



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ECONOMICIDADE PARA  
IMPLANTAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E  
RÍGIDOS**

Jeane Borelli Bonaldo

Lajeado, novembro de 2020

Jeane Borelli Bonaldo

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ECONOMICIDADE PARA  
IMPLANTAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E  
RÍGIDOS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz

Lajeado, novembro de 2020

Jeane Borelli Bonaldo

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ECONOMICIDADE PARA  
IMPLANTAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E  
RÍGIDOS**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz – orientadora  
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos  
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Eng. Civil Gabriela Thais Lehnen Mendes  
Duo Engenharia

Lajeado, 07 de dezembro de 2020

## RESUMO

A estrutura do pavimento deve ser dimensionada de acordo com as solicitações do tráfego e ações climáticas que a via será submetida, além disso, a definição do tipo de pavimento deve buscar a redução dos custos de implantação, maior qualidade e durabilidade do pavimento. Neste contexto, o presente trabalho apresenta a análise comparativa da economicidade para implantação de pavimentos flexíveis e rígidos, em um trecho da Avenida Benjamin Constant, bem como o tipo e a periodicidade das manutenções necessárias para cada tipo de pavimento em um período de 20 anos. A análise se deu através da interpretação do projeto de pavimento flexível existente, e do dimensionamento de uma nova estrutura, de pavimento rígido, para o mesmo trecho da via, através do método elaborado pela PCA (1984). A previsão das manutenções necessárias para os pavimentos em análise, durante o período pré definido, foram fundamentadas pelo método empírico da AASHTO (1993). Os custos de implantação e manutenção dos pavimentos foram embasados pela tabela referencial SINAPI de agosto de 2020, sem desoneração. Com base na metodologia aplicada, verificou-se que a estrutura de implantação do pavimento flexível é sensivelmente mais espessa que a do rígido, no entanto, os custos estimados para execução do pavimento rígido é 22,2% maior do que para a execução do pavimento flexível. Enquanto que, o valor previsto para manutenção do pavimento flexível é superior a do rígido, cerca de 73,5%. Desta forma, considerando o custo global dos pavimentos, durante 20 anos, o rígido tem maior atratividade frente ao flexível.

**Palavras-chave:** Pavimento flexível, Pavimento rígido, Dimensionamento de pavimentos, Manutenções.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
1.1 Problema de pesquisa	7
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo geral	7
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.3 Justificativa da pesquisa	8
1.4 Delimitação	8
1.5 Premissa	8
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>9</b>
2.1 Classificação dos tipos de pavimentos	9
2.2 Composição da estrutura dos pavimentos	10
2.2.1 Pavimento flexível	10
2.2.1.1 Revestimento asfáltico	11
2.2.1.2 Base	12
2.2.1.3 Sub-base	12
2.2.1.4 Reforço do subleito	13
2.2.1.5 Subleito	13
2.2.2 Pavimento rígido	14
2.2.2.1 Revestimento de concreto de cimento Portland	14
2.2.2.2 Sub-base	15
2.2.2.4 Subleito	15
2.3 Materiais utilizados na construção dos pavimentos	15
2.3.1 Solos	16
2.3.2 Materiais granulares	19
2.3.3 Cimentados	20
2.3.4 Aglomerante hidráulico	21
2.3.5 Ligantes asfálticos	22

2.3.6 Aço	22
2.4 Durabilidade e manutenção dos pavimentos	23
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>25</b>
3.1 Interpretação de dados iniciais	27
3.1.1 Ensaios de caracterização do solo	27
3.1.2 Estudos de tráfego	28
3.2 Pavimentos	28
3.2.1 Pavimentação asfáltica	28
3.2.2 Pavimentação de concreto de cimento Portland	30
3.2.2.1 Etapa 1: parâmetros iniciais	31
3.2.2.2 Etapa 2: espessura tentativa	33
3.2.2.3 Etapa 3: determinação das tensões equivalentes	33
3.2.2.4 Etapa 4: determinação dos fatores de erosão	33
3.2.2.5 Etapa 5: determinação dos fatores de fadiga	34
3.2.2.6 Etapa 6: repetições admissíveis de carga	34
3.2.2.7 Etapa 7: cálculo do consumo de resistência à fadiga e danos por erosão	34
3.2.2.8 Etapa 8: cálculos finais	34
3.3 Manutenções	35
3.3.1 Etapa 1: caracterização do pavimento existente	35
3.3.2 Etapa 2: análise do tráfego	36
3.3.3 Etapa 3: análise de defeitos superficiais	36
3.3.4 Etapa 4: levantamento deflectométrico	36
3.3.5 Etapa 5: poços de inspeção e ensaios de laboratório	36
3.3.6 Etapa 6: determinação do número estrutural requerido para o tráfego futuro	37
3.3.7 Etapa 7: determinação do número estrutural efetivo do pavimento existente	37
3.3.8 Etapa 8: determinação da espessura do reforço	40
3.4 Estimativa de custo	41
3.5 Elaboração de gráficos e tabelas e análise dos resultados	41
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>42</b>
4.1 Análise e interpretação do projeto de pavimento flexível	42
4.2 Dimensionamento do pavimento rígido	43
4.3 Definição dos tipos e da frequência das manutenção para cada tipo de pavimento em um período de 20 anos	46
4.4 Análise dos custos de construção e manutenção dos pavimentos estudados	49
4.5 Análise do custo-benefício dos pavimentos	52
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>56</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A rede de rodovias é constituinte da infraestrutura de transportes, e apresenta-se como a de maior relevância para o desenvolvimento de qualquer país. Ela pode se estruturar e expandir em grandes eixos e vias, de importância gradativamente menor, de forma a garantir alcance a pontos remotos de qualquer território. Mesmo havendo a possibilidade do uso de outras redes de transporte, as rodovias podem atuar como complemento ou via de ligação (BRANCO, 2016).

No Brasil, segundo dados da CNT (Confederação Nacional do Transporte) (2018) mais de 60% das mercadorias e de 90% dos passageiros circulam por rodovias, entretanto, este meio de deslocamento encontra-se em condições insatisfatórias de desempenho, segurança e economia. Para Bernucci (2008) estas circunstâncias prejudicam de forma direta a competitividade da economia de nosso país, uma vez que acarretam números crescentes de acidentes, desperdícios de cargas e gastos elevados com manutenções e combustíveis.

Segundo Balbo (2007), a pavimentação de vias de circulação de veículos, objetiva, primeiramente, proporcionar melhores condições operacionais ao tráfego, uma vez que é criada uma superfície de maior regularidade e aderência e menos ruidosa.

Para Senço (2007), a estrutura de um pavimento, construída sobre o leito de terra, deve ser dimensionada de acordo com as solicitações, ações e funções que a via se submeterá e exercerá, respectivamente. Desta forma, suas camadas (tipo e espessura) e materiais constituintes deverão ser variáveis, conforme classificação funcional da via a ser executada. Balbo (2007) acrescenta que, o dimensionamento deverá garantir bom desempenho em termos

de custos de implantação, de operacionalização e de manutenção ao longo do tempo de serviço da estrutura construída.

Desta forma, este trabalho fundamenta-se na análise comparativa da economicidade para implantação de pavimento flexível e rígido, em face de suas durabilidades e da necessidade de manutenções durante um período de 20 anos.

## **1.1 Problema de pesquisa**

Considerando a possibilidade de pavimentação da Avenida Benjamin Constant no município de Lajeado-RS com pavimento rígido e flexível, qual possui melhor relação custo-benefício considerando durabilidade e manutenção em determinado período?

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho serão apresentados nos itens a seguir.

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é comparar a economicidade entre a construção de pavimento rígido e flexível, em um trecho da Avenida Benjamin Constant no município de Lajeado-RS, considerando as manutenções necessárias em um período pré definido.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) analisar e interpretar o projeto executivo de pavimento flexível, existente, de um trecho da Avenida Benjamin Constant no município de Lajeado-RS;
- b) dimensionar a estrutura de um pavimento rígido, como alternativa do projeto executado;
- c) definir os tipos e a frequência de intervenções necessárias para a manutenção de cada tipo de pavimento em um período de 20 anos;
- d) analisar os custos de construção e manutenção dos tipos de pavimentos estudados;

### **1.3 Justificativa da pesquisa**

De acordo com Landim (2020), a definição do tipo de pavimento a ser executado em uma via deve considerar alguns fatores, os quais pode-se destacar a busca pela redução de custos na implantação, a qualidade do pavimento e a segurança dos usuários. Além disso, o contexto social, econômico, físico e geográfico no qual a via estará inserida são aspectos a serem analisados para a escolha do tipo de pavimento.

O presente trabalho fundamenta-se na necessidade de otimização dos investimentos realizados em infraestrutura urbana, além da busca de conhecimento teórico, visando identificar a alternativa de maior custo benefício, frente a durabilidade e as manutenções, para a execução de pavimentos em vias com características semelhantes à estudada.

### **1.4 Delimitação**

Para este estudo, foram estimadas somente as manutenções do tipo corretiva, a qual é utilizada para corrigir falhas e defeitos objetivando prolongar a vida útil da estrutura. As manutenções preventivas requerem maior detalhamento das condições do pavimento, das solicitações e ações que o mesmo está exposto, o que não é possível neste caso, tornando assim, os resultados com menor precisão e confiabilidade. Além disso, a metodologia aplicada não abrange este tipo de manutenção.

### **1.5 Premissa**

Os dados previstos no projeto executivo do pavimento flexível foram considerados corretos, para fins da análise comparativa com o pavimento rígido.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Conforme Branco (2016), a principal função de um pavimento é garantir uma superfície de rolamento que assegure comodidade e segurança para a circulação de veículos, durante um período determinado, frente às ações do tráfego e condições climáticas que possam vir a ocorrer. Esta superfície de rolamento é caracterizada de acordo com sua textura, cor e outras qualidades visuais e auditivas (geração de ruídos durante o deslocamento), que por sua vez estão relacionadas diretamente à constituição da camada superior do pavimento.

Branco (2016) afirma ainda que outras características do pavimento devem ser consideradas, como integridade, regularidade e comportamento da superfície, e estas associam-se ao desempenho estrutural de todo o pavimento. Bernucci (2008) acrescenta que a estrutura de um pavimento é constituída por várias camadas de espessuras definidas e diferentes materiais, executadas sobre a superfície terraplanada da plataforma estradal.

### **2.1 Classificação dos tipos de pavimentos**

De acordo com Medina (2015), a classificação dos pavimentos ocorre quando a estrutura do mesmo é analisada como um sistema de camadas, e a forma que esta estrutura se deforma ao absorver os esforços de tração. O Manual de Pavimentação do DNIT (2006b) classifica os pavimentos em três tipos:

- a) pavimento flexível: este tipo de pavimento quando submetido a cargas verticais, sofre deformação elástica e as distribui em parcelas equivalentes para a suas camadas inferiores. O exemplo mais comum, é o pavimento formado por uma camada de

subleito, construído, seguido por uma camada de base, constituída normalmente por brita graduada, e revestida por uma camada asfáltica;

- b) pavimento semi-rígido: caracteriza-se por conter uma base cimentada composta por um aglutinante com propriedades cimentícias, um exemplo típico desta variedade de pavimento é o constituído por uma camada de solo cimentado, revestida por uma camada de asfalto;
- c) pavimento rígido: esta é a classe de pavimento que possui revestimento com elevada rigidez, quando comparado às camadas inferiores, este revestimento absorve praticamente todas as tensões que é submetido; o exemplo mais utilizado é o pavimento composto por placas de concreto de cimento Portland assentado sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária.

Para Branco (2016), o comportamento de um pavimento também é definido pelas ações impostas pelo tráfego e clima, pela quantidade e espessura de cada camada de sua estrutura, bem como as propriedades dos materiais utilizados nas mesmas e pelas particularidades apresentadas pelo subleito.

## **2.2 Composição da estrutura dos pavimentos**

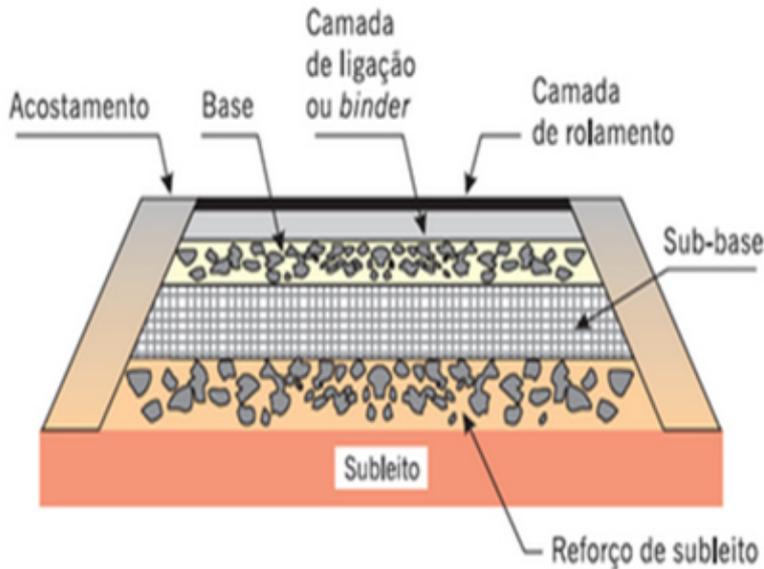
De acordo com Balbo (2007), as estruturas dos pavimentos são constituídas por camadas de diferentes materiais, assentadas sobre o subleito da plataforma estradal, destinadas a receber e transmitir esforços, oriundos do tráfego, de modo a aliviar as pressões sobre as camadas inferiores. Bernucci (2008) acrescenta que o comportamento estrutural de cada camada depende da sua espessura, rigidez, interação e capacidade de suporte do subleito. Segundo a classificação indicada por Bernucci (2008), estas estruturas podem ser de dois tipos: flexível e rígida.

### **2.2.1 Pavimento flexível**

Conforme Balbo (2007), as estruturas de pavimentos flexíveis são formadas por uma camada de revestimento asfáltico assentada sobre uma camada de base, que está apoiada sobre a camada de sub-base, reforço do subleito e subleito respectivamente, sendo este último

a fundação e parte integrante da estrutura. A Figura 1 exibe a composição da estrutura de um pavimento flexível e a imagem da execução da camada de revestimento asfáltico em uma via.

Figura 1 - Pavimento asfáltico



Fonte: Bernucci (2008).

### 2.2.1.1 Revestimento asfáltico

Conforme Balbo (2007), o revestimento é a camada do pavimento destinada a receber cargas, estáticas ou dinâmicas, sem apresentar grandes deformações, elásticas ou plásticas, e desagregação de materiais. Para tanto, é necessário um composto de materiais bem aglutinado, de modo a evitar sua movimentação horizontal. Segundo Pessoa (2014), este composto, denominado CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), é alcançado através do processo de usinagem, com temperaturas entre 107°C e 177°C, e mistura de materiais: ligante de Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP, brita, areia e filler.

Pessoa (2014) acrescenta que, pelo fato de os revestimentos desempenharem funções estruturais, muitas vezes se apresentam em camadas espessas, havendo assim, a necessidade de dividi-las quando maiores que 7 cm, para atendimento das recomendações dos processos de compactação. Desta forma, é executado uma primeira camada, de ligação, e uma segunda camada, de rolamento.

Enquanto a camada de ligação, ou *binder*, cuja função é unicamente estrutural, possui uma textura mais aberta (agregados com granulometria maior), para promover maior aderência com a camada superior, a camada de rolamento, por desempenhar a função estrutural e de revestimento, apresenta uma textura mais fechada (menor granulometria dos agregados), para possibilitar maior conforto aos usuários. Entre as camadas de *binder* e rolamento é imprescindível a aplicação de pintura de ligação, uma vez que esta promove a aderência entre as mesmas.

### **2.2.1.2 Base**

A base é a camada de pavimentação executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito e tem a finalidade de resistir às cargas geradas pelo tráfego e distribuir para as camadas inferiores (DNIT, 2010c).

Segundo Balbo (2007), as bases podem ser compostas de solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados, brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfálticos, concreto. Sobre a superfície da camada de base finalizada, é necessário a execução de imprimção asfáltica com material betuminoso, objetivando o preenchimento de vazios superficiais, de forma a reduzir a infiltração de água através da superfície dessa camada. Além disso, a aplicação deste ligante proporciona aumento da coesão no material da superfície tratada e a aderência entre a base e o revestimento.

### **2.2.1.3 Sub-base**

De acordo com o DNIT (2010c), a sub-base é executada sobre o subleito ou reforço do subleito e possui as mesmas funções da camada de base, transmitir esforços verticais às camadas subjacentes. Balbo (2007) acrescenta que a sua utilização visa reduzir a camada da base, por razões técnicas e econômicas, quando for exigido que esta seja muito espessa, devido à baixa resistência do subleito.

A sub-base pode ser constituída de rachão, solos, mistura de solos e materiais britados, produtos totais da britagem, solo melhorado com cimento e areia grossa bem graduada

(DAER, 1998). Senço (2007) entende que os materiais aplicados nesta camada devem apresentar características tecnológicas superiores aos do subleito e inferiores a da base.

#### **2.2.1.4 Reforço do subleito**

Segundo Senço (2007), o reforço do subleito é uma camada executada sobre o subleito, de espessura regular, e com a finalidade de resistir e distribuir esforços verticais. Balbo (2007) acrescenta que esta camada é inserida na estrutura do pavimento para que o subleito receba cargas de menor magnitude, quando este for composto por solos de baixa capacidade de resistência.

Os esforços recebidos pelo subleito podem ser atenuados por camadas de maior espessura de base e sub-base, porém o emprego do reforço do subleito torna-se economicamente mais atrativo, uma vez que este é composto por solos e as camadas superiores por materiais granulares ou cimentados (BALBO, 2007). Segundo Senço (2001), os solos ou outros materiais utilizados para o reforço do subleito devem ser oriundos de jazidas e apresentar propriedades tecnológicas superiores a do subleito, Índice de Suporte Califórnia (CBR) maior ou igual a 10%, expansão menor ou igual a 2% e índice de grupo igual a zero ou muito baixo.

#### **2.2.1.5 Subleito**

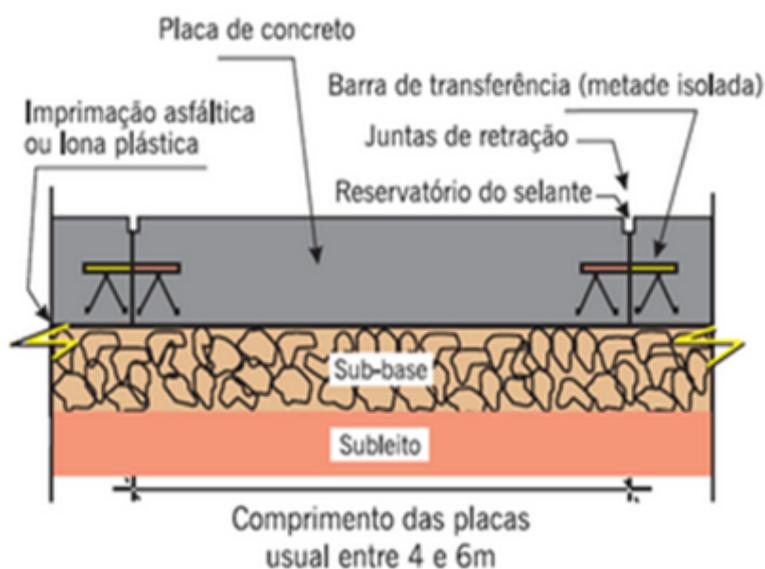
Para Senço (2007), o subleito é o terreno de fundação do pavimento. Somente a camada mais próxima da superfície é considerada parte do subleito, independentemente se a terraplenagem foi executada recentemente, e a superfície apresentar-se de forma regular, ou se a plataforma da via já estiver consolidada, com superfície irregular. Balbo (2007) salienta que os esforços aos quais estão submetidos a superfície do subleito, serão reduzidos à medida que a profundidade vai aumentando, e normalmente são absorvidos no primeiro metro.

Desta forma, deve-se deter maior atenção nos estratos superiores, já que estão sujeitos à incidência de esforços com maior amplitude. Ainda de acordo com Senço (2007), as sondagens para investigação dos materiais a serem utilizados na camada de subleito de um pavimento são realizadas até a profundidade de três metros abaixo da superfície.

## 2.2.2 Pavimento rígido

Segundo Bernucci (2008), a estrutura dos pavimentos rígidos é composta por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (em geral placas, armadas ou não), estabelecida sobre uma camada denominada sub-base, esta por sua vez apoiada sobre o subleito ou reforço do subleito, quando o mesmo for necessário. A Figura 2 demonstra a estrutura tradicional de um pavimento rígido e a imagem de execução da camada de concreto de cimento.

Figura 2 - Pavimento de concreto de cimento Portland



Fonte: Bernucci (2008).

### 2.2.2.1 Revestimento de concreto de cimento Portland

A camada de pavimento é constituída de concreto, agregados e ligantes hidráulicos, e pode ser executada a partir de diferentes técnicas de manipulação do concreto, de acordo com as exigências de projeto, execução, operação e manutenção (BALBO, 2009).

Bernucci (2008) define a camada de revestimento como uma placa de concreto de cimento Portland, e atribui sua espessura a resistência à flexão das placas de concreto e das camadas inferiores da estrutura. Estas placas podem ser do tipo concreto armado (com barras de aço) ou concreto simples. DNIT (2006a) complementa indicando que esta camada absorve

praticamente todas as solicitações oriundas do tráfego de veículos e desempenha as funções de revestimento e base.

#### **2.2.2.2 Sub-base**

De acordo com Rodrigues (2011), a camada de sub-base de pavimentos rígidos é executada com material granular, caracteristicamente estabilizado com ligante hidráulico (concreto pobre, solo-cimento), a fim de dispor de maior resistência frente às solicitações do tráfego intenso e pesado. Esta camada também tem como objetivo oferecer uma superfície plana e homogênea para o aporte da camada superior, e ainda, resistir à erosão, durante a construção do pavimento e ao longo de toda a vida útil do mesmo. DNIT (2005), acrescenta que esta camada deve ser esbelta e tem como função vedar o processo de bombeamento dos finos do subleito, uma das principais causas de colapso dos pavimentos de concreto.

#### **2.2.2.4 Subleito**

Segundo Senço (2001), o subleito dos pavimentos rígidos são construídos da mesma maneira que o dos pavimentos flexíveis. No caso de terraplenagens recém executadas, o processo de regularização e nivelamento deverá possibilitar a acomodação das camadas subjacentes. Para as estradas consolidadas, a camada de regularização deverá ser constituída com materiais importados e precisam apresentar CBR maior ou igual ao do subleito. O nível da camada final desta etapa deverá ser, preferencialmente, em aterro, de modo a facilitar a conservação da compactação já realizada pelo tráfego de veículos passantes pela via. A camada de subleito finalizada terá de possuir grau de compactação mínimo de 95% da massa específica seca máxima do ensaio de compactação Proctor Modificado - AASHTO.

Para Branco (2016), os materiais constituintes do subleito devem ser homogêneos e resistentes à ação da água, no caso de solos com capacidade reduzida, manifestação de heterogeneidade em sua composição, e para vias de fluxo intenso e pesado, é necessário a substituição do material existente.

### **2.3 Materiais utilizados na construção dos pavimentos**

De acordo com Balbo (2007), existem inúmeros tipos de materiais que podem ser utilizados para a construção de pavimentos, no entanto, para a escolha dos mesmos, é

necessário avaliar as características da obra e da região que será implantada. Branco (2016) acrescenta que estes materiais, constituintes das camadas de pavimentos, devem atender características e desempenhos mínimos pré-definidos.

Para Senço (2007), a construção da estrutura de um pavimento requer não só a análise dos materiais constituintes das camadas da estrutura, mas também a identificação das características dos materiais do subleito e dos que serão empregados na construção dos drenos, acostamentos, cortes e aterros. O solo por sua vez, destaca-se por interferir em todos os estudos para a construção de um pavimento, mesmo que a sua utilização não seja prevista nas camadas, este será o suporte da estrutura.

As camadas intermediárias do pavimento são executadas com materiais granulares, obtidos através do processo de britagem de rocha sã ou de solos selecionados, com menor frequência. Os solos estabilizados com cal ou com cimento também constituem as camadas de sub-base e base e por vezes são utilizados na camada de desgaste de pavimentos rígidos. O teor de ligante hidráulico, cimento, na mistura de solo, depende da empregabilidade da mesma, menor para camadas próximas do subleito e maiores para as superiores (BRANCO, 2016).

Senço (2007) afirma que nos pavimentos asfálticos, a avaliação dos ligantes betuminosos e dos agregados deverá ser criteriosa, pois serão utilizados necessariamente na capa de rolamento ou em outras camadas. Assim como o cimento para o caso de execução de pavimentos de concreto e estabilização de solos, como já citado. A cal também é utilizada como agente melhorador das propriedades de solos para emprego em bases e sub-bases e ainda em misturas betuminosas a frio, com a mesma finalidade.

### **2.3.1 Solos**

Conforme Senço (2007), o solo é o mais antigo, mais usado, mais complexo e mais desconhecido dos materiais da construção. Este material é o resultado da associação de grãos de características individuais, sendo que estas podem ser alteradas de acordo com o estado em que se encontra, original ou manuseado. Para Balbo (2007) conhecer o solo é essencial para a

execução de pavimentação, tanto para verificação dos materiais como para elaboração de projetos.

Segundo Vargas (1986) *apud* Balbo (2007), os solos são originados através do processo de decomposição das rochas e são classificados em residual e transportado. O solo residual é oriundo da decomposição de rocha que permaneceu estável no próprio local, enquanto o transportado é originado em local remoto e deslocado por ação da água, do vento ou da gravidade.

Ainda de acordo com Vargas (1986), posterior ao processo de decomposição, ocorre a alteração química dos solos por ação da água ácida e de ácidos orgânicos, que transformam os minerais em areias ou argilas. Esta modificação está associada ao tipo de rocha e ao clima. Das (2011) acrescenta que as partículas de solo são denominadas pedregulhos, areia, silte e argila, esta nomenclatura depende do tamanho predominante das partículas presentes em cada amostra.

Para Balbo (2007), a classificação dos solos e conseqüentemente a identificação granulometria dos mesmos é realizada a partir dos ensaios de peneiramento, para frações com diâmetro superiores a 0,074 mm, e o de sedimentação, para frações inferiores. Para diferenciação dos siltes e das argilas é necessário especificar outras propriedades físicas. Enquanto os siltes possuem menor resistência, quando umedecidos e agitados na mão apresentam-se com aspecto vítreo e brilhante, que desaparece se esfregado, as argilas são mais intemperizadas e coloidais. A Tabela 1 demonstra os tipos de solos, de acordo com as respectivas subdivisões e diâmetros, classificados através do ensaios de peneiramento e sedimentação, conforme preconiza a Associação Americana de Funcionários Estaduais de Rodovias e Transportes(AASHTO) e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (USCS).

Tabela 1 - Frações de solos e seus diâmetros segundo a AASHTO e USCS

FRAÇÃO	SUBDIVISÕES	DIÂMETROS-LIMITE (mm)
Pedras	-	> 76
Pedregulhos	Graúdo	19 a 76
	Miúdo	4,76 a 19

(continua)

(continuação)

Areias	Grossa	2 a 4,76
	Média	0,42 a 2
	Fina	0,074 a 0,42
Siltes	-	0,074 a 0,002
Argilas	-	<0,002

Fonte: Balbo (2007).

Senço (2007) complementa que os solos são constituídos por partículas sólidas com a presença de vazios, que poderão estar parcialmente ou totalmente preenchidos com água, trata-se portanto de um sistema polifásico, formado geralmente por três fases: sólida (minerais), líquida (umidade presente) e gasosa (ar). A relação destas fases podem ser expressas pelos índices físicos do solo: teor de umidade, massas específicas, porosidade, índice de vazios, grau de compactação, grau de saturação, densidade real, incluindo as relações entre eles.

Ainda existem os índices de consistência do solo, denominados de Limites de Atterberg, classificados pela Highway (HRB) - AASHTO) USCS. Neste tipo de classificação a consistência do solo é dividida em líquida, plástica, semi sólida ou sólida (BALBO, 2017).

Enquanto o sistema HRB-AASHTO de classificação de solos é utilizado principalmente para fins rodoviários, e fundamenta-se na identificação granulométrica da amostra, em seus índices físicos, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, e no índice de grupo, o USCS é empregado em maior escala para execução de aeroportos, que por sua vez categoriza os solos em granulação grossa e granulação fina (DAS, 2011).

O sistema classificatório Miniatura, Compactado, Tropical (MCT), é empregado para identificação dos solos finos tropicais, considerando suas propriedades mecânicas e hidráulicas quando compactados e ainda visando a possibilidade de uso em camadas de pavimentos. Seus ensaios são feitos de forma a comparar o desempenho observado em campo com os mensurados em laboratório (BALBO, 2007).

### 2.3.2 Materiais granulares

Conforme Senço (2007), os agregados são materiais granulares, inertes, de forma e dimensão variada, detentores de propriedades adequadas para constituir camadas de bases e misturas betuminosas e de concreto de cimento. DNIT (2006a), acrescenta que estes materiais podem ainda ser classificados de acordo com sua origem, naturais ou artificiais.

O desempenho potencial dos agregados, para execução de pavimentação asfáltica é medido em ensaios de laboratório e experiências práticas, considerando as propriedades geológicas da rocha de origem e o que aconteceu com eles desde então. O material escolhido deve apresentar qualidades mínimas para suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. O comportamento das partículas de agregado depende da forma como são produzidas, mantidas unidas e das condições a que estarão expostas (BERNUCCI, 2008).

Ainda de acordo com Bernucci (2008), os agregados utilizados em pavimentação podem ser divididos em três grupos, segundo sua natureza, tamanho e distribuição de grãos.

Quanto à natureza, DNIT (2006b) discrimina os agregados em:

- a) agregados naturais: são adquiridos através de processos como desmonte, dragagem e escavação. Podem ser aplicados na execução de pavimentação, na forma natural ou ainda podem ser submetidos a um segundo processo, o de britagem. Pedregulhos, seixos, britas e areias são exemplos deste tipo de agregado;
- b) agregados artificiais: são oriundos de processos industriais, como escória de alto-forno e aciaria, ou ainda, podem ser produzidos com a finalidade específica de alta desempenho, é o caso das argilas calcinadas e expandidas;
- c) agregados reciclados: são obtidos através do reuso de outros materiais.

Quanto ao tamanho, os agregados são classificados para o uso em misturas asfálticas (DNIT, 2004):

- a) agregado graúdo: é o material que fica retido na peneira n° 10, ou seja, com diâmetro maior que 2,0mm. Exemplo: brita, cascalho, seixos;
- b) agregado miúdo: é o material de dimensão entre 0,075mm e 2,0mm, que por sua vez, fica retido na peneira n° 200 e passa na abertura da n° 10. Exemplo: areia e pó de pedra;
- c) agregado de enchimento (filer): é o tipo de material que possui no mínimo 65% das partículas menores que 0,075mm, ou seja, que ficam retidos na peneira n° 200. Exemplo: cal hidratada, cimento Portland.

Quanto a distribuição dos grãos, DNIT (2010) distribui os agregados em:

- a) agregado de graduação densa: é o tipo de material que se apresenta na curva granulométrica de forma contínua, contendo quantidade de material fino suficiente para preencher os vazios ocasionados pelos de maior diâmetro;
- b) agregado de graduação aberta: também é um material bem graduado, porém a quantidade de finos presente na amostra é insuficiente para ocupar os vazios deixados pelas partículas maiores;
- c) agregado do tipo macadame: é aquele que possui partículas de granulometria uniforme, onde o diâmetro máximo é aproximadamente o dobro do mínimo.

Para Bernucci (2008), a distribuição granulométrica dos agregados influencia diretamente nas propriedades dos revestimentos asfálticos, dentre elas cita-se a rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente.

### **2.3.3 Cimentados**

Segundo DNIT (2017), os materiais cimentados consistem na mistura de um ou mais produtos químicos (agente estabilizador), com partículas de solo, de brita, de agregados naturais, de resíduos ou de materiais reciclados, com a finalidade de diminuir os vazios da

amostra, melhorar as condições de enfrentamento da ação da água, e por consequência, ocorre o aumento da resistência mecânica do material estabilizado.

Ainda de acordo com DNIT (2017), os produtos químicos utilizados com maior frequência na estabilização de materiais em pavimentação são o cimento Portland e a cal, em menor escala são usados também para o mesmo fim outros produtos pozolânicos ou combinações de resíduos e produtos comerciais. O teor do estabilizador empregado define se a cimentação foi radical ou se alteração foi parcial, este último resulta em um solo melhorado.

### **2.3.4 Aglomerante hidráulico**

Os ligantes hidráulicos podem ser definidos como um “material pulverulento mineral finamente moído que, por meio de adição de água, forma uma pasta que após determinado tempo, solidificando-se, permite sua ligação em outros materiais, e tal processo pode ocorrer mesmo em meio aquoso” (HABERLI; WILK, 1990 *apud* BALBO, 2007, p 142).

Ainda de acordo com Halberli e Wilk (1990) *apud* Balbo (2007), os ligantes hidráulicos ou aglomerantes hidráulicos de forma mais ampla, são empregados em larga escala na estabilização de solos e na composição de concretos, inclusive os de revestimentos de pavimentos rígidos. Seus principais materiais constituintes são os silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio, e de ferroaluminatos de cálcio, sendo que o emprego de diferente proporções destes materiais resultam nas seguintes variações de aglomerantes: cimento Portland, ligantes pozolânicos ativados por cal, cimentos Portland com adições pozolânicas naturais, cinzas volantes, escórias granuladas, sílica ativa, e metacaulim e cal.

Conforme Balbo (2007), a cal é obtida através da decomposição térmica do calcário, e é classificada como cal virgem, resultante da queima do calcário puro, e cal hidráulica, obtida pela queima do calcário misturado com pequena quantidade de argila. O cimento Portland é o resultado da mistura de calcários e argilas, podendo ter ainda outro tipo de sílica, alumina ou óxido de ferro, queimados em altíssimas temperaturas e moídos posteriormente, originando o clínquer.

Enquanto os cimentos naturais são formados por calcinação e compostos de substâncias calcárias e argilosas presentes na natureza, os cimentos siderúrgicos e os

aluminosos são resultantes de misturas, o primeiro de escória granulada de alto-forno moída e clínquer e o último cimento é produzido com adição de bauxita, que após o resfriamento é finamente moído. E, as pozolanas, caracterizam-se por ser um material extremamente fino, que em contato com cal e água, produz aglomerante em temperaturas ambientes (BALBO, 2007).

### **2.3.5 Ligantes asfálticos**

Conforme Ceratti (2011), o ligante asfáltico usado na construção de pavimentos flexíveis, é originário da destilação do petróleo e tem como principal característica a adesividade termoviscoelástica, impermeabilidade e baixa reatividade química, porém não é imune ao processo de envelhecimento por oxidação causado pelo contato com o ar e a água. Balbo (2007) acrescenta que a radiação solar, águas ácidas ou sulfatadas, óleos, graxas, lubrificantes e combustíveis de veículos também são prejudiciais a este tipo de aglutinante.

O ligante asfáltico, também denominado de CAP, é composto por hidrocarbonetos saturados de peso molecular elevado (betume), frações de hidrogênio, oxigênio, pequenas quantidades de enxofre, azoto, e outros metais como vanádio, níquel, ferro, magnésio, e cálcio em quantidades ainda menores. A composição dos betumes varia conforme o tipo de petróleo bruto utilizado e com o processo que foi submetido durante a extração (BRANCO, 2016).

De acordo com Balbo (2007), a partir dos CAP pode-se obter inúmeros tipos de materiais utilizados em pavimentação, a exemplo emulsões e asfaltos diluídos, este ligante ainda permite a própria alteração por outros materiais, como os polímeros, para diferentes empregabilidades.

### **2.3.6 Aço**

Segundo Balbo (2009), os aços utilizados para construção civil, são fabricados com ligas de ferro-carbono, laminados a quente ou conformados a frio, este por sua vez detém maior resistência e menor ductilidade. Enquanto os aços laminados a quente apresentam escoamento bem definido, com ganho de resistência posterior, o processo realizado a frio veda existência do diagrama tensão-deformação. No último caso, normativas específicas determinam o valor de deformação plástica na ordem de 0,2%. Apesar dos aços supracitados

apresentarem valores de resistências diferentes, seus módulos de elasticidade se mostram semelhantes.

Conforme Balbo (2009), o aço é encontrado na construção de pavimentos rígidos com maior frequência nas fibras de aço, com o propósito de melhorar as propriedades da mistura endurecida, devido a sua fragilidade e pequena resistência à tração. Também são utilizadas telas soldadas a fim de controlar a retração da peça, bem como suportar os momentos fletores impostos pelos dos veículos passantes. Outra possibilidade do uso do aço são em barras de transferência de carga em juntas, objetivando a transferência de cargas propriamente e o combate do empenamento das placas de concreto, e, por fim, barras de aço de ligação em juntas longitudinais, com o intuito de manter unidas as placas dispostas lado a lado na pista de rolamento.

#### **2.4 Durabilidade e manutenção dos pavimentos**

Quando finalizados, os pavimentos são expostos à ação do tráfego de veículos e a ações climáticas, que, por consequência, evidenciam ao longo do tempo diversos tipos de desgaste e degradação. Estas manifestações patológicas possuem relação entre si influenciando na evolução e propagação uma das outras, comprometendo de forma direta a durabilidade e o desempenho da estrutura do pavimento (BRANCO, 2016).

À vista disso, para o caso dos pavimentos flexíveis, Senço (2001) relata a necessidade de se realizar manutenção preventiva, visando a prevenção do aparecimento de falhas, e a manutenção corretiva, com a finalidade de corrigir as falhas em estágio primário. Os trabalhos de conservação rotineira devem contemplar o pavimento como um todo, desde a estrutura até a faixa de domínio.

Ainda conforme Senço (2001), os defeitos mais comuns nos pavimentos flexíveis são: o fendilhamento da superfície, a deformação transversal e recalques, sulcamento, ondulação e corrugação, exsudação, formação de panelas, abrasão, desagregação, esboroamento e oxidação, e separação da camada de base. Estas anomalias, quando identificadas e corrigidas em fases iniciais são impedidas de se disseminar em área e em profundidade, exigindo menor

tempo e mão-de-obra, que por sua vez, resultam na redução de custos durante o processo de reparo.

As deficiências comumente encontradas nos pavimentos possuem relação direta com o uso de técnicas construtivas e materiais inadequados, associado à falta de manutenção rotineira necessária para este tipo de estrutura. Sendo que estas tendem a se ampliar com o passar do tempo. Nos pavimentos rígidos apresentam-se com maior frequência as falhas localizadas, associados a uma ou mais causas específicas (DNIT, 2010a).

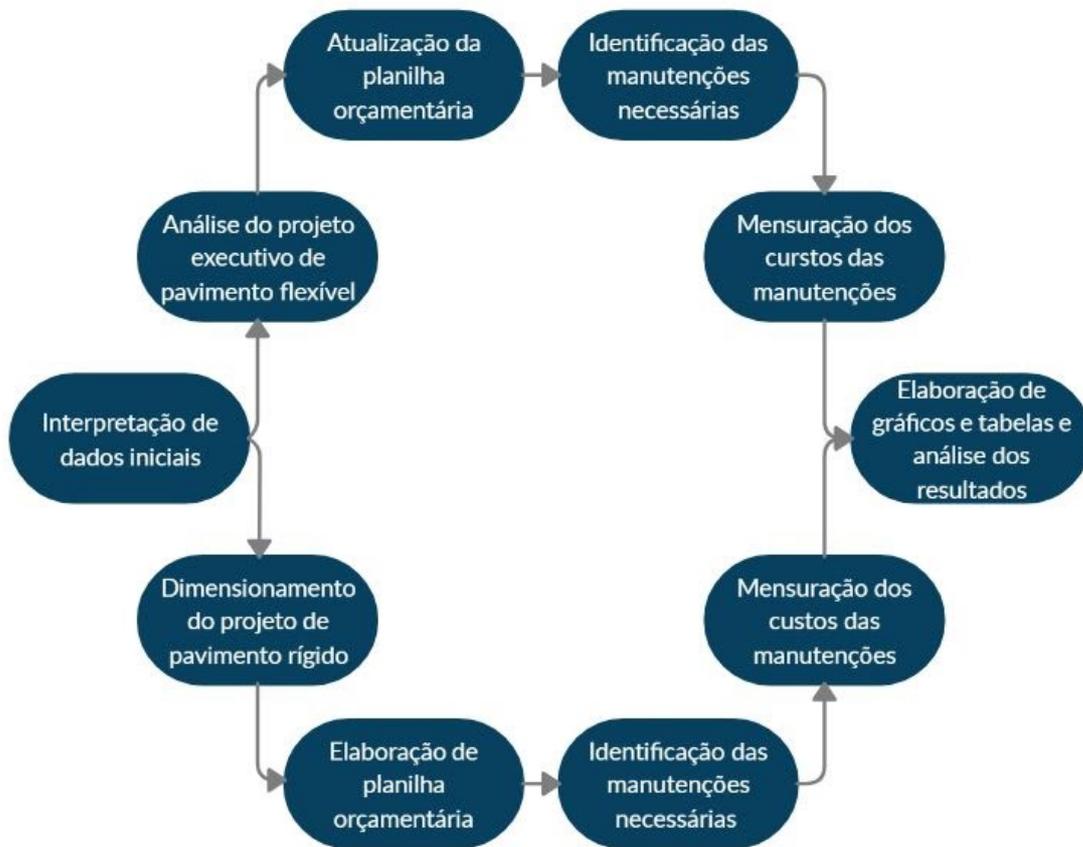
Branco (2016) reafirma a importância de manutenções que assegurem o funcionamento das condições estruturais do pavimento. E, indica que as principais causas da degradação dos pavimentos rígidos são: deficiência da capacidade de suporte da fundação, drenagem mal projetada ou mal executada, excesso de carga dos veículos comerciais, execução deficiente ou falta de manutenção do material selante das juntas. Esta a última tem maior relevância, uma vez que possui relação direta com a durabilidade do pavimento, devido aos selantes existentes no mercado possuírem uma vida útil muito menor que a prevista para o pavimento, possibilitando a entrada de infiltrações, que atingem a fundação do pavimento.

Com relação a durabilidade, Carvalho (2007) sugere maiores benefícios do pavimento rígido quando comparado com o pavimento flexível, devido à maior durabilidade e à baixíssima necessidade de manutenção. Além disso, é mais resistente às intempéries, não oxida, não sofre deformação plástica e não forma trilhos de rodas, contudo, sua execução possui custo mais elevado. Bianchi (2008) mensura a longevidade dos pavimentos, indicando vida útil mínima de 20 anos para os rígidos e máxima de 10 anos para os flexíveis.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

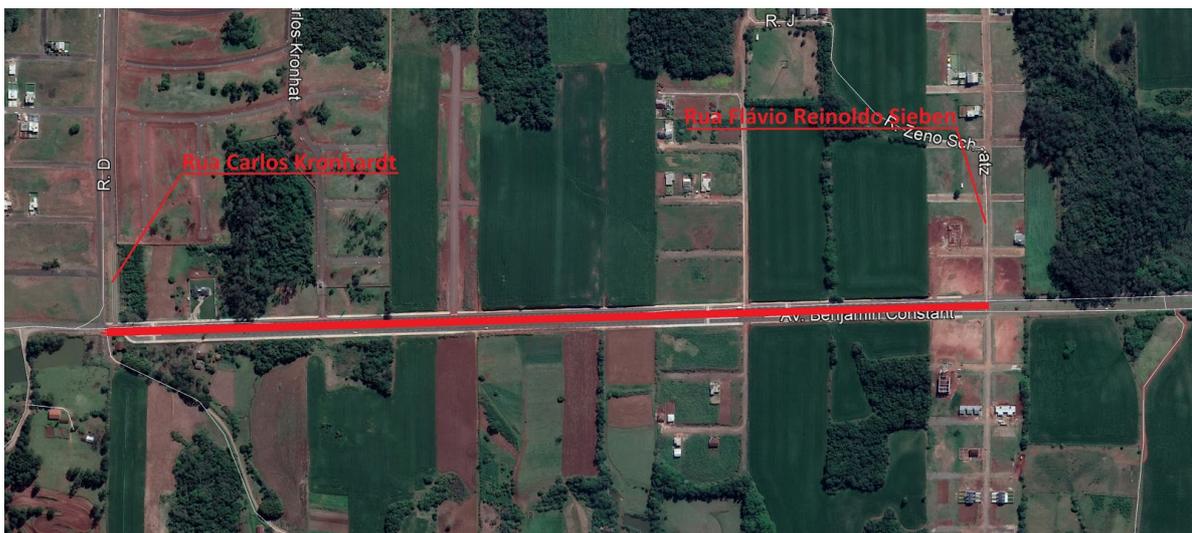
Este capítulo apresenta como foi feita a análise da economicidade entre a construção de pavimento flexível e rígido, em um trecho de 1.170m de extensão da Avenida Benjamin Constant no município de Lajeado-RS, compreendido entre as ruas Flávio Reinoldo Sieben e Carlos Kronhardt, considerando os custos de implantação e manutenções em um período pré definido. Foi realizada interpretação do projeto executivo de pavimento flexível, cuja obra fora concluída no ano de 2016 e elaborado um projeto executivo de pavimento de concreto de cimento Portland para o mesmo trecho desta via urbana. Posteriormente, foram avaliadas as possíveis manutenções corretivas necessárias para cada tipo de pavimento, sua periodicidade e o custo estimado para a realização das mesmas em um período de 20 anos. A Figura 3 apresenta as etapas do trabalho que serão melhor discutidas nos itens a seguir e a Figura 4 expõe a localização do trecho da via estudada.

Figura 3 - Diagrama das atividades a serem desenvolvidas



Fonte: Da autora.

Figura 4 - Localização do trecho em análise - Avenida Benjamin Constant



Fonte: Da autora.

### 3.1 Interpretação de dados iniciais

Inicialmente foram analisados os dados iniciais, com a finalidade de melhor interpretar o projeto executivo do pavimento flexível e também para o uso dos mesmos no dimensionamento do pavimento rígido.

#### 3.1.1 Ensaios de caracterização do solo

A caracterização do solo foi realizada a partir da análise dos ensaios de CBR (Índice de Suporte Califórnia) realizados no ano de 2014, cujo objetivo foi verificar o valor de suporte dos solos, usando amostras deformadas, em estado natural, de material passante na peneira de 19 mm, correspondente à umidade ótima e massa específica aparente máxima seca. Esses valores foram obtidos de acordo com a Norma DNER–ME 049/94, já que a norma que encontra-se em vigor atualmente, NORMA DNIT 172/2016 - ME, não existia quando da elaboração do projeto.

A partir das seis amostras coletadas, caracterizou-se o solo do local como argila vermelha, com valores de CBR variando entre 10,69% a 14,90%, conforme demonstra a Tabela 2. O CBR definido para o dimensionamento do pavimento flexível foi o valor médio das amostras coletadas, 12,72%. Este valor também foi utilizado para a elaboração dos cálculos de dimensionamento do pavimento rígido e das previsões das manutenções para os dois tipos de pavimento.

Tabela 2 - Características do solo coletado

Umidade ótima (%)	C.B.R. (%)	Expansão do solo (%)	Tipo de solo	Localização da amostra
28.5	14.52	0.09	Argila vermelha	F01 B.D.
25.2	10.92	0.14	Argila vermelha	F02 B.E.
27.7	12.66	0.65	Argila vermelha	F03 EIXO
29.6	12.64	0.81	Argila vermelha	F04 B.D.
27.7	14.90	0.46	Argila vermelha	F05 B.E.
25.2	10.69	0.45	Argila vermelha	F06 EIXO

Fonte: material não publicado<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ensaio realizado pela empresa Suprenge no ano de 2014, parte dos documentos anexos ao projeto de pavimento flexível obtido junto a prefeitura de Lajeado/RS.

### 3.1.2 Estudos de tráfego

Ocorreram de acordo com as diretrizes definidas no Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006), visando identificar os tipos e a frequência dos veículos que trafegaram pela Avenida Benjamin Constant, no trecho em estudo, durante três dias do mês de outubro de 2014, conforme é evidenciado na Tabela 3. A taxa de crescimento anual considerada para os dois tipos de pavimento foi de 3%.

Tabela 3 - Contagem de tráfego

Data	Passeio	Coletivo	Carga				Total
			Leve	Média	Pesado	Ultra pesado	
06/10/14	362	20	28	35	3	0	448
07/10/14	341	20	12	42	2	0	417
08/10/14	356	20	36	39	5	0	456
Total	1.059	60	76	116	10	0	1.321
VDM	177	20	25	39	3	0	440

Fonte: material não publicado<sup>2</sup>.

## 3.2 Pavimentos

Nas etapas a seguir, serão demonstrados a metodologia aplicada para a interpretação do projeto de pavimento flexível, já dimensionado, e a adotada para o dimensionamento do pavimento rígido.

### 3.2.1 Pavimentação asfáltica

Nesta etapa, foram analisadas as peças técnicas do projeto executivo, pranchas, memoriais, orçamentos, composições, objetivando interpretar as medidas e as decisões tomadas no momento de sua elaboração.

A partir da análise realizada verificou-se que o *offset* previsto em projeto conta com extensão de 1.170 metros e largura de 29,60 metros. O *offset* transversal conta com duas

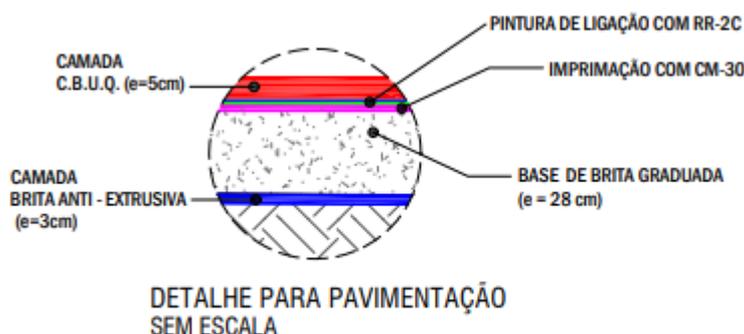
<sup>2</sup> Ensaio realizado pela empresa Suprenge no ano de 2014, parte dos documentos anexos ao projeto de pavimento flexível obtido junto a prefeitura de Lajeado/RS.

pistas de 6,20 metros cada, dividida por um canteiro central de 9,20 metros, calçadas de passeio de 3,00 metros na duas laterais externas e uma ciclovia de 2,00 metros de largura localizada entre a pista e a calçada do lado direito, sentido centro-bairro. A área considerada para fins de mensuração dos quantitativos dos materiais constituintes de cada camada abrange a área de 17.857 m<sup>2</sup>, sendo 16.848,00 m<sup>2</sup> relativos ao *offset* da pista e 1.009,00 m<sup>2</sup> de bocas de rua.

Ainda foram identificadas a constituição da estrutura do pavimento, a iniciar pela execução de uma camada de brita granular nº 2, com 3 cm de espessura, sem finalidade estrutural, por toda a extensão do subleito, após a finalização dos serviços de terraplenagem. Seguida por uma camada de base de brita granular constituída de pedra britada graduada, de 28 cm, abrangendo as seções transversais tipo do projeto, de acordo com a Figura 5. Sobre a superfície da base granular concluída, foi executada a imprimação da mesma, conferida pela aplicação de película de material betuminoso, CM-30, com taxa de ligante variando entre 0,8 a 1,61 l/m<sup>2</sup>, objetivando conferir coesão superficial, impermeabilizar e permitir condições de aderência entre a camada existente e o revestimento a ser executado.

Por conseguinte, foi prevista a aplicação de película de material betuminoso sobre a superfície da camada de base imprimada, visando promover a aderência entre esta camada e o revestimento a ser executado. Esta película refere-se a pintura de ligação, com RR-2C, contendo teor de ligante asfáltico de 0,4l/m<sup>2</sup> a 0,6l/m<sup>2</sup>. Por fim, uma camada de 5 cm de concreto asfáltico, resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado mineral graduado, material de enchimento (*filler*) e material betuminoso, espalhada e comprimida a quente sobre a base de brita graduada. A Figura 5 evidencia a espessura e o tipo de material utilizado em cada camada do pavimento flexível.

Figura 5 - camadas do pavimento flexível



Fonte: material não publicado<sup>3</sup>.

Posteriormente, os valores unitários dos quantitativos elencados na planilha orçamentária do projeto foram atualizados, tendo como balizador os preços da tabela referencial SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), agosto de 2020, sem desoneração. O manual de Orientações para Elaboração de Planilhas Orçamentárias de Obras Públicas do Tribunal de Contas da União indica o uso da tabela referencial SINAPI para obras de infraestrutura urbana.

### 3.2.2 Pavimentação de concreto de cimento Portland

Para o dimensionamento do pavimento de concreto de cimento Portland, foi adotado o método elaborado pela Portland Cement Association PCA (1984), o qual tem por base a determinação da resistência à fadiga e os danos causados pela erosão, de modo que estas duas variáveis alcançassem um valor máximo de 100%. Assim, a espessura da placa de concreto adotada no projeto definitivo do pavimento, foi a relacionada com o primeiro condicionante a atingir 100%, ou valor próximo dele, na tabela própria do método (ANEXO A), cujas cargas por eixo contam com um fator de segurança, estimado de acordo com o levantamento de tráfego da via, para os casos de pavimentos sem acostamentos de concreto e juntas com barras de transferência. Para formação dos valores da tabela própria foi utilizado a ferramenta Excel. O dimensionamento do pavimento de concreto também baseou-se nos formulários-tipo, Anexos B a M.

<sup>3</sup> Ensaio realizado pela empresa Suprenge no ano de 2014, parte dos documentos anexos ao projeto de pavimento flexível obtido junto a prefeitura de Lajeado/RS.

A sequência de cálculo seguiu o roteiro indicado pelas etapas 1 a 8.

### **3.2.2.1 Etapa 1: parâmetros iniciais**

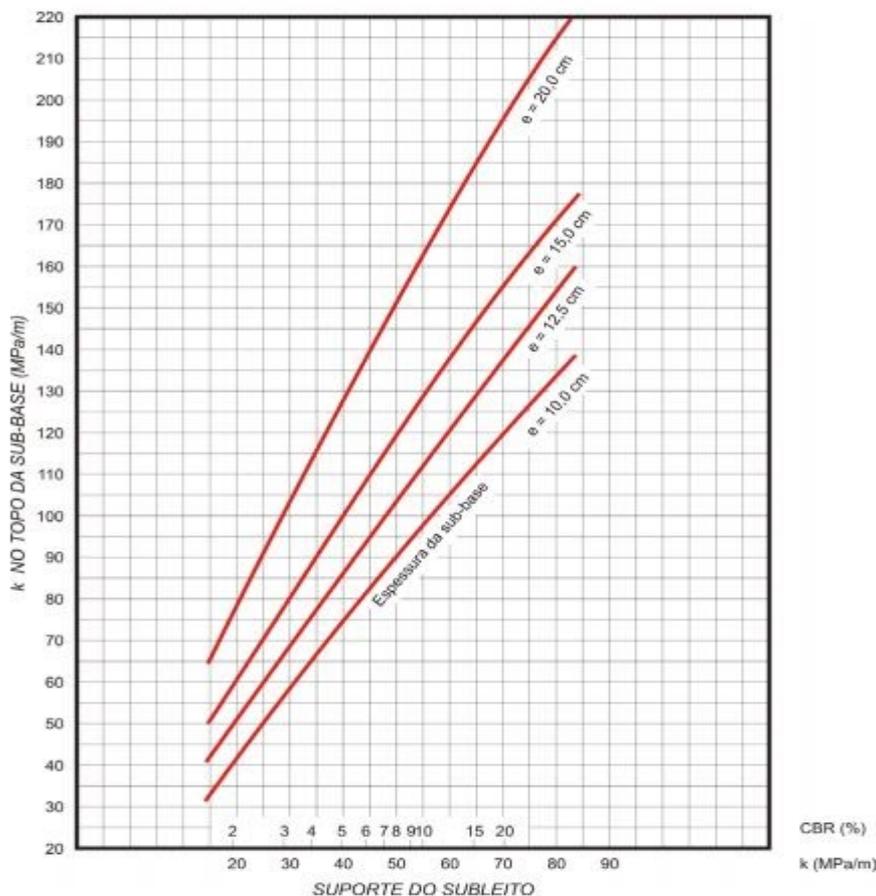
Iniciou-se com a escolha do tipo de acostamento e da adoção ou não de barras de transferência. Sobre o acostamento, considerou-se que apesar de os efeitos do acostamento apresentarem resultados positivos ao pavimento de concreto, principalmente ao que tange à redução das deformações verticais ao longo da borda do pavimento e na redução da espessura necessária da placa, neste caso não foi adotado acostamento. Esta escolha se deve ao fato de tratar-se de uma via urbana, onde foram executados canteiro central e calçadas de passeio. Apesar da calçada ser executada em concreto, não haverá nenhum tipo de ligação com o pavimento e as suas camadas subjacentes, além disso, estas são costumeiramente constituídas de materiais de menor qualidade, oriundos do corte do aterro do *offset*.

Em relação às barras de transferência, tendo em vista a grande contribuição econômica, em decorrência da diminuição da espessura, que estas barras proporcionam aos pavimentos rígidos, especialmente aos que não dispõem de acostamento, que é o caso, optou-se por adotar juntas com barras de transferência.;

Em seguida, definiu-se a resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) de 4 MPa, aos 28 dias de cura, considerando que valores muito altos, próximos de 5 MPa, correspondem a concretos de maior impermeabilidade, durabilidade adequada e menor espessura de placa, mas que em contrapartida exigem controle tecnológico rigoroso e apresentam custo inicial mais elevado.

Sobre o coeficiente de recalque no topo da sub-base, tendo em vista os valores de CBR do subleito do trecho em análise, que variam de 10,69% a 14,90%, e a necessidade de atenção especial para a ocorrência de variações bruscas nas características desta camada para o dimensionamento de pavimentos rígidos, optou-se por incluir na estrutura uma camada de 10 cm, de material granular tratado com cimento, para desempenhar as funções de sub-base. De acordo com o ábaco da Figura 6, esta camada alcança um coeficiente de recalque de 100 MPa/m. Esta camada de sub-base deve apresentar resistência à compressão simples, aos 7 dias, entre 3,5 e 5,0 MPa. O consumo mínimo de cimento deve ser igual a 3% em massa.

Figura 6 - Aumento de k devido à presença de sub-base de brita tratada com cimento



Fonte: DNIT (2005).

A determinação do Fator de Segurança de Carga (FSC), de 1,0, teve como base a Tabela 4, onde os tipos de veículos foram identificados a partir da contagem de tráfego realizada no ano de 2014.

Tabela 4: Fator de segurança para cargas (FSC)

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

Fonte: DNIT (2005).

O tráfego é representado pelo número de solicitações para cada tipo de eixo, identificado na contagem de tráfego, ao longo do período de projeto, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Número de solicitações para cada tipo de eixo

CARGA/EIXO (tf)	FREQUÊNCIA (%)	NÚMERO DE SOLICITAÇÕES
<b>Eixo simples</b>		
6,0	51	892,329.49
10,0	49	857,336.18
<b>Eixo duplo</b>		
17,0	100	28,999.98

Fonte: Da autora.

### 3.2.2.2 Etapa 2: espessura tentativa

A partir da planilha de cálculo, Anexo A, foram testados diferentes valores de espessura para a placa de concreto a ser executada como revestimento do pavimento, onde a de 21 cm foi a que atendeu o solicitado pelo método PCA (1984).

### 3.2.2.3 Etapa 3: determinação das tensões equivalentes

As tensões equivalentes foram determinadas a partir do Anexo B, considerando um pavimento sem acostamento, com espessura (h) de 21 cm e coeficiente de recalque correspondente a  $k_{sb} = 100$  MPa/m (10 kgf/cm<sup>2</sup>) e incluídos na planilha de cálculo própria, nos campos 8 e 11:

- a) tensão equivalente para Eixos Simples: TEES = 1,46 MPa (14,6 kgf/cm<sup>2</sup>);
- b) tensão equivalente para Eixos Tandem Triplos: TEETD = 1,22 MPa (12,2 kgf/cm<sup>2</sup>).

### 3.2.2.4 Etapa 4: determinação dos fatores de erosão

Foram determinados a partir do Anexo J, para o caso de pavimentos de concreto sem acostamento e juntas com barras de transferência. Os valores obtidos foram transferidos para os campos 10 e 13 da planilha de cálculo (ANEXO A):

- a) tensão equivalente para Eixos Simples:  $TEES = 2,74$ ;
- b) tensão equivalente para Eixos Tandem Triplos:  $TEETD = 2,85$ .

### **3.2.2.5 Etapa 5: determinação dos fatores de fadiga**

Para a determinação destes fatores, dividem-se as tensões equivalentes pela resistência característica do concreto à tração na flexão. Os valores obtidos foram lançados nos campos 9 e 12 da planilha própria (ANEXO A).

- a) para Eixos Simples:  $FFES = 1,46/4,0 = 0,36$ ;
- b) para Eixos Tandem Duplos:  $FFETD = 1,22/4,0 = 0,3$ .

### **3.2.2.6 Etapa 6: repetições admissíveis de carga**

Determinação das repetições admissíveis de carga:

- a) fator erosão: com o Fator de Erosão e as cargas por eixo simples e tandem duplos, determinaram-se as Repetições Admissíveis de Carga através do Anexo O;
- b) fator fadiga: com o fator de fadiga e as cargas por eixos simples e tandem duplos, determinaram-se as Repetições Admissíveis de Carga através do Anexo O, levando em consideração a estrutura não dispor de acostamento.

### **3.2.2.7 Etapa 7: cálculo do consumo de resistência à fadiga e danos por erosão**

Nesta etapa, foram divididas as repetições previstas pelas respectivas repetições admissíveis, determinando-se as porcentagens de consumo de resistência à fadiga e o dano por erosão da análise por fadiga e por erosão respectivamente. Os valores foram lançados nas colunas 5 e 7 da planilha (ANEXO A).

### **3.2.2.8 Etapa 8: cálculos finais**

Na última etapa, somaram-se os valores do Consumo de Fadiga obtido através da Análise de Fadiga, assim como os valores do Consumo de Fadiga auferidos pela Análise da Erosão, onde a espessura (h) de 21 cm cumpriu os requisitos do método aplicado, de que

nenhuma das somas ultrapassassem 100%. A resistência à fadiga alcançou o percentual de 0% e o de erosão de 42,87%.

Por fim, os itens dimensionados foram orçados, de acordo com os custos da tabela referencial SINAPI de agosto de 2020, sem desoneração.

### **3.3 Manutenções**

As manutenções dos pavimentos flexíveis e rígidos foram dimensionados de acordo com o guia da AASHTO (1993), o qual prevê o dimensionamento de reforços para os dois tipos de pavimento, tendo como solução o reforço concreto asfáltico ou concreto de cimento Portland. Desta maneira, a solução adotada para o reforço dos pavimentos objeto do estudo de caso, foi o reforço em concreto asfáltico, que por sua vez permite a liberação da pista para uso no mesmo dia da execução, considerando que a vista a Avenida Benjamin Constant é uma via de ligação entre bairros e municípios e não possui via alternativa a ela.

Para o reforço em concreto asfáltico, tanto para pavimentos flexíveis quanto rígidos, o guia identifica oito etapas para a determinação da espessura da camada necessária de reforço estrutural para um pavimento existente, porém as etapas 3, 4 e 5 são apenas recomendadas pelo método, e desta forma, não foram realizadas por exigirem levantamento de dados *in loco* e extração de amostras do pavimento a ser restaurado, o que neste estudo de caso não é possível.

#### **3.3.1 Etapa 1: caracterização do pavimento existente**

Inicialmente, caracterizou-se os pavimentos existentes, a partir da identificação da espessura e do tipo de material de cada camada do pavimento, conforme Tabela 6, bem como as informações sobre o solo do subleito. Conforme já mencionado, este fora definido como argila vermelha e C.B.R. de 12,72%.

Tabela 6 - Caracterização dos pavimentos

Tipo de pavimento	Camada de base		Camada de revestimento	
	Material	Espessura	Material	Espessura
Pavimento flexível	B.G.S	28 cm	C.B.U.Q.	5 cm
Pavimento rígido	Material granular tratado com cimento	10 cm	Concreto de cimento Portland	21 cm

Fonte: Da autora.

### 3.3.2 Etapa 2: análise do tráfego

Em seguida, procedeu-se com a análise do tráfego na faixa de projeto. Desta forma, foram calculados o número  $N$ , para os dois tipos de pavimento, desde a implantação (para o uso do método de vida útil remanescente), e posteriormente, previsto o tráfego futuro durante o período de projeto.

### 3.3.3 Etapa 3: análise de defeitos superficiais

Nesta etapa, é recomendada a execução de levantamento da condição superficial do pavimento, que exige a medição e registro de defeitos na faixa de projeto. Porém, este levantamento não é essencial para o dimensionamento da camada de reforço.

### 3.3.4 Etapa 4: levantamento deflectométrico

O levantamento com deflectométrico, visando a caracterização estrutural do pavimento existente, também é recomendado pelo guia da AASHTO, entretanto é prescindível a sua realização.

### 3.3.5 Etapa 5: poços de inspeção e ensaios de laboratório

Assim como as etapas 3 e 4, a extração de amostras do pavimento e posterior análise de laboratório, visando determinar as condições elástica e de suporte de cada material, não foi realizada por este estudo tratar-se de uma previsão de restauração de pavimentos e estas serem dispensáveis para o dimensionamento do reforço estrutural preconizado pelo método de restauração da AASHTO (1993).

### 3.3.6 Etapa 6: determinação do número estrutural requerido para o tráfego futuro

Nesta etapa, foi determinado o número estrutural necessário para o tráfego futuro para os pavimentos flexíveis e rígidos, conforme Tabela 7, utilizando a Equação 1, de dimensionamento de pavimentos asfálticos do guia para projeto da AASHTO.

$$SN = \alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2 m_2 + \alpha_3 D_3 m_3 \quad (1)$$

Onde:

$D_1, D_2, D_3$  = espessuras do revestimento, base, e sub-base do pavimento existente;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  = coeficientes estruturais de cada camada;

$m_2, m_3$  = coeficientes de drenagem de base granular e sub-base.

Tabela 7 - Determinação do número estrutural

Tipo de pavimento	$\alpha_1$	$D_1$	$\alpha_2$	$D_2$	$m_2$	SN
Flexível	0.44	1.9 (pol)	0.16	11.03 (pol)	1	2.63
Rígido	0.44	8,27 (pol)	0.22	3.94 (pol)	1	4.5

Fonte: Da autora.

### 3.3.7 Etapa 7: determinação do número estrutural efetivo do pavimento existente

A determinação do número estrutural efetivo ( $SN_{ef}$ ) do pavimento existente pode ser realizada a partir de três métodos, a saber: método com ensaio não destrutivo (NDT), método com avaliação do pavimento e um método de vida remanescente. De acordo com o guia da AASHTO (1993), é recomendado que o projetista utilize os três métodos e selecione, com base nos resultados, o valor mais adequado, utilizando critérios técnicos e experiências passadas pela agência.

O método com ensaio não destrutivo (NDT) supõe que a capacidade estrutural do pavimento é função de sua espessura e rigidez total global. O módulo efetivo das camadas de pavimentos acima do subleito ( $E_p$ ) é calculado a partir de dados de levantamentos deflectométricos. A Equação 2 é utilizada neste cálculo.

$$SN_{ef} = 0,0045 D \sqrt[3]{E_p} \quad (2)$$

Onde:

$D$  = espessura total de todas as camadas acima do subleito (pol.);

$E_p$  = módulo efetivo global das camadas de pavimentos acima do subleito (psi).

O método com avaliação do pavimento utiliza a equação de número estrutural, apresentada anteriormente na Equação 1.

Os coeficientes de drenagem são determinados da mesma forma usada no projeto do pavimento. No entanto, dependendo do tipo de intensidade da deterioração da camada, os coeficientes atribuídos aos materiais existentes no pavimento devem, na maioria dos casos, ser inferiores aos valores que seriam atribuídos aos mesmos materiais para a implantação do pavimento.

Para este estudo de caso, o dimensionamento do  $SN_{ef}$  foi realizado através do método de vida remanescente, o qual apresentou resultados de maior coerência, se comparado aos outros dois, descritos acima. Este foi determinado matematicamente através da Equação 3 apresentada a seguir.

$$RL = 100 \left( 1 - \frac{N_p}{N_{1,5}} \right) \quad (3)$$

Onde:

$RL$  = vida remanescente (%);

$N_p$  = número N total até a data;

$N_{1,5}$  = número N limite para a estrutura a ser ventia de 1,5.

Para o caso do pavimento flexível foi utilizado o valor de  $N_p$  para a idade de 9 anos, onde identificou-se 1,09% de vida remanescente, e por consequência a necessidade de restauração nesta idade. Com relação ao pavimento rígido, no 19º ano de vida, a estrutura encontra-se com 6,67% de vida remanescente, indicando assim, a necessidade de manutenção corretiva para este ano. A saber, quando realizado o cálculo com o valor de  $N_p$  do 20º ano

de vida do pavimento, resultou em um percentual negativo, o que não é admitido pelo método.

A partir da determinação da vida remanescente das estruturas determinou-se o fator de condição, através da Equação 4 a seguir.

$$CF = \frac{SC_N}{SC_0} \quad (4)$$

Onde:

CF = fator de condição;

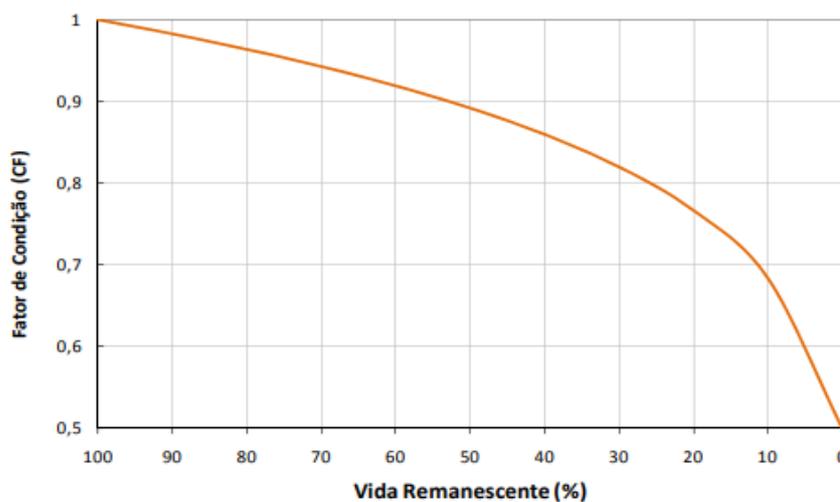
$SC_0$  = condição estrutural inicial do pavimento;

$SC_N$  = condição estrutural do pavimento após N solicitações do eixo padrão.

Os valores condição inicial e final representam a importância de 4,3 e 2 para o pavimento flexível e 4,5 e 2,5 para o pavimento rígido. Os fatores de condição encontrados, no 9º ano de uso do pavimento flexível foi de 0,68 e 0,79 no 19º ano de vida do pavimento rígido. O método de restauração da AASHTO (1993) recomenda o valor mínimo de 0,5 para os fatores de condição.

A partir da determinação da vida remanescente, foi determinado a condição estrutural do pavimento a ser restaurado, utilizando a relação existente entre estas duas variáveis, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 - Relação entre a vida remanescente e o fator de condição



Fonte: AASHTO (1993).

O número estrutural efetivo do pavimento existente foi determinado através da Equação 5, para o qual foram encontrados os valores de 1,80 para o pavimento flexível e 3,58 para o rígido.

$$SN_{ef} = CF \cdot SN_0 \quad (5)$$

Onde:

CF = fator de condição;

$SN_0$  = número estrutural do pavimento, como se fosse recém-construído.

### 3.3.8 Etapa 8: determinação da espessura do reforço

Na última etapa, foram determinadas as espessuras da camada de recapeamento a ser implantada através da Equação 6. Resultando em 4,77 cm após 9 anos de solicitações na estrutura de pavimento asfáltico e 5,35 cm após 19 anos de uso do pavimento de concreto.

$$D_{ol} = \frac{SN_{ol}}{\alpha_{ol}} = \frac{(SN_{ol} - SN_{ef})}{\alpha_{ol}} \quad (6)$$

Onde:

$SN_{ol}$  = número estrutural do recapeamento necessário;

$\alpha_{ol}$  = coeficiente estrutural para o recapeamento;

$D_{ol}$  = espessura da camada de recapeamento necessária (pol);

$SN_f$  = número estrutural requerido, conforme determinado na Etapa 6;

$SN_{ef}$  = número estrutural efetivo do pavimento existente.

Para o caso do pavimento flexível, foi necessário calcular uma segunda restauração, objetivando alcançar o período de análise. Esta foi identificada no 14º ano de uso da estrutura, devido ao número de repetições previstas (n) ter ultrapassado o número de repetições admissíveis (N).

Desta forma, o acréscimo estrutural decorrente da aplicação do primeiro reforço estrutural, calculado utilizando o valor da espessura e coeficiente estrutural, foi somado ao  $SN_{ef}$ , resultando no número estrutural do pavimento recapeado, conforme Equação 7:

$$SN_{rec} = SN_{ef} + D_{ol} \cdot \alpha_{ol} \quad (7)$$

Onde:

$SN_{rec}$  = número estrutural após o recapeamento.

O número estrutural do pavimento recapeado alcançou o valor de 2,76 e este foi utilizado para calcular o novo número admissível (N).

### **3.4 Estimativa de custo**

Para cada restauração prevista, foram quantificados os volumes materiais de mão de obra necessários e atribuídos valores unitários aos mesmos de acordo com a tabela SINAPI de agosto de 2020, sem desoneração. Os valores estimados referem-se aos valores presentes, para a composição do custo total, implantação e restaurações, possibilitando assim, maior facilidade para comparação da atratividade de cada tipo de pavimento analisado.

### **3.5 Elaboração de gráficos e tabelas e análise dos resultados**

Nesta etapa foram elaborados gráficos e tabelas comparativas, com os resultados encontrados anteriormente, entre as duas possibilidades de pavimento, flexível e rígido, com o uso da ferramenta Excel.

Por fim, a partir dos dados registrados, foi feita a análise dos resultados finais, com o propósito de identificar qual a solução executiva é a mais vantajosa, considerando o custo de implantação, a durabilidade de cada estrutura, as manutenções necessárias no período de tempo definido e o dispêndio para execução das mesmas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através da aplicação dos procedimentos metodológicos apresentados no capítulo anterior, considerando somente os custos de execução e manutenção do tipo corretiva dos pavimentos estudados.

### 4.1 Análise e interpretação do projeto de pavimento flexível

De acordo com projeto executivo do pavimento flexível, o mesmo conta com 33 cm de estrutura, divididas em duas camadas, base e revestimento. A base possui 28 cm de espessura e é composta por brita graduada simples, o revestimento tem 5 cm e é feito com CBUQ. Nessa estrutura, ainda foram executados a imprimação da base com CM 30 e pintura de ligação entre as camadas de base e de revestimento com RR-2C. Além disso, nesse pavimento foi executada uma camada de brita de 3 cm de espessura, previamente a execução da base, com finalidade anti-extrusiva, por tratar-se de um subleito argiloso.

Tabela 8 - Camadas do pavimento flexível

Camada	Espessura	Material	Finalidade
Brita	3 cm	Brita granular nº 2	Anti-extrusiva
Base	28 cm	GGs	Estrutural
Revestimento	5 cm	CBUQ	Estrutural

Fonte: Da autora.

A estimativa de custo do pavimento flexível considerou apenas os materiais e a mão de obra necessários para execução de cada camada de sua estrutura, conforme apresentado na Tabela 9. Estes foram embasados pela Tabela SINAPI de agosto de 2020, sem desoneração.

As despesas relativas à administração central da obra, mobilização e desmobilização de equipamentos, terraplenagem, microdrenagem e sinalização da via não foram considerados nesta análise, por serem considerados necessários independentes do tipo de pavimento a ser executado. Os custos referentes à execução da calçada de passeio e canteiro central também não foram considerados.

Tabela 9 - Estimativa de custo para implantação de pavimento flexível

<b>PAVIMENTO FLEXÍVEL</b>					
<b>CÓDIGO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>UNID.</b>	<b>QUANT.</b>	<b>VALOR UNIT.</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
96396	EXECUÇÃO DE CAMADA DE BRITA ANTI-EXTRUSIVA (E= 3 CM)	m <sup>3</sup>	641.01	89.07	57,094.76
96396	EXECUÇÃO DE BASE DE BRITA GRADUADA (E= 28 CM)	m <sup>3</sup>	5,537.22	89.07	493,200.19
96401	EXECUÇÃO DE IMPRIMAÇÃO COM ASFALTO DILUÍDO - CM 30	m <sup>2</sup>	18,793.00	6.06	113,885.58
96402	EXECUÇÃO DE PINTURA DE LIGAÇÃO COM EMULSÃO ASFÁLTICA RR-2C.	m <sup>2</sup>	17,857.00	1.69	30,178.33
95995	EXECUÇÃO DE PAVIMENTO COM APLICAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO, CAMADA DE ROLAMENTO	m <sup>3</sup>	892.85	1,097.93	980,286.80
<b>PAVIMENTO FLEXÍVEL</b>					<b>1,674,645.66</b>

Fonte: Da autora.

#### **4.2 Dimensionamento do pavimento rígido**

O pavimento rígido foi dimensionado considerando os mesmos dados de entrada do pavimento flexível, valor de CBR e levantamento de tráfego. A estrutura do pavimento de concreto também não terá acostamento, por tratar-se de uma via urbana, onde foram executados canteiro central e calçadas de passeio, e estes não possuem nenhum tipo de ligação com o pavimento e as suas camadas subadjacentes. O pavimento de concreto terá barras de transferência, com diâmetro de 10 mm, devido à contribuição econômica que estas propiciam à estrutura, por possibilitarem a redução da espessura da camada de revestimento. Esta estrutura contará ainda, com uma camada de base de material granular tratado com cimento, com espessura de 10 cm.

A partir das informações supracitadas e consulta dos formulários-tipo, Anexos B a M foram dimensionados o Consumo de Fadiga para Análise da Fadiga e da Erosão do pavimento

para várias espessuras de revestimento. Sendo a que atendeu o preconizado pelo método da PCA (1984) foi a de 21 cm, conforme pode ser conferido na Tabela 10.

Tabela 10 - Tabela de cálculo própria

Projeto: Pesquisa IPR / Pavimentos Rígidos					
Espessura - tentativa:	<u>21</u>	cm		Sim	Não
Ksb	<u>100</u>	MPa/m		Juntas com BT:	<u>x</u>
Resistência característica à tração na flexão		<u>4,0</u>	MPa	Acostamento:	<u>x</u>
Fsc	<u>1,0</u>			Período de projeto	<u>20</u> anos

**EXEMPLO DE CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)**

Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DA FADIGA		ANÁLISE DA EROSÃO	
			nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<b>Eixos Simples</b>			<b>8 - Tensão equivalente</b>	<b><u>1.46</u></b>		
			<b>9 - Fator da fadiga</b>	<b><u>0.360</u></b>		
			<b>10 - Fator de erosão</b>	<b><u>2.74</u></b>		
< 5	5.0	-				
5 - 6	6.0	835,276.45	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
9 - 10	10.0	802,520.51	ilimitado	0,00	2,000,000	40.1260
<b>Eixos Tandem Duplo</b>			<b>11 - Tensão equivalente</b>	<b><u>1.22</u></b>		
			<b>12 - Fator da fadiga</b>	<b><u>0.300</u></b>		
			<b>13 - Fator de erosão</b>	<b><u>2.85</u></b>		
16 - 17	17	3,342	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
			<b>TOTAL</b>	<b>0,00</b>	<b>TOTAL</b>	<b>40.1260</b>

Fonte: Da autora.

O revestimento com espessura de 21 cm, resultou em 0,0% e 40,12% para o Consumo de Fadiga na Análise de Fadiga e Erosão, respectivamente. O método da PCA 84 recomenda que sejam utilizadas camadas de concreto com espessuras que alcancem valores próximos a 100% de Consumo de Fadiga, mas que não o ultrapassem. Considerando que os valores encontrados para camada de 21 cm se distanciam do limite estipulado, foram testados a espessura de 20 cm, objetivando maior economia para a implantação do pavimento rígido.

Contudo, esta camada, de 20 cm, ultrapassou o máximo previsto para o Consumo de Fadiga na Análise da Erosão, o que impossibilitou a adoção da mesma.

Com a espessura da placa de concreto definida, foram estimados os custos unitários dos materiais e mão de obra necessários para execução das camadas estruturais do pavimento rígido, conforme apresentado na Tabela 11. Como feito para o pavimento flexível, os valores foram referenciados pela tabela SINAPI de agosto de 2020, sem desoneração. Para o dimensionamento da execução da camada de pavimento de concreto simples (PCS) foi utilizado como base a composição 01, discriminada na Tabela 12, a qual foi retirada do caderno técnico de composições para pavimentos rígidos de concreto da Caixa Econômica Federal. A composição 01 teve os valores unitários total atualizados para a data base usada neste estudo de caso.

Tabela 11 - Estimativa de custo para implantação de pavimento rígido

CÓDIGO	MATERIAL	UNID.	QUANT.	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
96397	EXECUÇÃO DE BASE DE BRITA GRADUADA SIMPLES TRATADA COM CIMENTO	m <sup>3</sup>	2,768.61	137.73	381,320.66
COMP. 01	EXECUÇÃO DE PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLES (PCS), CAMADA COM ESPESSURA DE 21,0 CM	m <sup>2</sup>	17857	93.25	1,665,131.23
<b>TOTAL</b>					<b>2,046,451.89</b>

Fonte: Da autora.

Tabela 12 - Composição 01

<b>EXECUÇÃO DE PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLES (PCS), CAMADA COM ESPESSURA DE 21,0 CM</b>						
Item	Código	Descrição	Unid.	Coef.	Valor unit. total	Valor unit.
C	97114	EXECUÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO	M	0.2	0.36	0.07
I	6189	TABUA DE MADEIRA NAO APARELHADA *2,5 X 30* CM, CEDRINHO OU EQUIVALENTE DA REGIAO	M	0.0333	15.14	0.50
I	4517	SARRAFO DE MADEIRA NAO APARELHADA *2,5 X 7,5* CM (1 X 3") PINUS, MISTA OU EQUIVALENTE DA REGIAO	M	1.1667	1.24	1.45
I	2692	DESMOLDANTE PROTETOR PARA FORMAS DE MADEIRA, DE BASE OLEOSA EMULSIONADA EM AGUA	L	0.0023	4.94	0.01

(continua)

(continuação)

I	38405	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C25, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 130 +/- 20 MM, EXCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	M3	0.2225	316.49	70.42
C	88316	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0.2198	16.51	3.63
C	88309	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0.133	19.99	2.66
C	97120	BARRAS DE LIGAÇÃO, AÇO CA-50 DE 10 MM, PARA EXECUÇÃO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO	KG	0.3398	7.15	2.43
C	97115	APLICAÇÃO DE GRAXA EM BARRAS DE TRANSFERÊNCIA PARA EXECUÇÃO DE PAVIMENTO DE CONCRETO	KG	0.073	28.04	2.05
C	95270	RÉGUA VIBRATÓRIA DUPLA PARA CONCRETO, PESO DE 60 KG, COMPRIMENTO DE 4 M, COM MOTOR A GASOLINA, POTÊNCIA 5,5 HP - CHP DIURNO	CHP	0.0154	7.19	0.11
C	95271	RÉGUA VIBRATÓRIA DUPLA PARA CONCRETO, PESO DE 60 KG, COMPRIMENTO DE 4 M, COM MOTOR A GASOLINA, POTÊNCIA 5,5 HP - CHI DIURNO	CHI	0.0232	0.58	0.01
C	88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0.0574	19.84	1.14
I	39507	ARMAÇÃO PARA EXECUÇÃO DE RADIER, COM USO DE TELA Q-113	KG	0.018	11.76	0.21
C	92881	BARRAS DE TRANSFERÊNCIA, AÇO CA-25 DE 25,0 MM, PARA EXECUÇÃO DE PAVIMENTO DE CONCRETO - FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO	KG	1.2847	6.66	8.56
I	3777	LONA PLASTICA PRETA, E= 150 MICRA	M2	1.128	1.01	1.14
<b>TOTAL COMPOSIÇÃO</b>						<b>93.25</b>

Fonte: Caixa Econômica Federal (2019)

#### 4.3 Definição dos tipos e da frequência das manutenção para cada tipo de pavimento em um período de 20 anos

A periodicidade das manutenções, para os dois tipos de pavimento, foi verificada a partir do confrontamento dos resultados do tráfego previsto (n) e do admissível (N), calculados para todos os anos do período pré estabelecido. Sempre que o tráfego previsto para determinado ano superar o tráfego admissível, no mesmo ano será necessário executar um reforço.

Para o caso do pavimento flexível foram previstas manutenção corretiva em dois momentos do período de análise. A primeira, após 9 anos da liberação da pista para o tráfego, e a segunda, no 14º ano de uso da via, conforme demonstra a Tabela 13. Enquanto que para o

pavimento rígido, os valores do tráfego previsto não ultrapassaram os de tráfego admissível, no entanto, quando feito o cálculo de vida remanescente, utilizando o valor de  $N_p$  para a idade de 20 anos, resulta em um valor negativo, o que não é aceito pelo método utilizado. Desta forma, realizou-se o cálculo novamente utilizando o  $N_p$  de 19 anos, e chegou-se ao resultado de 6,67% de vida remanescente. Por consequência, estimou-se um reforço no 19º ano de uso da estrutura para o pavimento de concreto.

Tabela 13 - Dimensionamento do tráfego previsto e admissível para o pavimento flexível

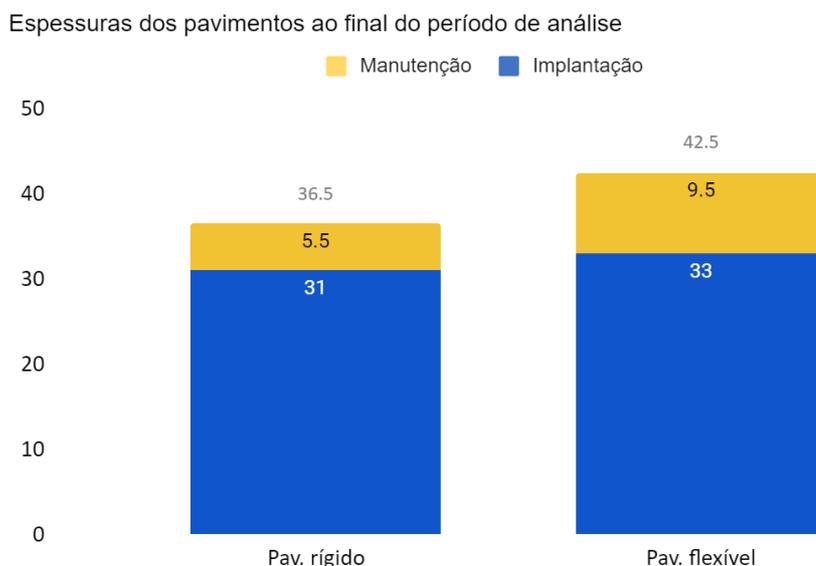
<b>Idade do pavimento</b>	<b>n (tráfego previsto)</b>	<b>N (tráfego admissível)</b>
1	$2,55 \times 10^5$	$1,83 \times 10^7$
2	$1,03 \times 10^6$	$1,83 \times 10^7$
3	$2,36 \times 10^6$	$1,83 \times 10^7$
4	$4,26 \times 10^6$	$1,83 \times 10^7$
5	$6,76 \times 10^6$	$1,83 \times 10^7$
6	$9,88 \times 10^6$	$1,83 \times 10^7$
7	$1,37 \times 10^7$	$1,83 \times 10^7$
8	$1,81 \times 10^7$	$1,83 \times 10^7$
9	$2,33 \times 10^7$	$1,83 \times 10^7$
10	$2,92 \times 10^7$	$5,30 \times 10^7$
11	$3,59 \times 10^7$	$5,30 \times 10^7$
12	$4,33 \times 10^7$	$5,30 \times 10^7$
13	$5,17 \times 10^7$	$5,30 \times 10^7$
14	$6,09 \times 10^7$	$5,30 \times 10^7$
15	$7,10 \times 10^7$	$5,30 \times 10^7$
16	$8,21 \times 10^7$	$5,30 \times 10^7$
17	$9,42 \times 10^7$	$5,30 \times 10^7$
18	$1,07 \times 10^8$	$5,30 \times 10^7$
19	$1,21 \times 10^8$	$5,30 \times 10^7$
20	$1,37 \times 10^8$	$5,30 \times 10^7$

Fonte: Da autora.

As manutenções dos pavimentos flexíveis e rígidos foram dimensionados de acordo com o guia da AASHTO (1993), e a solução adotada para o reforço dos pavimentos objeto do estudo de caso, foi o reforço em concreto asfáltico, que por sua vez permite a liberação da pista para uso no mesmo dia da sua execução. Esta escolha se deve ao fato de, a Avenida Benjamin Constant ser uma via consolidada no município e desempenhar a função de ligação entre diversos bairros do município de Lajeado.

As espessuras dos reforços previstos para o pavimento flexível foram de 4,77 cm e 4,23 cm para as idades de 9 e 14 anos, respectivamente. O reforço para o pavimento rígido alcançou 5,35 cm de espessura. Desta maneira, ao final do período analisado as estruturas dos pavimento flexível e rígido terão 42,5 cm e 36,5 cm de espessura, respectivamente. A Figura 8 demonstra a espessura de cada tipo de pavimento, onde a cor azul, das colunas do gráfico, representa a estrutura prevista em projeto e a cor amarela a dos reforços previstos ao longo de 20 anos.

Figura 8 - Espessura total dos pavimentos ao fim do período de análise



Fonte: Da autora.

A estimativa de custo das manutenções considerou apenas os materiais e a mão de obra necessários para execução da pintura de ligação e da camada de reforço da estrutura. Estes foram embasados pela Tabela SINAPI de agosto de 2020, sem desoneração, conforme é demonstrado nas Tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14 - Estimativa de custo para a primeira manutenção do pavimento flexível

<b>MANUTENÇÃO PAVIMENTO FLEXÍVEL - 5,0 CM</b>					
<b>CÓDIGO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>UNID.</b>	<b>QUANT.</b>	<b>VALOR UNIT.</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
96402	EXECUÇÃO DE PINTURA DE LIGAÇÃO COM EMULSÃO ASFÁLTICA RR-2C.	m <sup>2</sup>	17,857.00	1.69	30,178.33
95995	EXECUÇÃO DE PAVIMENTO COM APLICAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO, CAMADA DE ROLAMENTO	m <sup>3</sup>	892.85	1,097.93	980,286.80
<b>TOTAL</b>					<b>1,010,465.13</b>

Fonte: Da autora.

Tabela 15 - Estimativa de custo para a segunda manutenção do pavimento flexível

<b>MANUTENÇÃO PAVIMENTO FLEXÍVEL - 4,5 CM</b>					
<b>CÓDIGO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>UNID.</b>	<b>QUANT.</b>	<b>VALOR UNIT.</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
96402	EXECUÇÃO DE PINTURA DE LIGAÇÃO COM EMULSÃO ASFÁLTICA RR-2C.	m <sup>2</sup>	17,857.00	1.69	30,178.33
95995	EXECUÇÃO DE PAVIMENTO COM APLICAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO, CAMADA DE ROLAMENTO	m <sup>3</sup>	803.57	1,097.93	882,258.12
<b>TOTAL</b>					<b>912,436.45</b>

Fonte: Da autora.

Tabela 16 - Estimativa de custo para a primeira manutenção do pavimento rígido

<b>MANUTENÇÃO PAVIMENTO RÍGIDO - 5,5 CM</b>					
<b>CÓDIGO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>UNID.</b>	<b>QUANT.</b>	<b>VALOR UNIT.</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
96402	EXECUÇÃO DE PINTURA DE LIGAÇÃO COM EMULSÃO ASFÁLTICA RR-2C.	m <sup>2</sup>	17,857.00	1.69	30,178.33
95995	EXECUÇÃO DE PAVIMENTO COM APLICAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO, CAMADA DE ROLAMENTO	m <sup>3</sup>	982.14	1,097.93	1,078,315.48
<b>TOTAL</b>					<b>1,108,493.81</b>

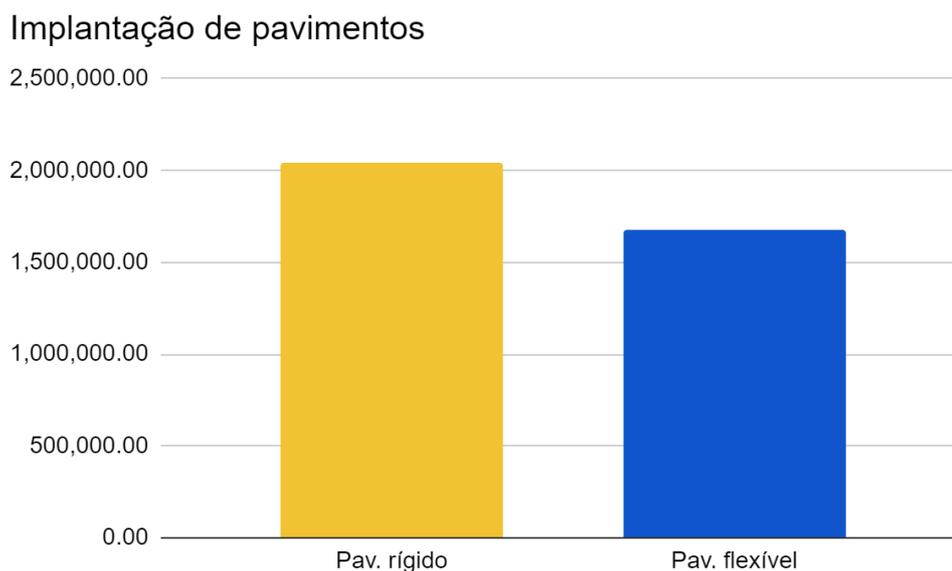
Fonte: Da autora.

#### 4.4 Análise dos custos de construção e manutenção dos pavimentos estudados

A estimativa de custo para os dois tipos de pavimento, teve como base a área de 17.857,00 m<sup>2</sup> do projeto existente e os valores unitários da tabela referencial SINAPI de agosto de 2020, sem desoneração. Desta forma, no orçamento inicial, contemplando apenas os materiais de cada camada e a mão de obra necessária para execução das mesmas, chegou-se

aos custos de R\$ 2.046.451,89 e R\$ 1.674.645,66 para os pavimentos rígidos e flexíveis, respectivamente (FIGURA 9).

Figura 9 - Valores para implantação dos pavimentos



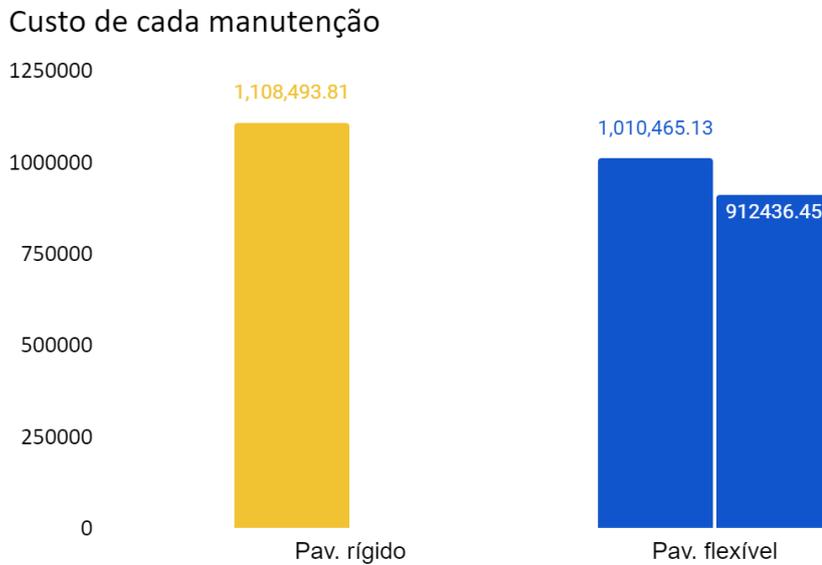
Fonte: Da autora.

As manutenções para cada tipo de pavimento, são do tipo corretiva e preveem a execução de recapeamento asfáltico, em camada única. No caso do pavimento rígido, foi previsto uma única manutenção ao longo do período analisado, no 19º ano de uso do pavimento, com espessura de 5,35 cm. No entanto, para a estimativa do seu custo, R\$ 1.108.493,81, considerou-se a espessura de 5,5 cm, com o intuito de facilitar a aferição no momento da execução e a aplicação de uma película de material betuminoso sobre a superfície do pavimento existente, visando promover a aderência entre esta camada e o revestimento a ser executado.

A previsão das manutenções para o pavimento flexível se deram no 9º ano e no 14º ano após a construção da via e obedeceram aos mesmos critérios utilizados no pavimento rígido. As espessuras do recapeamento para reforço foram corrigidas, de 4,77 cm e 4,22 para 5,0 cm e 4,5 cm. Os custos para o primeiro recapeamento atingiu R\$ 1.010.465,13 e o segundo R\$ 912.436,45, totalizando um investimento de R\$ 1.922.901,58, valor presente, a ser destinado unicamente para manutenções corretivas. A Figura 10 apresenta os valores de cada manutenção prevista para os pavimentos estudados e a Figura 11 demonstra o custo

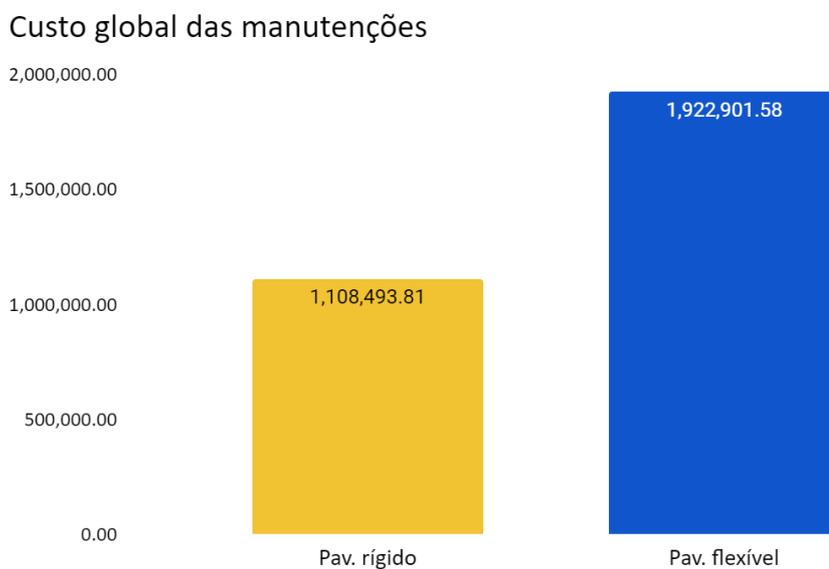
global das manutenções estimadas para o período de 20 anos de cada tipo de pavimento. Para a estimativa das manutenções dos pavimentos flexíveis e rígidos foram utilizadas as mesmas composições da tabela Sinapi de agosto de 2020, sem desoneração, variando apenas os quantitativos, considerando as espessuras de cada camada.

Figura 10 - Valores para cada manutenção de cada tipo de pavimento



Fonte: Da autora.

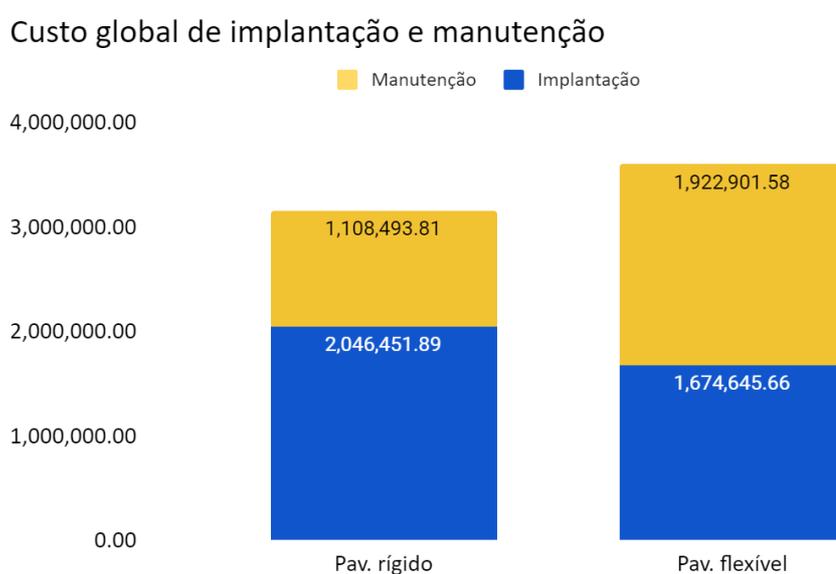
Figura 11 - Valores global das manutenção de cada pavimento



Fonte: Da autora.

Ao fim do período de análise, os custos, valor presente líquido, de implantação e manutenção para o pavimento rígido chegou a R\$ 3.154.945,70, sendo R\$ 2.046.451,89 relativos à implantação e R\$ 1.674.645,66 ao reforço. O pavimento flexível teve um custo para implantação menor, se comparado com o rígido, R\$ 1.674.645,66, porém o gasto previsto para as suas manutenções superam em 57,65% a do pavimento de concreto. Se somados, os dois reforços previstos, alcança-se a importância de R\$ 3.597.547,24, conforme demonstra a Figura 12, a cor azul representa o custo de implantação, enquanto a cor amarela o de manutenção.

Figura 12 - Custo total para implantação e manutenção dos pavimentos



Fonte: Da autora.

#### 4.5 Análise do custo-benefício dos pavimentos

Considerando as análises realizadas, pode-se observar que o pavimento rígido possui maior custo de implantação, quando comparado com o pavimento flexível, porém este tipo de pavimento requer manutenções com menor frequência, o que o torna menos oneroso ao longo do tempo. No período analisado, 20 anos, se fizeram necessárias duas manutenções para o pavimento flexível e apenas uma para o rígido, acarretando um custo superior de 14,03% para o pavimento flexível, considerando a implantação e as manutenções.

As manutenções previstas, para os dois tipos de pavimento, são do tipo corretivas e foram dimensionadas considerando a execução de uma camada de reforço em concreto asfáltico. A escolha deste tipo de concreto se deu devido a rapidez com que ocorre a execução dos serviços e a possibilidade de liberação da via para uso em um curto intervalo de tempo, visto que o trecho em análise da Avenida Benjamin não possui rotas alternativas para a trafegabilidade dos seus usuários. Sendo esta uma importante via de ligação entre bairros do município de Lajeado-RS.

Neste estudo de caso, a implantação do pavimento rígido se mostrou a alternativa mais viável, tanto pela durabilidade, quanto pelo custo a longo prazo. A durabilidade é garantida pela capacidade da placa de concreto em absorver as tensões aplicadas sobre a estrutura, e os custos tornam-se mais atrativos quando analisados o investimento necessário para manter a estrutura em condições de boa trafegabilidade ao longo de 20 anos, por demandar menor quantidade de manutenções.

## 5 CONCLUSÃO

A pavimentação de vias garante aos seus usuários inúmeros benefícios, a citar, conforto e segurança. Para tanto, busca-se executar pavimentos de boa qualidade, com o melhor custo benefício, a partir da escolha do tipo de estrutura e dos materiais constituintes adequados para cada caso.

Neste contexto, o presente trabalho objetivou a análise da economicidade entre a construção de pavimento flexível e rígido, de um trecho de 1.170m de extensão da Avenida Benjamin Constant no município de Lajeado-RS, bem como as manutenções necessárias em um período de 20 anos. A análise foi realizada através da interpretação dos projetos executivos do pavimento flexível, do dimensionamento do pavimento rígido pelo método da PCA de 1984 e da estimativa das manutenções para os pavimentos em estudo, tendo como base o método da AASHTO (1993).

Através da aplicação da metodologia escolhida, verificou-se que a estrutura de implantação do pavimento rígido (31 cm) é sensivelmente menor do que a do pavimento flexível (33 cm), ainda que ambas estejam submetidas às mesmas ações e solicitações. Porém, o custo estimado para o pavimento rígido é 22,2% maior do que para a execução do pavimento flexível.

A previsão das manutenções contempla a execução de uma camada de reforço de concreto asfáltico e caracteriza-se por ser do tipo corretiva. Para o período definido, foram necessários dois recapeamentos para o pavimento flexível e um para o pavimento rígido, atingindo ao final deste, camadas de 9,5 cm e 5,5 cm de espessura, respectivamente. Os custos

das intervenções previstas para o pavimento flexível superou a do pavimento rígido em 73,5%.

Considerando apenas os custos de implantação, o pavimento flexível tem maior atratividade, no entanto, esta estrutura requer manutenção do tipo corretiva a curto prazo. No 9º ano após a implantação, ou seja, antes do término do período de projeto, que para o caso é de 10 anos, é necessário despender recursos para manutenção, e esta alcança 60,34% do custo de implantação. Após cinco anos da primeira manutenção, há a necessidade de um segundo recapeamento, demandando mais 54,49% do custo inicial, ao fim do período de análise as manutenções para o pavimento de concreto asfáltico superaram em 14,82% o custo de implantação.

Deste modo, o pavimento flexível torna-se menos atrativo economicamente quando comparado ao pavimento rígido, que exige a primeira manutenção corretiva somente no 19º ano de vida da estrutura. E esta manutenção demanda 54,17% do custo de implantação do pavimento. Analisando o custo global para implantação e manutenção, no período de 20 anos, o pavimento asfáltico supera em 14,03% o pavimento de concreto.

Com base no levantamento bibliográfico, nas análises realizadas e nas características apresentadas em cada projeto para a implantação de pavimento em um trecho da Avenida Benjamin Constant, conclui-se que o pavimento rígido é a melhor opção quando comparado ao pavimento flexível.

Entretanto, a execução de pavimento de concreto é pouco empregada em nosso país, devido à falta de mão de obra capacitada, de maquinário adequado e de conhecimentos específicos, contribuindo assim, para que o pavimento flexível seja o mais utilizado atualmente.

Por fim, é importante salientar que a execução de pavimentos de concreto poderá atenuar as deficiências estruturais presentes em vias urbanas, principalmente nas classificadas como arteriais, que aportam maior quantidade de tráfego, devido a sua maior durabilidade, conforme exposto nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

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

\_\_\_\_\_. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BIANCHI, F. R., BRITTO, I. R. T., CASTRO, V. A. Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível. Anais do 50º Congresso Brasileiro de Concreto. Salvador, set. 2008. Disponível em: <[http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav\\_apresentacoes/isis\\_raquel.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2020.

BRANCO, F.; SANTOS, L. P.; PEREIRA, P. Pavimentos rodoviários. São Paulo: Almedina, 2016.

CARVALHO, M. D. Pavimentação de concreto: Reduzindo o custo social. **Vias Concretas**. São Paulo, v. 1, n. 17, Mar. 2007. Disponível em: <[http://viasconcretas.com.br/wp-content/uploads/2013/02/2007\\_Artigo\\_Pavimento-de-concreto\\_Reduzindo-o-custo-social.pdf](http://viasconcretas.com.br/wp-content/uploads/2013/02/2007_Artigo_Pavimento-de-concreto_Reduzindo-o-custo-social.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2020.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Dosagem de concreto asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7ª edição. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada. 14/08/2018. Disponível em: <http://www.cnt.org.br>>. Acesso em ago 2020.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentos Rígidos**. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **031/2004 - ES: Pavimentação: Concreto asfáltico**. Rio de Janeiro, 2006a.

\_\_\_\_\_. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006b.

\_\_\_\_\_. **Manual de Recuperação de Pavimentos Rígidos**. Rio de Janeiro, 2010a.

\_\_\_\_\_. **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010b.

\_\_\_\_\_. **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010c.

\_\_\_\_\_. **Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2017.

LANDIM, Alex Iury Vidal. Et al. **Análise comparativa de viabilidade técnica e econômica entre as pavimentações rígida e flexível**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 06, Vol. 07, pp. 14-27. Junho de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/viabilidade-tecnica>

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

PESSOA Junior, E. **Manual de obras rodoviárias e pavimentação urbana**. 1ª edição. São Paulo: Pini, 2014.

RODRIGUES, J. L. A. **Concepção de Pavimentos Rígidos**. [s. l.], 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63481/1/000149988.pdf>. Acesso em: 2 jun.2020.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1ª edição. São Paulo: Pini, 2001.

\_\_\_\_\_. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2ª edição. São Paulo: Pini, 2007.

## **ANEXOS**

## ANEXO A - Planilha para cálculo da espessura do pavimento de concreto

Projeto: Pesquisa IPR / Pavimentos Rígidos

Espessura-tentativa: \_\_\_\_\_ cm

Juntas com BT: sim \_\_\_\_\_ não \_\_\_\_\_

K<sub>sb</sub> \_\_\_\_\_ MPa/m

Acostamento de concreto: sim \_\_\_\_\_ não \_\_\_\_\_

Resistência característica à tração na flexão \_\_\_\_\_ Mpa Período de projeto \_\_\_\_\_ anos Fator de segurança de cargas, F<sub>sc</sub> \_\_\_\_\_

EXEMPLO DE CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)						
Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x F <sub>sc</sub> (tf)	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSÃO	
			nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<b>Eixos Simples</b>			(8) Tensão equivalente _____ (9) Fator da fadiga _____		(10) Fator de Erosão _____	
< 5	6,0					
5 - 6	7,2					
6 - 7	8,4					
7 - 8	9,6					
8 - 9	10,8					
9 - 10	12,0					
10 - 11	13,2					
11 - 12	14,4					
12 - 13	15,6					
13 - 14	16,8					
14 - 15	18,0					
15 - 16	19,2					
<b>Eixos Tandem Duplos</b>			(11) Tensão equivalente _____ (13) Fator de fadiga _____		(12) Fator de erosão _____	
< 13	15,6					
13 - 14	16,8					
14 - 15	18,0					
15 - 16	19,2					
16 - 17	20,4					
17 - 18	21,6					
18 - 19	22,8					
19 - 20	24,0					
20 - 21	25,2					
21 - 22	26,4					
22 - 23	27,6					
23 - 24	28,8					
<b>Eixos Tandem Triplos</b>			(14) Tensão equivalente _____ (16) Fator de fadiga _____		(15) Fator de erosão _____	
< 24	9,6					
24 - 26	10,4					
26 - 28	11,2					
28 - 30	12,0					
			<b>TOTAL</b>		<b>TOTAL</b>	

Fonte: DNIT (2005).

Anexo B - Tensão Equivalente para Eixos Simples e Tandem Duplo (MPa) PSAC (pavimento sem acostamento de concreto)

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

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Anexo C - Tensão Equivalente para Eixos Tandem Triplos (MPa) PSAC (pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)							
	20	40	60	80	140	180		
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	2,60	2,30	2,20	2,14	2,08	2,07		
13	2,35	2,04	1,93	1,87	1,80	1,78		
14	2,15	1,83	1,72	1,65	1,58	1,55		
15	1,99	1,67	1,55	1,48	1,40	1,37		
16	1,85	1,54	1,41	1,34	1,25	1,23		
17	1,73	1,43	1,30	1,23	1,14	1,11		
18	1,62	1,34	1,21	1,14	1,04	1,01		
19	1,53	1,26	1,13	1,06	0,96	0,92		
20	1,45	1,19	1,07	0,99	0,89	0,85		
21	1,37	1,13	1,01	0,93	0,83	0,79		
22	1,30	1,07	0,95	0,88	0,78	0,74		
23	1,24	1,02	0,91	0,84	0,73	0,70		
24	1,18	0,97	0,87	0,80	0,69	0,66		
25	1,13	0,93	0,83	0,76	0,66	0,62		
26	1,07	0,89	0,79	0,73	0,63	0,59		
27	1,02	0,86	0,76	0,70	0,60	0,57		
28	0,98	0,82	0,73	0,67	0,58	0,54		
29	0,93	0,79	0,71	0,65	0,55	0,52		
30	0,89	0,76	0,68	0,63	0,53	0,50		
31	0,85	0,73	0,66	0,60	0,51	0,48		
32	0,81	0,70	0,63	0,58	0,50	0,46		
33	0,77	0,68	0,61	0,56	0,48	0,45		
34	0,73	0,65	0,59	0,55	0,46	0,43		

ETT: Eixos Tandem Triplos

Anexo D - Tensão Equivalente para Eixos Simples e Tandem Duplo (Mpa) PCAC (pavimento com acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		180	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,36	2,82	2,95	2,46	2,74	2,31	2,60	2,22	2,49	2,16	2,31	2,08	2,19	2,04
13	3,02	2,56	2,66	2,22	2,47	2,08	2,34	1,99	2,25	1,94	2,09	1,86	1,99	1,81
14	2,74	2,34	2,41	2,02	2,24	1,89	2,13	1,80	2,05	1,75	1,91	1,67	1,82	1,62
15	2,50	2,15	2,20	1,85	2,05	1,72	1,95	1,64	1,88	1,59	1,75	1,51	1,67	1,46
16	2,29	1,99	2,02	1,71	1,88	1,58	1,80	1,51	1,73	1,46	1,61	1,38	1,55	1,33
17	2,11	1,85	1,86	1,58	1,74	1,46	1,66	1,39	1,60	1,34	1,49	1,26	1,43	1,21
18	1,96	1,72	1,73	1,47	1,61	1,35	1,54	1,29	1,48	1,24	1,39	1,16	1,33	1,12
19	1,82	1,62	1,61	1,38	1,50	1,27	1,43	1,20	1,38	1,16	1,29	1,08	1,24	1,04
20	1,70	1,52	1,50	1,29	1,40	1,19	1,34	1,13	1,29	1,08	1,21	1,01	1,16	0,97
21	1,59	1,44	1,40	1,22	1,31	1,12	1,26	1,06	1,21	1,02	1,13	0,95	1,09	0,91
22	1,49	1,36	1,32	1,15	1,23	1,06	1,18	1,00	1,14	0,96	1,07	0,89	1,02	0,86
23	1,40	1,29	1,24	1,09	1,16	1,00	1,11	0,95	1,07	0,91	1,01	0,84	0,97	0,81
24	1,32	1,23	1,17	1,04	1,10	0,95	1,05	0,90	1,01	0,86	0,95	0,80	0,91	0,76
25	1,25	1,18	1,11	0,99	1,04	0,91	0,99	0,85	0,96	0,82	0,90	0,76	0,87	0,73
26	1,19	1,12	1,05	0,95	0,98	0,87	0,94	0,81	0,91	0,78	0,86	0,72	0,82	0,69
27	1,13	1,08	1,00	0,91	0,93	0,83	0,89	0,78	0,86	0,84	0,81	0,69	0,78	0,66
28	1,07	1,03	0,95	0,87	0,89	0,79	0,85	0,74	0,82	0,71	0,78	0,66	0,75	0,63
29	1,02	0,99	0,91	0,84	0,85	0,76	0,81	0,71	0,78	0,68	0,74	0,63	0,71	0,60
30	0,98	0,95	0,87	0,81	0,81	0,73	0,77	0,69	0,75	0,66	0,71	0,61	0,68	0,58
31	0,93	0,92	0,83	0,78	0,77	0,71	0,74	0,66	0,72	0,63	0,68	0,58	0,65	0,55
32	0,90	0,89	0,79	0,75	0,74	68,00	0,71	0,64	0,69	0,61	0,65	0,56	0,62	0,53
33	0,86	0,86	0,76	0,92	0,71	0,66	0,68	0,61	0,66	0,59	0,62	0,54	0,60	0,51
34	0,83	0,83	0,73	0,70	0,69	0,63	0,66	0,59	0,63	0,57	0,60	0,52	0,57	0,49

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Anexo E - Tensão Equivalente para Eixos Tandem Triplos (Mpa) PCAC (pavimento com acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (Mpa/m)						
	20	40	60	80	140	180	
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	2,60	2,00	1,93	1,89	1,85	1,85	1,85
13	1,97	1,78	1,70	1,66	1,61	1,61	1,61
14	1,78	1,59	1,52	1,48	1,43	1,42	1,42
15	1,62	1,44	1,37	1,30	1,27	1,26	1,26
16	1,49	1,32	1,24	1,20	1,15	1,13	1,13
17	1,38	1,21	1,14	1,10	1,15	1,03	1,03
18	1,28	1,12	1,05	1,01	1,04	0,94	0,94
19	1,19	1,04	0,98	0,94	0,96	0,86	0,86
20	1,12	0,98	0,91	0,87	0,88	0,80	0,80
21	1,05	0,92	0,85	0,81	0,82	0,74	0,74
22	0,99	0,86	0,80	0,76	0,76	0,69	0,69
23	0,93	0,81	0,76	0,72	0,71	0,65	0,65
24	0,88	0,77	0,71	0,68	0,67	0,61	0,61
25	0,84	0,73	0,68	0,64	0,63	0,57	0,57
26	0,79	0,70	0,64	0,61	0,59	0,54	0,54
27	0,75	0,66	0,61	0,58	0,56	0,52	0,52
28	0,72	0,63	0,59	0,56	0,53	0,49	0,49
29	0,68	0,60	0,56	0,53	0,51	0,47	0,47
30	0,65	0,58	0,54	0,51	0,49	0,45	0,45
31	0,62	0,55	0,51	0,49	0,46	0,43	0,43
32	0,59	0,53	0,49	0,47	0,44	0,41	0,41
33	0,57	0,51	0,47	0,45	0,41	0,39	0,39
34	0,54	0,49	0,46	0,43	0,39	0,38	0,38

ETT: Eixos Tandem Triplos

Anexo F - Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PSAC (Juntas sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)																				
	20			40			60			80			100			150			200		
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD			
12	2,72	3,82	3,69	3,74	3,67	3,69	3,65	3,67	3,64	3,65	3,63	3,61	3,65	3,63	3,61	3,59	3,58				
13	3,62	3,75	3,59	3,66	3,57	3,61	3,55	3,59	3,54	3,57	3,52	3,52	3,57	3,52	3,52	3,49	3,49				
14	3,53	3,68	3,50	3,59	3,48	3,53	3,46	3,51	3,45	3,49	3,43	3,44	3,49	3,43	3,44	3,40	3,41				
15	3,45	3,61	3,41	3,52	3,39	3,46	3,37	3,44	3,36	3,42	3,34	3,37	3,42	3,34	3,37	3,31	3,34				
16	3,37	3,55	3,33	3,46	3,31	3,40	3,29	3,37	3,28	3,35	3,26	3,30	3,35	3,26	3,30	3,23	3,26				
17	3,30	3,50	3,26	3,40	3,23	3,34	3,21	3,31	3,20	3,29	3,18	3,23	3,29	3,18	3,23	3,16	3,20				
18	3,23	3,44	3,18	3,34	3,16	3,28	3,14	3,25	3,13	3,23	3,11	3,17	3,23	3,11	3,17	3,09	3,13				
19	3,17	3,39	3,12	3,29	3,09	3,23	3,07	3,19	3,06	3,17	3,04	3,11	3,17	3,04	3,11	3,02	3,07				
20	3,11	3,35	3,05	3,24	3,03	3,17	3,01	3,14	3,00	3,12	2,98	3,05	3,12	2,98	3,05	2,96	3,02				
21	3,05	3,30	2,99	3,19	2,97	3,13	2,95	3,09	2,94	3,07	2,92	3,00	3,07	2,92	3,00	2,90	2,96				
22	3,00	3,26	2,94	3,15	2,91	3,08	2,89	3,04	2,88	3,02	2,86	2,85	3,02	2,86	2,85	2,84	2,91				
23	2,94	3,22	2,88	3,11	2,85	3,03	2,83	2,99	2,82	2,97	2,80	2,90	2,97	2,80	2,90	2,78	2,86				
24	2,90	3,18	2,84	3,07	2,80	2,99	2,78	2,95	2,77	2,93	2,75	2,86	2,93	2,75	2,86	2,73	2,82				
25	2,86	3,14	2,78	3,03	2,76	2,96	2,73	2,91	2,72	2,89	2,70	2,82	2,89	2,70	2,82	2,68	2,78				
26	2,81	3,11	2,75	2,99	2,71	2,92	2,69	2,88	2,68	2,86	2,65	2,71	2,86	2,65	2,71	2,63	2,74				
27	2,77	3,08	2,70	2,96	2,67	2,89	2,64	2,84	2,63	2,82	2,61	2,75	2,82	2,61	2,75	2,59	2,71				
28	2,73	3,05	2,66	2,93	2,62	2,85	2,60	2,81	2,59	2,79	2,56	2,71	2,79	2,56	2,71	2,54	2,67				
29	2,70	3,02	2,62	2,90	2,58	2,82	2,56	2,78	2,55	2,75	2,52	2,68	2,75	2,52	2,68	2,50	2,64				
30	2,66	2,99	2,59	2,86	2,54	2,79	2,51	2,75	2,50	2,72	2,48	2,64	2,72	2,48	2,46	2,46	2,60				
31	2,63	2,96	2,55	2,83	2,50	2,76	2,48	2,72	2,47	2,69	2,44	2,61	2,69	2,44	2,61	2,42	2,57				
32	2,59	2,93	2,51	2,81	2,47	2,73	2,44	2,69	2,43	2,66	2,40	2,58	2,66	2,40	2,58	2,38	2,54				
33	2,56	2,90	2,48	2,78	2,43	2,70	2,40	2,66	2,39	2,63	2,36	2,55	2,63	2,36	2,55	2,34	2,51				
34	2,53	2,88	2,45	2,75	2,40	2,67	2,37	2,63	2,36	2,60	2,32	2,52	2,60	2,32	2,52	2,30	2,48				

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT (2005).

Anexo G - Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PSAC (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)						
	20	40	60	80	140	180	
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	
12	3,85	3,75	3,70	3,66	3,57	3,53	
13	3,77	3,68	3,62	3,58	3,50	3,45	
14	3,70	3,60	3,55	3,51	3,42	3,38	
15	3,64	3,54	3,48	3,44	3,36	3,32	
16	3,58	3,47	3,42	3,38	3,29	3,25	
17	3,52	3,42	3,36	3,32	3,23	3,19	
18	3,47	3,36	3,30	3,26	3,18	3,14	
19	3,42	3,31	3,25	3,21	3,13	3,09	
20	3,37	3,26	3,20	3,16	3,08	3,04	
21	3,33	3,22	3,16	3,11	3,03	2,99	
22	3,29	3,18	3,11	3,07	2,99	2,95	
23	3,25	3,13	3,07	3,03	2,94	2,91	
24	3,21	3,10	3,03	2,99	2,90	2,86	
25	3,17	3,06	2,99	2,95	2,87	2,83	
26	3,14	3,02	2,96	2,91	2,83	2,79	
27	3,10	2,99	2,92	2,88	2,79	2,75	
28	3,07	2,96	2,89	2,85	2,76	2,72	
29	3,04	2,92	2,86	2,81	2,73	2,69	
30	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65	
31	2,98	2,87	2,80	2,75	2,66	2,62	
32	2,96	2,84	2,77	2,72	2,63	2,59	
33	2,93	2,81	2,74	2,70	2,61	2,57	
34	2,91	2,81	2,72	2,67	2,58	2,54	

ETT: Eixos Tandem Triplos

ETT: Eixos Tandem Triplos

Anexo H - Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PCAC (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (Mpa/m)													
	20		40		60		80		100		150		200	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,25	3,29	3,20	3,19	3,18	3,13	3,17	3,11	3,16	3,09	3,13	3,04	3,11	3,03
13	3,16	3,23	3,11	3,12	3,09	3,06	3,08	3,04	3,06	3,02	3,03	2,97	3,01	2,95
14	3,08	3,17	3,03	3,06	3,00	2,99	2,99	2,97	2,98	2,95	2,95	2,90	2,93	2,87
15	3,00	3,11	2,95	3,00	2,92	2,93	2,91	2,91	2,90	2,88	2,87	2,83	2,85	2,80
16	2,93	3,06	2,88	2,94	2,85	2,88	2,84	2,85	2,82	2,82	2,79	2,77	2,77	2,74
17	2,87	3,01	2,81	2,89	2,78	2,82	2,77	2,79	2,75	2,77	2,72	2,71	2,70	2,68
18	2,80	2,97	2,74	2,84	2,71	2,77	2,70	2,74	2,69	2,71	2,66	2,65	2,64	2,62
19	2,74	2,92	2,68	2,80	2,65	2,72	2,64	2,69	2,62	2,66	2,59	2,60	2,57	2,57
20	2,69	2,88	2,62	2,76	2,59	2,68	2,58	2,64	2,56	2,62	2,53	2,55	2,51	2,51
21	2,63	2,84	2,57	2,71	2,53	2,64	2,52	2,60	2,51	2,57	2,48	2,50	2,46	2,47
22	2,58	2,80	2,51	2,68	2,48	2,59	2,47	2,56	2,45	2,53	2,42	2,46	2,40	2,42
23	2,53	2,77	2,46	2,64	2,43	2,55	2,42	2,51	2,40	2,48	2,37	2,41	2,35	2,37
24	2,48	2,74	2,42	2,60	2,38	2,52	2,37	2,48	2,36	2,45	2,33	2,31	2,31	2,33
25	2,44	2,71	2,37	2,57	2,34	2,49	2,33	2,45	2,31	2,42	2,28	2,34	2,26	2,29
26	2,40	2,68	2,33	2,54	2,30	2,46	2,28	2,41	2,27	2,38	2,24	2,31	2,22	2,25
27	2,36	2,65	2,29	2,51	2,26	2,43	2,24	2,38	2,22	2,35	2,20	2,27	2,17	2,21
28	2,33	2,62	2,25	2,49	2,22	2,40	2,20	2,35	2,18	2,32	2,16	2,24	2,13	2,18
29	2,29	2,60	2,22	2,46	2,18	2,37	2,16	2,33	2,14	2,30	2,12	2,21	2,09	2,14
30	2,26	2,57	2,18	2,43	2,15	2,53	2,12	2,30	2,11	2,27	2,08	2,18	2,06	2,11
31	2,22	2,55	2,15	2,41	2,11	2,32	2,09	2,27	2,07	2,24	2,04	2,15	2,02	2,07
32	2,19	2,52	2,11	2,38	2,08	2,29	2,05	2,25	2,03	2,22	2,01	2,13	1,98	2,04
33	2,16	2,50	2,08	2,36	2,04	2,27	2,02	2,22	2,00	2,19	1,99	2,10	1,95	2,01
34	2,13	2,48	2,05	2,34	2,01	2,25	1,98	2,20	1,97	2,17	1,94	2,07	1,92	1,98

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Anexo I - Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PCAC (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (Mpa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,29	3,18	3,12	3,09	3,02	2,99
13	3,23	3,11	3,05	30,10	2,94	2,91
14	3,17	3,04	2,98	2,94	2,87	2,83
15	3,12	2,99	2,92	2,88	2,80	2,77
16	3,08	2,94	2,87	2,82	2,74	2,70
17	3,03	2,89	2,82	2,77	2,69	2,65
18	2,99	2,85	2,77	2,72	2,60	2,60
19	2,96	2,81	2,73	2,68	2,59	2,55
20	2,93	2,77	2,69	2,64	2,54	2,50
21	2,89	2,74	2,65	2,60	2,50	2,46
22	2,87	2,71	2,62	2,56	2,47	2,42
23	2,84	2,68	2,59	2,53	2,43	2,38
24	2,81	2,65	2,56	2,50	2,40	2,35
25	2,79	2,62	2,53	2,47	2,37	2,29
26	2,77	2,60	2,50	2,44	2,34	2,26
27	2,74	2,57	2,48	2,39	2,31	2,23
28	2,72	2,55	2,46	2,37	2,28	2,20
29	2,70	2,53	2,43	2,35	2,26	2,20
30	2,68	2,51	2,41	2,33	2,23	2,18
31	2,67	2,49	2,39	2,31	2,21	2,16
32	2,65	2,47	2,37	2,29	2,19	2,13
33	2,63	2,45	2,35	2,27	2,17	2,11
34	2,61	2,43	2,33	2,27	2,15	2,09

ETT: Eixos Tandem Triplos

Anexo J - Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PCAC (Junta com barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

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

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT (2005).

Anexo K - Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PCAC (Junta com barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (Mpa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,68	3,60	3,56	3,52	3,45	3,40
13	3,60	3,51	3,47	3,44	3,37	3,33
14	3,53	3,43	3,39	3,36	3,29	3,26
15	3,47	3,36	3,31	3,28	3,22	3,19
16	3,41	3,30	3,25	3,21	3,15	3,12
17	3,35	3,24	3,19	3,15	3,08	3,05
18	3,30	3,19	3,13	3,09	3,02	2,99
19	3,25	3,14	3,08	3,04	2,96	2,93
20	3,21	3,09	3,03	2,99	2,91	2,88
21	3,16	3,05	2,99	2,94	2,86	2,83
22	3,12	3,01	2,94	2,90	2,82	2,78
23	3,08	2,97	2,90	2,86	2,77	2,74
24	3,05	2,93	2,86	2,82	2,73	2,69
25	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65
26	2,98	2,86	2,79	2,74	2,66	2,62
27	2,94	2,82	2,76	2,71	2,66	2,58
28	2,91	2,79	2,72	2,68	2,59	2,55
29	2,88	2,76	2,69	2,65	2,55	2,51
30	2,85	2,73	2,66	2,62	2,52	2,48
31	2,82	2,70	2,63	2,59	2,49	2,45
32	2,80	2,68	2,61	2,56	2,46	2,42
33	2,77	2,65	2,58	2,53	2,44	2,40
34	2,74	2,62	2,55	2,50	2,41	2,37

ETT: Eixos Tandem Triplos

Anexo L - Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PCAC (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)																	
	20		40		60		80		100		150		180					
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD				
12	3,07	3,09	3,02	2,99	3,00	2,93	2,97	2,90	2,96	2,88	2,94	2,84	2,92	2,83				
13	2,97	3,02	2,92	2,92	2,90	2,86	2,87	2,83	2,86	2,80	2,84	2,76	2,82	2,74				
14	2,88	2,96	2,83	2,85	2,81	2,79	2,78	2,76	2,77	2,73	2,75	2,68	2,73	2,66				
15	2,80	2,89	2,75	2,79	2,73	2,72	2,70	2,69	2,69	2,66	2,67	2,61	2,65	2,59				
16	2,72	2,84	2,67	2,73	2,65	2,66	2,62	2,63	2,61	2,60	2,59	2,55	2,57	2,52				
17	2,64	2,78	2,60	2,68	2,58	2,60	2,55	2,57	2,54	2,54	2,52	2,48	2,49	2,45				
18	2,57	2,73	2,53	2,62	2,51	2,55	2,48	2,51	2,47	2,48	2,45	2,42	2,42	2,39				
19	2,51	2,69	2,47	2,57	2,44	2,50	2,41	2,46	2,40	2,43	2,38	2,73	2,36	2,33				
20	2,44	2,64	2,41	2,53	2,38	2,45	2,35	2,41	2,34	2,38	2,32	2,31	2,29	2,28				
21	2,38	2,60	2,35	2,48	2,32	2,40	2,29	2,36	2,28	2,33	2,26	2,26	2,23	2,22				
22	2,33	2,56	2,30	2,44	2,27	2,36	2,24	2,32	2,23	2,29	2,21	2,21	2,18	2,17				
23	2,27	2,52	2,24	2,40	2,21	2,31	2,18	2,27	2,17	2,24	2,15	2,17	2,12	2,12				
24	2,23	2,48	2,10	2,36	2,16	2,28	2,13	2,24	2,12	2,20	2,10	2,13	2,07	2,08				
25	2,18	2,43	2,14	2,33	2,11	2,24	2,09	2,20	2,08	2,17	2,05	2,09	2,02	2,03				
26	2,14	2,39	2,09	2,29	2,06	2,21	2,04	2,17	2,03	2,13	2,01	2,06	1,97	1,99				
27	2,19	2,35	2,05	2,26	2,02	2,17	2,00	2,13	1,99	2,10	1,96	2,03	1,93	1,95				
28	2,06	2,32	2,01	2,23	1,98	2,14	1,95	2,10	1,94	2,07	1,92	1,99	1,98	1,94				
29	2,03	2,28	1,97	2,19	1,94	2,11	1,91	2,07	1,90	2,04	1,88	1,93	1,85	1,87				
30	1,99	2,25	1,93	2,16	1,90	2,08	1,87	2,04	1,86	2,01	1,83	1,93	1,81	1,83				
31	1,96	2,21	1,89	2,13	1,86	2,05	1,83	2,01	1,82	1,98	1,80	1,90	1,77	1,80				
32	1,92	2,18	1,86	2,11	1,83	2,03	1,80	1,99	1,79	1,95	1,76	1,87	1,74	1,76				
33	1,89	2,15	1,82	2,08	1,79	2,00	1,76	1,96	1,75	1,92	1,72	1,85	1,70	1,73				
34	1,86	2,12	1,79	2,05	1,76	1,97	1,73	1,93	1,72	1,90	1,69	1,82	1,67	1,70				

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

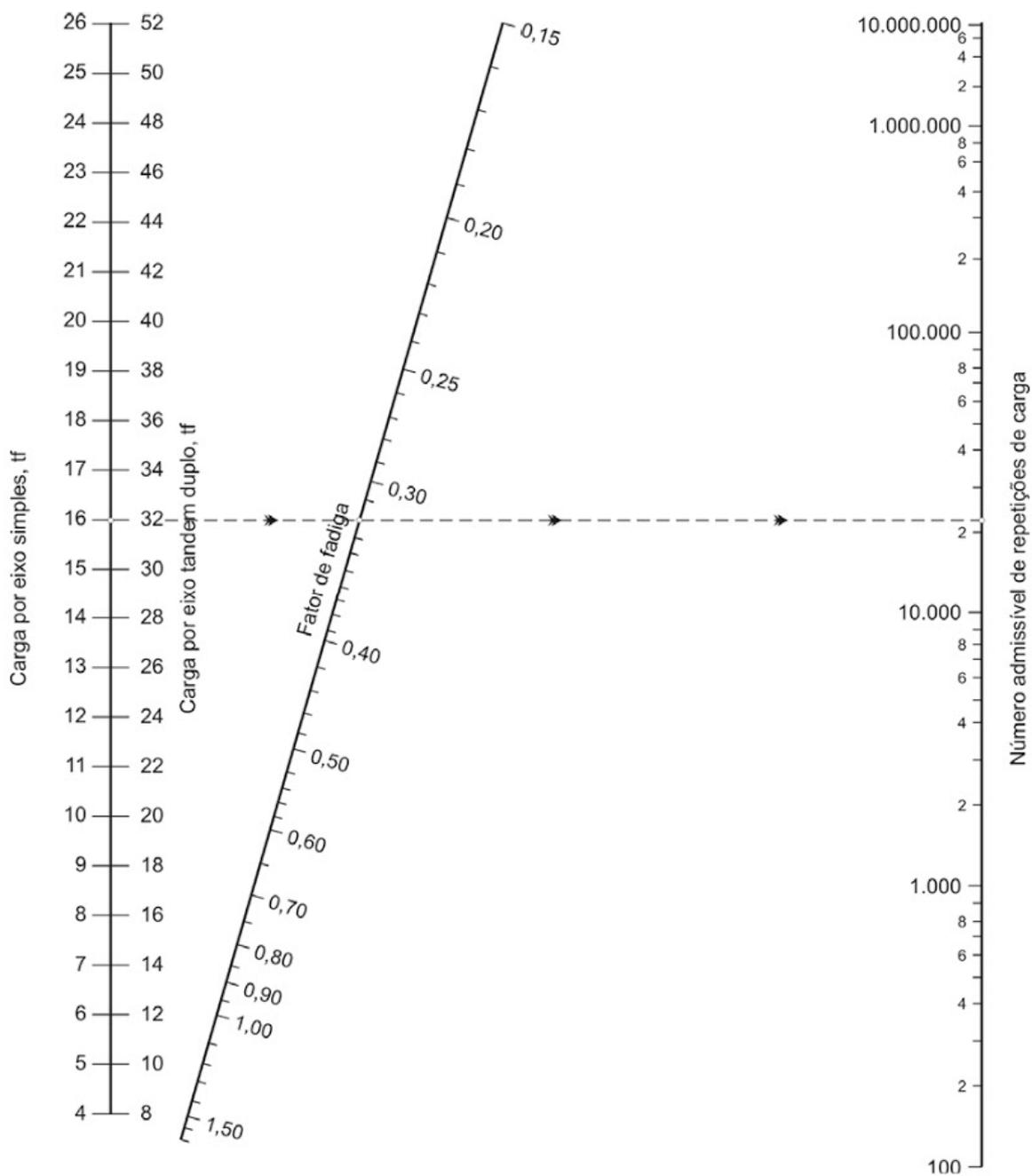
Anexo M - Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PCAC (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)						
	20	40	60	80	140	180	
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,12	2,99	2,93	2,90	2,85	2,82	2,82
13	3,06	2,92	2,85	2,81	2,76	2,73	2,73
14	3,00	2,86	2,78	2,74	2,67	2,64	2,64
15	2,95	2,80	2,73	2,67	2,59	2,56	2,56
16	2,91	2,76	2,67	2,62	2,52	2,49	2,49
17	2,86	2,71	2,62	2,57	2,47	2,43	2,43
18	2,82	2,67	2,58	2,52	2,41	2,37	2,37
19	2,79	2,63	2,54	2,48	2,37	2,32	2,32
20	2,75	2,59	2,50	2,44	2,32	2,28	2,28
21	2,72	2,56	2,47	2,40	2,28	2,23	2,23
22	2,68	2,53	2,43	2,37	2,25	2,20	2,20
23	2,65	2,49	2,40	2,34	2,21	2,16	2,16
24	2,62	2,46	2,37	2,31	2,18	2,13	2,13
25	2,59	2,44	2,34	2,28	2,15	2,10	2,10
26	2,57	2,41	2,32	2,25	2,12	2,07	2,07
27	2,54	2,38	2,29	2,22	2,10	2,04	2,04
28	2,51	2,36	2,26	2,20	2,07	2,01	2,01
29	2,49	2,33	2,24	2,17	2,04	1,99	1,99
30	2,47	2,31	2,22	2,15	2,02	1,96	1,96
31	2,44	2,29	2,19	2,13	2,00	1,94	1,94
32	2,42	2,26	2,17	2,10	1,97	1,92	1,92
33	2,44	2,24	2,15	2,08	1,95	1,89	1,89
34	2,38	2,22	2,13	2,06	1,93	1,87	1,87

ETT: Eixos Tandem Triplos

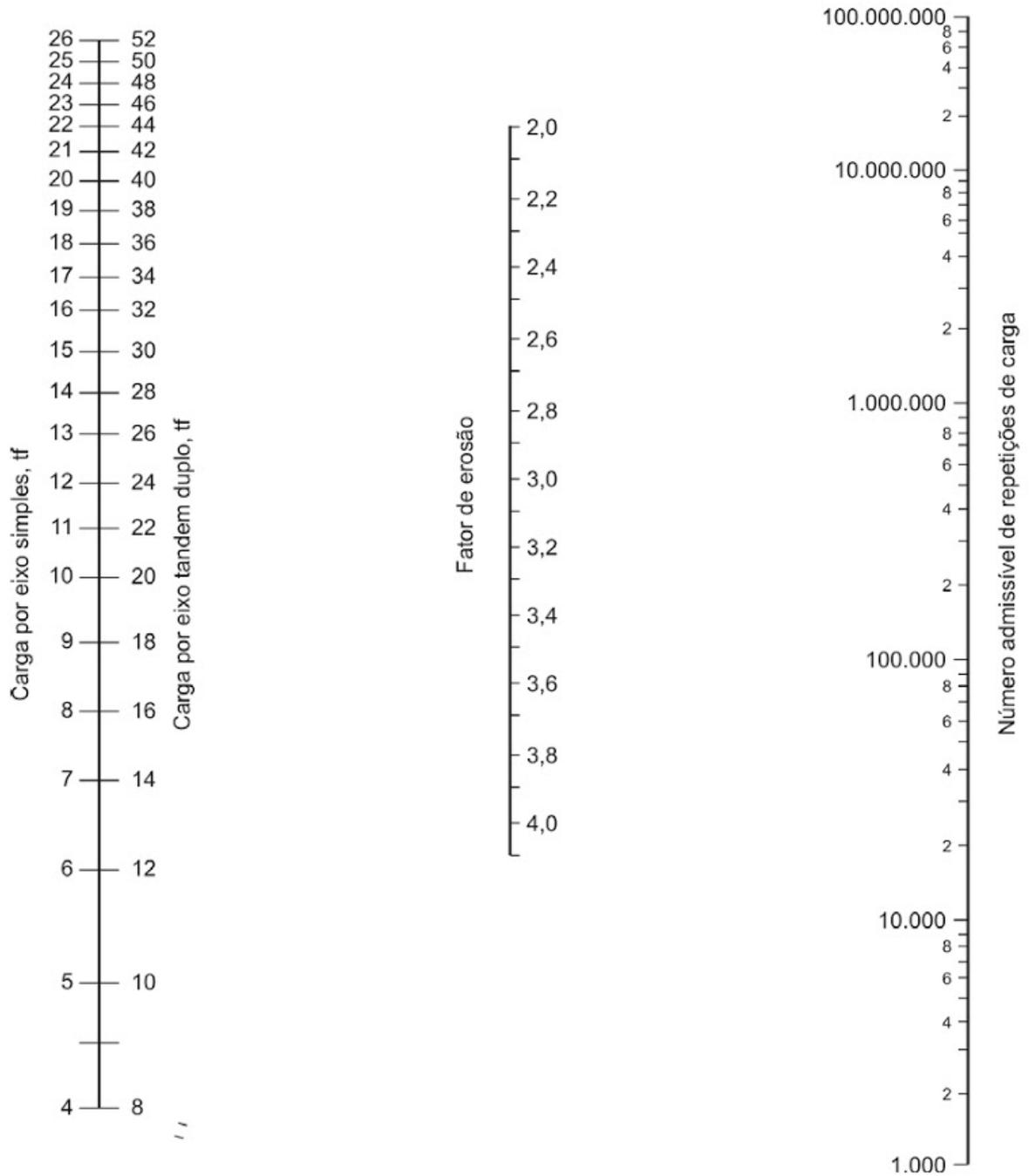
Fonte: DNIT (2005).

Anexo N - Análise de fadiga - número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga  
(com ou sem acostamento de concreto)



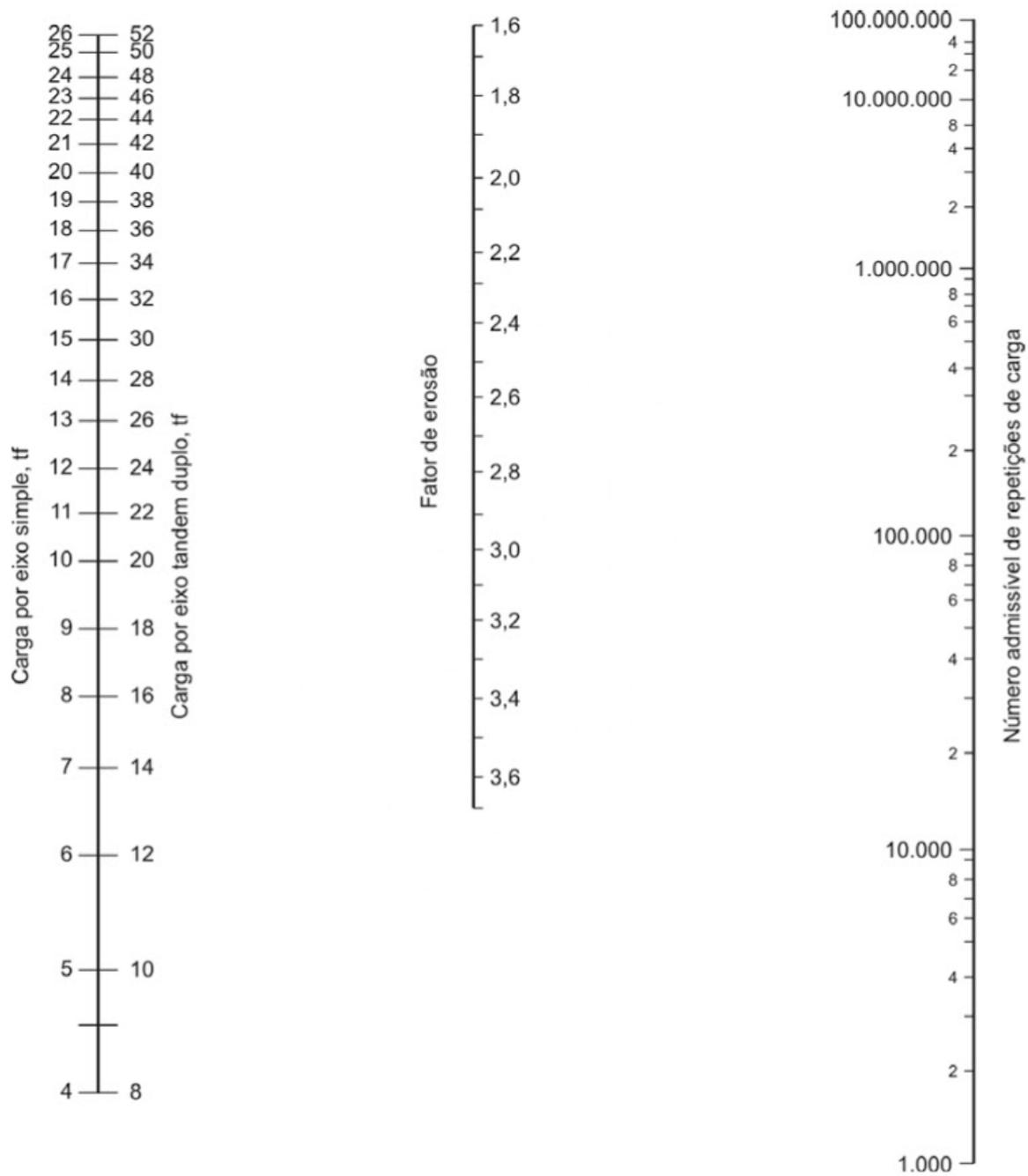
Fonte: DNIT (2005).

Anexo O - Análise de erosão - número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (sem acostamento de concreto)



Fonte: DNIT (2005).

Anexo P - Análise de erosão - número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (com acostamento de concreto)



Fonte: DNIT (2005).



**UNIVATES**

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil  
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000  
[www.univates.br](http://www.univates.br) | 0800 7 07 08 09