.

O Gráfico 11 demonstra o comparativo entre custos unitários dos dois pavimentos.

Gráfico 11 - Comparativo de custos entre os pavimentos



Fonte: elaborada pela autora (2018).

4.3 Características geológicas e os sistemas propostos

Topograficamente, a Av. Severo Dullius situa-se em zona baixa (várzea), de cota +3,00 m aproximadamente e bastante plana. Essas condições conduzem a um sistema de escoamento das águas precário, o que, via de regra, leva a pavimentos sofrer com os alagamentos.

As sondagens e os ensaios realizados mostram a grande heterogeneidade e a baixa capacidade de suporte dos solos existentes, além da elevada posição do lençol freático. A constante presença da água sobre o pavimento, elimina a possibilidade do emprego do concreto asfáltico como revestimento, pela reduzida durabilidade de misturas asfálticas em presença de umidade na interface agregado/ligante, levando a desagregação do pavimento asfáltico, por problemas de adesividade. Devido à maior afinidade elétrica, a água é absorvida pela superfície do

agregado mineral, interpondo-se entre a película asfáltica e a superfície dele, provocando o seu descolamento. Esse fenômeno é mais acentuado em agregados graníticos, pela maior acidez da superfície.

Não havendo boa adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados graúdos ou miúdos pode ser empregado melhorador de adesividade na quantidade fixada no projeto (DNER-ME 078 e DNER-ME 079). A determinação da adesividade do ligante com o melhorador de adesividade, também chamado de *dopes*, é definida pelos seguintes ensaios: Métodos DNER-ME 078 e DNER 079, após submeter o ligante asfáltico contendo o *dope* ao ensaio RTFOT (ASTM – D 2872) ou ao ensaio ECA (ASTM D-1754).

Devido aos problemas de adesividade e aos constantes alagamentos originados naquela zona, já referidos no início deste capítulo, recomenda-se a escolha de um pavimento cuja aglutinante principal seja o cimento hidráulico. Por outro viés, é possível e provável a ocorrência de recalques diferenciais originados pela heterogeneidade dos materiais (adensamentos), nível do lençol freático elevado e pelas espessuras das camadas de aterro, o que restringe a utilização do pavimento rígido constituído de placas de concreto de cimento Portland, além do seu custo elevado.

Diante dessas condições, associadas às vantagens econômicas referidas anteriormente, definiram o pavimento de blocos intertravados de concreto de cimento Portland, como o mais indicado para a pavimentação da Av. Severo Dullius.

4.3.1 Reforço do subleito

É uma camada de espessura constante, construída, se necessário, acima da regularização, com características tecnológicas superiores às da regularização e inferiores às da camada imediatamente superior, ou seja, a sub-base. Assim, o reforço do subleito também resiste e distribui esforços verticais, não tendo as características de absorver definitivamente esses esforços, o que é característica específica do subleito (SENÇO, 2007).

Contudo, procura-se utilizá-lo em tais circunstâncias por razões econômicas, pois subleito de resistência baixa exigiriam, para alguns tipos de pavimentos (especialmente aos flexíveis), do ponto de vista de projeto, camadas mais espessas de base e sub-base (BALBO, 2007).

Nos trechos em que o ISC do terreno é menor do que aquele previsto, quando as escavações indicam a presença de solos moles ou plásticos ou saturados, ou quando for necessária a realização de aterros, recomenda-se como solução mais indicada, a utilização de pedra britada do tipo rachão, com granulometria de dimensões mínimas de 10 cm. Nesses casos, a utilização desse material é a mais recomendável, pois evita que as camadas superiores sejam atingidas por águas através do contato direto ou pela ação da capilaridade.

O maciço formado por esse material conduz a um conjunto estruturalmente estável, oferecendo as reações necessárias aos equipamentos de compactação. A principal vantagem em relação à areia é a inexistência de fugas de materiais, para as tubulações pluviais próximas ao pavimento, em presença de água subterrânea.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi comparar qual o tipo de pavimento, concreto asfáltico ou bloco intertravado de concreto, apresentaria maiores vantagens econômicas e técnicas na pavimentação do trecho da Av. Severo Dullius, via urbana localizada na cidade de Porto Alegre.

Para alcançar esses objetivos foram necessários estudos em campo e ensaios em laboratórios, que foram desde a contabilização de tráfego, coleta de amostras de solo, caracterização do solo até a fase final de dimensionamento dos pavimentos e seus respectivos orçamentos.

Para o levantamento de tráfego considerou-se o total de veículos comerciais que circularam nos dois sentidos da via. Para equalizar a análise utilizou-se o fluxo de trânsito originário do entroncamento da compilação da Av. Severo Dullius com a BR 602.

As amostras originárias da coleta de solo apresentaram variação significativa nos dados, situação que pode ser justificada pela condição do trecho analisado, que apresentou locais com a presença de solos saturados, trechos com a presença lixo orgânico, solos moles, e nível de lençol freático elevado. Contudo, seguindo as boas práticas da engenharia, foram considerados os valores sempre em favor da segurança.

Os valores referências para a realização da planilha orçamentaria não incluem o valor de benefícios e despesas indiretas (BDI).

Analisando-se as tabelas de orçamento encontram-se os valores de R\$ 197,72 m² para o pavimento de concreto asfáltico e R\$ 164,24 m² para o pavimento de bloco intertravado de concreto. Diferença de R\$ 33,48 m², demonstrando que para esta situação o pavimento de bloco de intertravado de concreto é 16,93% mais barato que o concreto asfáltico.

Deve-se atentar para análise a longo prazo dos pavimentos, o pavimento de blocos intertravados de concreto apresenta algumas vantagens em comparação pavimento de concreto asfáltico. Tais como a resistência a ataques químicos como óleos, graxas e combustíveis; maior distância de visibilidade horizontal, principalmente noturna, o que proporciona maior segurança aos usuários; menor necessidade de manutenção, o que mantém o fluxo sem interrupções; maior vida útil, enquanto o concreto asfáltico tem sua vida útil entre 8 e 12 anos, o pavimento

de blocos intertravados possui vida útil mínima de 20 anos (BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008).

Outra vantagem do pavimento de blocos intertravados de concreto está relacionada com o aspecto ambiental, é o único pavimento que pode ser retirado e reutilizado. O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) traz grande parte do impacto ambiental total do pavimento devido ao impacto na aquisição e refinação do petróleo (VAN DAM, et al., 2015). Para reabilitar o pavimento de concreto asfáltico há necessidade de fabricação de material novo (CBUQ), gerando grande quantidade de resíduos, e o processo de reciclagem é difícil.

Comparativamente, o pavimento de bloco de concreto é superior ao de concreto asfáltico, considerando-se o emprego desses materiais em situações urbanas críticas, como referidas em capítulos anteriores. Os custos e os benefícios, associados aos efeitos estéticos e de conforto, recomendam a utilização dos blocos de concreto como pavimento urbano, nas situações e zonas com grandes exigências em termos de tráfego de veículos comerciais, principalmente de ônibus, de problemas acentuados de drenagem pluvial, subleito com solos moles e rampas acentuadas em morros.

Esse tipo de revestimento tem se revelado extremamente vantajoso em termos de custo e vem sendo adotado de forma crescente, em virtude de sua capacidade de proporcionar melhor aproveitamento dos recursos financeiros disponíveis, oportunizando aos administradores municipais melhor aplicação dos recursos públicos.

O concreto asfáltico notavelmente requer valores para mantê-lo em condições satisfatórias de uso. Assim para contabilizar a viabilidade econômica do uso do pavimento de concreto asfáltico, aplicou-se a diferença de investimento entre os dois pavimentos numa atividade de conservação e restauração anual para um ciclo de vida de 10 anos (período de projeto).

Em zonas urbanas de reduzida circulação de veículos de carga, ausência de problemas de drenagem pluvial e outros fatores adversos, o emprego de concreto asfáltico apresenta-se mais vantajoso em relação ao bloco de concreto, em termos financeiros. Portanto, pode ser recomendado nas pavimentações urbanas de vias internas de bairros com pequena circulação de veículos, principalmente de ônibus, onde as rampas têm baixa declividade longitudinal, com drenagem pluvial implantada.

A solução final mais econômica e vantajosa para este estudo, apontou para a pavimentação com blocos intertravados de concreto, podendo ser vista como uma solução alternativa a pavimentação de concreto asfáltico, quando a aplicação desses se torna inviável, seja por motivo técnico, seja por motivos econômicos.

5.1 Sugestões para futuro trabalhos

Existem muitos trabalhos que podem ser desenvolvidos no sentido de contribuir para aumentar o conhecimento sobre o tema tratado. Assim, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- aproveitamento de escórias de alto forno como agregados na fabricação de blocos de concreto para pavimentação;
- comparativo entre os métodos de dimensionamento de pavimentos em blocos de concreto;
- pesquisa e amostragem dos blocos fabricados na região metropolitana, para verificação da qualidade geométrica e estrutural das peças, para classificação e recomendação dos fabricantes da região;
- adição de polímeros no concreto de cimento Portland para a fabricação de blocos de concreto, para aumento da resistência à tração e ao desgaste das peças;
- medição de temperatura na superfície dos dois pavimentos, em diferentes épocas do ano, para verificação e medição do conforto térmico.

Diante do exposto, sugere-se que as linhas de pesquisa na área de pavimentação urbana, em especial a pavimentação com blocos intertravados, conduzam o tema a um patamar mais elevado do que se encontra nos dias atuais, visto que o desenvolvimento de novos materiais e equipamentos para produção dos blocos intertravados se encontra em ascensão.

REFERÊNCIAS

ABCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Construção de pavimentos de blocos de concreto**. São Paulo: BT-135, 1999.

_____. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. Estudo Técnico nº27. 4. ed. São Paulo, 1999.

ABEDA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/informativos-tecnicos/>. Acesso em: set 2017.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207** – terminologia e classificação de pavimento – Execução. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15953** – pavimento intertravado com peças de concreto – Execução. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781** – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 16416** – Pavimentos permeáveis – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

ALBERNAZ, C. A.V. **Método simplificado de retro análise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASTHO). **Guide for design of pavement structure**. Washington, USA, 1993.

ASPHALT INSTITUTE. **The asphalt handbook**. Manual series n. 4 (MS-4), 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO (ABPv). **Manual de pavimentação urbana**. Rio de Janeiro, 1995. 198p.

AUGUSTO JÚNIOR, F. **Manual de pavimentação urbana**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1992.

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

_____. Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção. São Paulo: Pleiáde, 1997.

BALBO, J. T.; CARGNIN, A. P.; ONO, B.W. **Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado.** Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte – ANPET. Revista Transportes. v. 25, nº 2. Out, 2017.

BATTAGIN, A. F. **Por dentro dos novos tipos de cimento que estão sendo desenvolvidos e aplicados.** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2009.

BERNUCCI et al., Liedt B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobrás – Abeda, 2007.

BIANCHI, F. R.; BRITO, I. R.; CASTRO V. A. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível.** IBRACON 50º CBC. Espírito Santo: Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste, 2008.

BURAK, ROB. **Bedding Sand for Segmental Concrete Pavements,** Interlocking Concrete Pavement Magazine, Vol. 9, No. 9, August, pp. 12-16. 2002.

CARVALHO, Marcos D. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto (ET-27).** Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (ET-27). São Paulo, 1998. 53 p.

CASTRO, B. A. C. **Construção de estradas e vias urbanas.** Notas de Aula. Departamento de Engenharia e Transporte e Geotécnica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2010.

CAPECHE, C.L. **Noções sobre tipos de estruturas do solo e sua importância para o manejo conservacionista.** Comunicado técnico 51 – EMBRAPA, p. 1-6, 2008.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Relatório de pesquisa rodoviária.** Rio de Janeiro: CNT, 2017.

COSTA, M.O.; LIMA, G.G. A.; SANTOS, C.R.G.; SUZUKI C.Y. Avaliação das condições da superfície de pavimentos com blocos pré-moldados de concreto – estudo de caso. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 44ª RAPv e ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 18ª ENACOR. Paraná: Foz do Iguaçu, 2015. **Anais...**

CRUZ, L.O.M. **Pavimento intertravado de concreto: estudos dos elementos e métodos de dimensionamento**.2003. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Manual de pavimentação**. DNER 697-100. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes - MT. Divisão de Capacitação Tecnológica, 1996.

_____. **Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência**. Normas Rodoviárias DNER/ME 133/94. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes - DNER, 1994.

_____. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes – DNER. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1960.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Solos – determinação do módulo de resiliência**. Normas Rodoviárias DNER/ME 131/94. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes - DNER, 1994.

_____. DNER-TER 01/78. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígido**. Normas Rodoviárias. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes - DNER, 1978.

_____. DNER-ME 078/94. **Agregado graúdo – adesividade a ligante asfáltico: método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNER-ME 079/94. **Agregado - adesividade a ligante asfáltico: método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNER 667-22. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes - DNER. Instituto de Pesquisas Rodoviárias,1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes – DNER. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006a.

_____. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006b.

_____.031/2006 – ES: **Pavimentação: concreto asfáltico**. Rio de Janeiro, 2006.

Dias, L. L., Menegazzo, A. P. M., Quinteiro, E., & Serafim, M. A. (2016). **Development of a new ceramic product for paving footways and public areas**. Ambiente Construído, 16(4), 155-165.

- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos** – Rio de Janeiro: EMBRAPA SPI, 2009, 412p
- FERREIRA, F. A. **Análise do dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando o programa SISPAVBR**. Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ. Rio de Janeiro, 2013.
- FIORITI, Cesar F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo: São Carlos.
- FRANCO, F.A.C.P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SisPav**. 2007. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- GHAFOORI, N.; SUKANDAR, B. M. (1995, January- February). **Abrasion resistance of concrete block pavers**. ACI Materials Journal. p. 25-34.
- GODINHO P. D. **Pavimento intertravado uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 2009. (Dissertação de mestrado) Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte
- HAGEN, V.W. **A estrada do sol**. São Paulo: Melhoramentos, 1955.
- HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo.
- HALLACK, A. **Pavimento intertravado: uma solução universal**. Revista Prisma – Soluções Construtivas com Pré-Fabricados de Concreto, São Paulo, p. 25-27, dez. 2001.
- HUNTER, R.N. **Asphalts in road construction**. London: Thomas Telford. Ed., 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO (IBP). Comissão de Asfalto. **Princípios do projeto e análise de misturas asfálticas**. Rio de Janeiro, 1999.
- INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE (ICPI). **Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots**. 2011. Disponível em: <https://www.icpi.org/tech-specs-pdf/600/972>. Acesso em: 14 mar. 2018.

JUNIOR, I. S.; VASATA, Ana C.D.P. **Análise comparativa entre sistemas de pavimentação rígida e flexível quanto a sua viabilidade técnica e econômica para aplicação em uma via urbana.** 2013. Monografia (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil). Universidade Tecnologia Federal do Paraná - UTFPR – Pato Branco

JÚNIOR, Ivan J. A. **Pavimento intertravado como ferramenta de moderação do tráfego nos centros comerciais de travessas urbanas - Estudo de Caso Guaiúba - CE.** 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará - UFC. Fortaleza.

JÚNIOR, Marcio L. P. C.; ROCHA Pedro H. T. **Estudo preliminar de misturas asfálticas à quente utilizado em obras de pavimentação na região metropolitana de Goiânia.** 2013. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia.

LIRA, J. B. S. **Importância de estudos geológicos para a prevenção de problemas na engenharia civil.** Angicos, RN: UFERSA, 2013. 38 f.

KAYHANIAN et al. M. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, v. 95, n. 1, p. 114 -123, mar. 2012.

KNAPTON, J. Romans and their roads. The original small element pavement technologists. In: FIFTH INTERNATIONAL CONCRETE BLOCKS PAVING CONFERENCE, 5, Tel-Aviv, Israel, 1996, p.17-52. **Anais...**

_____; COOK, I.D. (1992). **“Methods for clay and concrete block paving”**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING, 4., Auckland. Pave New Zeland’92: proceedings. Porirua, Pave New Zeland’92, s.d. v. 1, p. 27-50.

MACIEL, Anderson Brum. Dossiê Técnico: **Pavimentos intertravados.** Escola de Educação Profissional Senai Virgílio Lunardi. Santa Rosa: SENAI, 2007.

MAGALHÃES, E. S. **Alternativa de projeto de pavimento para o corredor de ônibus da Avenida João Naves de Ávila.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia Civil da UFU, Uberlândia.

MORAES, G. H. O. **Análise de alternativa de dimensionamento asfáltico para rodovia de alto volume de tráfego.** Monografia (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil) Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Minas Gerais: Uberlândia. 2017.

- MARCHIONI, Mariana; SILVA, C.O. **Pavimento intertravado permeável - melhores práticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2011.
- MARQUES, Geraldo L. O. **Pavimentação TRN 032. Apostilas e Notas de aula**. Faculdade de Engenharia. Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF. Juiz de Fora: UFJF, 2014.
- MEDINA, Jacques. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.
- MELO, Antão L de. **Apostilas de pavimentação e notas de aula**. Universidade Federal do Pernambuco – UFPE, 2010.
- METSO MINERALS. **Manual de britagem**. 6. ed. São Paulo: Metso Brasil Indústria e Comércio Ltda., 2005.
- MOTTA, Laura M. G. Considerações a respeito de pavimentos e tráfego nas vias urbanas. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO, 6. **Anais...** São Paulo: ABPv, 1995.
- MULLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro. 234f.
- NABESHIMA; C.K.Y.; ORSOLIN K.; SANTOS K. X. **Análise comparativa entre sistemas de pavimentação urbana baseados em concreto asfáltico e blocos de concreto intertravados (pavers)**. 2011. Trabalho de Conclusão. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTPR. Paraná: Curitiba.
- NAKAMURA, J. **Pavimentação asfáltica**. Revista Infraestrutura Urbana. Editora Pini. Edição n.16. São Paulo, 2011.
- PINTO, Liliane L. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Universidade São Paulo – USP. São Paulo.
- PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiarte Copiadora e Artes Gráficas Ltda., 2002.
- PIOROTTI, J. L. **Pavimentação intertravada**. Rio de Janeiro: Montana, 1985. 64 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE (PMPA). **Arquivos de obras de pavimentação da Av. Severo Dullius**. Porto Alegre: EPO - Escritório de Projetos e Obras, 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE (PMPA). **Diagnóstico Ambiental do Município de Porto Alegre**. Secretária do Meio Ambiente: SMAM. 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE (PMPA). **Caderno de encargos obras viárias**. Porto Alegre: PMPA, 2011.

_____. **Tabela de preços unitários**. Porto Alegre: PMPA, 2018.

PREGO, A. S. S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: ABPv, 1996.

RESTOM, Mário Kabalem. **Quebra-molas**. Boletim informativo. Rio de Janeiro: ABPv, 1993. 6 p.

RIBAS, M. C. **A história do caminho do ouro em Paraty**. 2. ed. Paraty: Contest Produções Culturais, 2003.

RODRIGUES, L. F.; **Comportamento Estrutural de placas de concreto apoiadas sobre base granular**. 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiânia (UFG), Goiânia.

SANCHES, F. G.; GRANDINI, F. H. B.; JUNIOR, O. B. **Avaliação da viabilidade financeira de projetos com utilização do asfalto-borracha em relação ao asfalto convencional**. 2012. Monografia (Trabalho de conclusão de curso Engenharia de Produção Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba.

SANTANA, Humberto. **A filosofia dos calçamentos na pavimentação urbana**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO, 4. Maceió: ABPv, 1993. **Anais...**

SANTOS, A. G. **Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos**. 2010. Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil da UDESC, Joinville.

SENÇO, Wlastermilerde. **Manual de técnicas de pavimentação**. v. 1, 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SERAFIM, M. A. **Estudo e proposição de formas de Pavers Intertravados para áreas e passeios público**. 2010. Dissertação (Mestrado em Design) Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação (FAAC). Universidade Estadual Paulista – UNESP. São Paulo: Bauru.

SHACKEL, B. (1979). **“A pilot study of the performance of block paving under traffic using a heavy vehicle simulator”**. In: SYMPOSIUM ON PRECAST CONCRETE PAVING BLOCK, Johannesburg. Proceedings. s.l., Concrete Society of Southern Africa Concrete Masonry Association, s.d.

_____; CANDY, C.C.E. (1988). **“Factors influencing the choice of concrete blocks as a pavement surface”**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING, 3., Roma. Proceedings. Treviso, Pavitalia, 1988. p.78-84.

_____. (1990). **“Design and construction of interlocking concrete block pavements”**. London, Elsevier.

SHACKEL, B., SHI, X., 1991. **The Abrasion Testing of Concrete Pavers**. Fourth International Concrete Block Paving Conference, Vol. 1, Auckland.

SHACKEL, B., 1992. **Computer Based Procedures for the Design and Specification of Concrete Block Pavements”**, Fourth International Concrete Block Paving Conference, Vol. 1, Auckland.

SILVA, E. R. **Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo. 2016.

SOARES, J. B. **Notas de aula**. Universidade Federal do Ceará- UFC. Ceará: Fortaleza, 2003.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Pavimentação rodoviária**. v. 1, Rio de Janeiro: Artes Gráficas Schulze, 1976.

SPECHT, Luciano Pivoto; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; PALUDO, Ilda. Estudo laboratorial da adesividade e do desgaste de misturas asfálticas com borracha. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, XVI. 2004. **Anais...**

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D. ET AL. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS – UFRGS, 2002. 126p.

TENNIS, Paul D.; LEMING Michel L.; AKERS David J. **Pavimentos de concreto perversos**. EB302. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2004.

TROMBETTA, Jairo. **Avaliação, diagnóstico e manutenção de pavimentos flexíveis**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTPR. Paraná: UTPR, 2010.

TROMBETTA, Jairo. **Dimensionamento de pavimentos rígidos**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTPR. Pato Branco: UTPR, 2010.

TURNBULL, W. J.; FOSTER, C. R.; AHLVIN, R. G. Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume. 1962.

VAN DAM, THOMAS J., et al. 2015. **Towards Sustainable Pavement Systems**. Washington DC: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2015.

VIRGILIIS, Luís Afonso Corrêa. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo.

WIEBBELLING, P.O. G. Pavimento com blocos intertravados de concreto estudo de caso na Univates. 2015. Monografia (Trabalho de conclusão curso de Engenharia Civil) Centro Universitário Univates. Lageado.

WOODS, K.B. **Highway engineering handbook**. New York: McGraw Hill, 1960.

YODER, Eldon Joseph; WITCZAK, Matthew W. **Princípios do design do pavimento**. Nova Iorque: Wiley & Sons, Incorporated, John, 1975.

ANEXOS
ANEXO A - CONTAGEM DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS DA
AV. SEVERO DULLIUS

PERÍODO (HORAS)																
14/12/2015																
13:30 - 14:00	227	6	15	22	4	-	5	2								
14:00 - 14:30	241	6	29	18	22	1	7	1								
14:30 - 15:00	231	8	25	22	12	-	9	-								
15:00 - 15:30	245	7	26	15	23	1	7	2								
15:30 - 16:00	239	9	30	13	21	1	-	5								
16:00 - 16:30	219	9	26	10	18	-	10	1								
16:30 - 17:00	222	8	31	12	20	3	4	1								
17:00 - 17:30	226	8	27	16	18	2	8	2								
17:30 - 18:00	228	8	31	10	20	4	4	2								
TOTAL	2076	69	240	138	158	12	54	16								
15/12/2015																
8:30 - 9:00	199	4	25	20	11	-	6	-								
9:00 - 9:30	202	5	10	14	6	-	5	-								
9:30 - 10:00	203	6	13	21	13	1	6	1								
10:00 - 10:30	206	6	21	17	13	1	9	-								
10:30 - 11:00	204	7	13	9	7	2	4	-								
11:00 - 11:30	202	6	14	13	8	1	2	-								
TOTAL	1216	34	96	94	58	5	32	1								
TOTAL GERAL																
	3294	103	336	232	216	17	86	17								

Fonte: DAER (2015).

ANEXO B - MAPA PEDOLÓGICO DE PORTO ALEGRE

