

UNIEVANGÉLICA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANNE CAROLINE ALCANTARA DA SILVA
MARCOS VINICIOS ALCANTARA DA SILVA

A DIFERENÇA ENTRE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E
PAVIMENTOS RÍGIDOS.
QUAL MELHOR CUSTO BENEFÍCIO?

ANÁPOLIS / GO
2021

**ANNE CAROLINE ALCANTARA DA SILVA
MARCOS VINICIOS ALCANTARA DA SILVA**

**A DIFERENÇA ENTRE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E
PAVIMENTOS RÍGIDOS.
QUAL MELHOR CUSTO BENEFÍCIO?**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: GLEDISTON NEPOMUCENO COSTA
JÚNIOR**

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, ANNE CAROLINE ALCANTARA DA / SILVA, MARCOS VINÍCIOS ALCANTARA DA

A diferença entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Qual melhor custo benefício?

66P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2021).

TCC - UniEVANGÉLICA

Curso de Engenharia Civil.

1. Comparativo

2. Pavimentação

3. Pavimento Flexível

4. Pavimento Rígido

I. ENC/UNI

II. Bacharel

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, Anne Caroline Alcantara da / SILVA, Marcos Vinicios Alcantara da. A diferença entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Qual melhor custo benefício? TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 66p. 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Anne Caroline Alcantara da Silva.

Marcos Vinicios Alcantara da Silva.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

A diferença entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Qual melhor custo benefício?

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2021

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Anne Caroline Alcantara da Silva.

E-mail: annysylva08@gmail.com



Marcos Vinicios Alcantara da Silva.

E-mail: viniciosalcantara01.mv@gmail.com

**ANNE CAROLINE ALCANTARA DA SILVA
MARCOS VINICIOS ALCANTARA DA SILVA**

**A DIFERENÇA ENTRE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E
PAVIMENTOS RÍGIDOS.
QUAL MELHOR CUSTO BENEFÍCIO?**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

APROVADO POR:

Glediston N. C. Júnior

**GLEDISTON NEPOMUCENO COSTA JÚNIOR, Mestre
(UniEVANGÉLICA)
(ORIENTADOR)**

Aginaldo Antonio Moreira

**AGNALDO ANTONIO MOREIRA TEODORO, Mestre
(UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)**

Sarah Celiac Bueno Cardoso

**SARAH CELIAC BUENO CARDOSO, Bacharela em Engenharia Civil
(RC Construções Metálicas)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 03 de DEZEMBRO de 2021.

RESUMO

Existem dois tipos de pavimentos, pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Dentre as principais diferenças de um pavimento para o outro, o pavimento flexível é composto por revestimento asfáltico, enquanto o pavimento rígido é revestido com cimento Portland. De acordo com suas características cada tipo de pavimento tem suas vantagens e desvantagens apresentando um melhor custo benefício na aplicação. Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, descrevendo as diferenças e as vantagens da utilização de cada pavimento, e conseqüentemente, demonstrar qual opção é mais vantajosa. Para tal, foi realizada uma pesquisa bibliográfica e apresentados os conceitos de pavimentação, demonstrando suas características e propriedades, tendo como foco os pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Em seguida, foi desenvolvido um estudo comparativo entre os dois métodos, com base em informações coletadas por meio de pesquisa bibliográfica. Além desses fatores, foi feita também a correlação dos parâmetros de estrutura do pavimento, execução, manutenção e custos. Com base em todas as informações levantadas, concluiu-se que a pavimentação rígida possui características técnicas mais favoráveis e valor de investimento final, tornando-se a alternativa mais viável na implantação de pavimentação rodoviária. Os pavimentos rígidos possuem maior benefício, uma vez que, esse tipo de pavimento requer uma quantidade menor de manutenções durante a vida útil, se tornando mais econômico a longo prazo. Além disso, pode-se dizer que, pelos métodos e características comparados, o pavimento rígido é um produto mais confiável e possui um processo mais complexo.

PALAVRAS-CHAVE:

Comparativo. Dimensionamento. Pavimento flexível. Pavimento Rígido.

ABSTRACT

There are two types of floors, flexible floors and rigid floors. Among the main differences from one pavement to another, the flexible pavement is composed of asphalt coating, while the rigid pavement is covered with Portland cement. According to its characteristics, each type of pavement has its advantages and disadvantages, presenting a better cost-benefit in the application. This work aims to carry out a comparative analysis between flexible and rigid pavements, describing the differences and advantages of using each pavement, and consequently, demonstrate which option is more advantageous. To this end, a bibliographical research was carried out and the concepts of paving were presented, demonstrating its characteristics and properties, focusing on flexible and rigid pavements. Then, a comparative study between the two methods was developed, based on information collected through bibliographical. In addition to these factors, the pavement structure parameters, execution, maintenance and costs were also correlated. Based on all the information gathered, it was concluded that rigid paving has more favorable technical characteristics and final investment value, making it the most viable alternative in the implementation of road paving. Rigid pavements have greater benefit, since this type of pavement requires a smaller amount of maintenance during its useful life, making it more economical in the long run. Furthermore, it can be said that, by the methods and characteristics compared, the rigid pavement is a more reliable product and has a more complex process.

KEY WORDS:

Comparative. Sizing. Flexible flooring. Rigid Floor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus; porque sem ele nada disso seria possível, é como não há exemplo maior de dedicação do que o da nossa família.

Agradeço e dedico o resultado do esforço realizado ao longo deste percurso e em especial a minha a minha querida família, que tanto amo.

Agradeço também ao meu orientador Glediston Nepomuceno Costa Júnior.

Obrigada por tudo.

Anne Caroline Alcantara da Silva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, ao meus pais e a minha família, pois neles eu encontrei a força necessária para seguir minha jornada.

Agradeço também ao meu orientador Glediston Nepomuceno Costa Júnior.

Marcos Vinicios Alcantara da Silva.

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Comparação entre os pavimentos rígidos e flexíveis.....	26
Quadro 02 – Coeficientes de equivalência estrutural	33
Quadro 03 - Coeficientes de recalque x Tipo de solo.....	34
Quadro 04- Fatores de segurança de carga	35
Quadro 05 – Informações para dimensionamento do pavimento flexível.....	37
Quadro 06 – Informações para dimensionamento do pavimento rígido	41
Quadro 07 – Valores para eixo simples, tandem duplo e tandem triplo.....	41
Quadro 08 - Repetições admissíveis com o fator de fadiga para eixo simples	42
Quadro 09 - Repetições admissíveis com o fator de fadiga para tandem duplo.....	43
Quadro 10 - Repetições admissíveis com o fator de fadiga para tandem triplo	43
Quadro 11 - Repetições admissíveis com o fator de erosão para eixo simples	43
Quadro 12 - Repetições admissíveis com o fator de erosão para o tandem duplo	44
Quadro 13 - Repetições admissíveis com o fator de erosão para o tandem triplo.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Seção transversal do pavimento: transferência de cargas da estrutura.	18
Figura 02 - Seção transversal do pavimento: camadas da estrutura.	19
Figura 03 - Distribuição das cargas no pavimento flexível.	20
Figura 04 - Processo produtivo dos pavimentos flexíveis.	21
Figura 05 - Seção transversal do pavimento flexível.	21
Figura 06 - Distribuição das cargas no pavimento rígido.	22
Figura 07 - Processo produtivo dos pavimentos rígidos.	23
Figura 08 - Seção transversal do pavimento rígido.	24
Figura 09 - Comparação entre as estruturas dos pavimentos flexíveis, rígidos e semi-rígidos.	24
Figura 10 - Comparação da distribuição de esforços do pavimento rígido e flexível.	25
Figura 11 - Ábacos do fator de equivalência de operação.	30
Figura 12- Espessura mínima, estrutura das camadas e equações.	31
Figura 13 Ábaco de espessura em função de N e CBR.	32
Figura 14 - CBR x Coeficiente de recalque.	34
Quadro 04- Fatores de segurança de carga.	35
Quadro 05 – Informações para dimensionamento do pavimento flexível.	37
Figura 15 - Ábaco de espessura das camadas.	38
Figura 16 – Resultado do dimensionamento do pavimento flexível.	40
Figura 17 – Tensão equivalente para eixo simples e tandem duplo (Pavimento sem acostamento de concreto)	52
Figura 18 – Tensão equivalente para tandem triplo (Pavimento sem acostamento de concreto) 53	
Figura 19 – Tensão equivalente para eixo simples e tandem duplo (Pavimento com acostamento de concreto)	54
Figura 20 – Tensão equivalente para tandem triplo (Pavimento com acostamento de concreto) 55	
Figura 21 – Fator de erosão para eixos simples e tandem duplos (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto).....	56
Figura 22 – Fator de erosão para eixos tandem triplos (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto).....	57

Figura 23 – Fator de erosão para eixos simples e tandem duplos (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto)	58
Figura 24 – Fator de erosão para eixos tandem triplos (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto).....	59
Figura 25 – Fator de erosão para eixos simples e tandem duplos (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto).....	60
Figura 26 – Fator de erosão para eixos tandem triplos (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto).....	61
Figura 27 – Fator erosão para eixos simples e tandem duplos (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto)	62
Figura 28 – Fator de erosão para eixos tandem triplos (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto).....	63
Figura 29 – Análise de fadiga - número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga (com ou sem acostamento de concreto).....	64
Figura 30 – Análise de erosão - número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (sem acostamento de concreto)	65
Figura 31 – Análise de erosão - número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (sem acostamento de concreto)	66

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente.
CBR	<i>California Bearing Ratio.</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
FE	Fator de eixo
FC	Fator de carga
FR	Fator climático regional
FV	Fator do veículo
FEO	Fator de equivalência de operação
FSC	Fator de segurança de carga
N	Número N
PCA	<i>Portland Cement Association.</i>
PCS	Placas de concreto de cimento Portland
<i>PCAm</i>	Porcentagem de carga i (tf) na amostra
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo geral.....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 Metodologia	16
1.4 Estrutura do trabalho	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Pavimentação	18
2.2 Pavimento flexível	20
2.3 Pavimento semi-flexível ou semi-rígido	22
2.4 Pavimento rígido	22
2.5 Pavimentos flexíveis x pavimentos rígidos.....	24
2.6 Dimensionamento	26
2.6.1 Dimensionamento de pavimento flexível	27
2.6.1.1 O número N	27
2.6.1.2 Fator de veículo	28
2.6.1.3 Fator de eixo	28
2.6.1.4 Fator de carga	29
2.6.1.5 Fator climático regional.....	30
2.6.1.6 Espessura das camadas do pavimento	31
2.6.2 Dimensionamento de pavimento rígido	33
2.6.2.1 Parâmetros iniciais de dimensionamento	35
2.6.2.2 Passo a passo para dimensionar o pavimento rígido	35
3 ANÁLISE COMPARATIVA	37
3.1 Dimensionamento	37
3.1.1 Pavimento flexível – Método DNER.....	37
3.1.2 Pavimento rígido – Método PCA.....	40
3.2 Estrutura	44
3.3 Execução	45
3.4 Manutenção	45

4 CONCLUSÃO	47
4.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	48
REFERÊNCIAS	49
ANEXO I	52
ANEXO II	56
ANEXO III	64
ANEXO IV	65

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação rodoviária é a área de comunicação dedicada a projetos de construção e pavimentação de estradas, sendo a parte essencial da infraestrutura rodoviária de qualquer país, contribuindo efetivamente para o seu crescimento econômico por proporcionar o deslocamento de pessoas e mercadorias.

A utilização da mistura a quente conhecida como pavimento rodoviário ou asfalto decorreu da necessidade de evolução humana para levar a uma maior expansão territorial e consequentemente, obter melhor acesso às áreas entre rochas, água e minerais (BALBO, 2007).

Atualmente, o transporte rodoviário se trata de um dos principais meios de transporte de cargas e pessoas do sistema logístico nacional de transporte. Nesse sistema logístico, o modelo rodoviário é hoje o mais representativo, que realiza a maior parte do transporte de cargas no Brasil (BALBO, 2007).

A tecnologia rodoviária é composta basicamente por e rodovias, com a finalidade de conectar cidades, estados e países, e ser utilizada por veículos. A ciência aplicada dessas formas é muito importante porque o sistema tem maior acessibilidade em termos de uso, custos benéficos e aplicações (SILVA, 2008).

Segundo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), a superfície rodoviária de uma rodovia é uma superestrutura construída por um sistema de camadas de espessura finita, localizada em um semiespaço considerado infinito, infraestrutura ou terreno básico, denominado leito rodoviário (DNIT, 2006).

Os pavimentos são colocados em contato, resultando em um material de contato que é capaz de aguentar um elevado grau de complexidade no que respeita ao cálculo de tensões e deformações que são impostas ao intenso tráfego de veículos todos os dias nas rodovias. Os pavimentos podem ser classificados em três tipos: flexíveis, semirrígidos e rígidos.

Devido ao seu menor custo inicial, os pavimentos flexíveis acabam sendo mais usados do que os rígidos, enquanto os rígidos ainda são raramente usados. Além dos custos iniciais mais elevados, há uma perda associada ao tráfego muito intenso. Avaliar as vantagens de escolher entre pavimentos flexíveis e rígidos será o objetivo deste trabalho. Diante dessa escolha, o engenheiro rodoviário tem uma decisão que não é fácil de tomar, o que se constitui no problema de pesquisa da presente obra (SILVA, 2019).

1.1 JUSTIFICATIVA

Em países em desenvolvimento como o Brasil, a demanda por mobilidade tende a aumentar, conseqüentemente levando a um aumento no fluxo de veículos e no transporte de cargas. Portanto, para que os usuários das vias possam se locomover com maior conforto e segurança, é cada vez mais necessário o planejamento voltado para as rodovias, seja para reforma das vias existentes ou mesmo a construção de novas vias (SILVA, 2019).

Tendo em vista que no país predomina o modal de transporte rodoviário, o estudo dos tipos de pavimento aplicáveis ao território brasileiro é determinante para a qualidade das rodovias no país. Portanto, é necessário determinar os requisitos normativos, econômicos e desempenho para a decisão de selecionar o tipo de pavimento.

Para a identificação do tipo de pavimento mais apropriado para a execução, é recomendado que se conheça parâmetros como as características e propriedades dos pavimentos, assim como as vantagens e desvantagens, projetos, desempenho, vida útil, etc. de cada método executivo para que assim se possa analisar qual a opção mais viável (BRASIL, 2017).

Isso se aplica aos objetivos desse trabalho que propõem a realização de uma análise comparativa entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, demonstrando qual opção possui um melhor custo benefício.

Com o estudo, pretendeu-se demonstrar que a própria prática de engenharia pode e deve buscar soluções de pavimentação mais razoáveis, técnica e economicamente suficientes. Pois, a escolha incorreta de uma estrutura, ao invés de auxiliar no desenvolvimento do local de implantação, acabará por impor um ônus excessivo ao responsável por esta rodovia. Além disso, esperou-se que este TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) sirva de embasamento para demais pesquisas nessa área.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Realizar uma análise comparativa entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, demonstrando qual opção possui um melhor custo benefício.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar o conceito de pavimentação, demonstrando suas características e propriedades, tendo como foco os pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos;
- Descrever as diferenças entre os pavimentos flexíveis e rígidos, bem como as vantagens da utilização de cada pavimento;
- Realizar uma análise comparativa entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, demonstrando qual a melhor opção em termos de desempenho, menor custo, menor gasto com manutenção e maior vida útil.

1.3 METODOLOGIA

Para apoiar as informações fornecidas neste estudo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica contendo a teoria dos aspectos mais relevantes relacionados à pavimentação, tendo como foco os pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, descrevendo características e propriedades, diferenças entre os pavimentos flexíveis e rígidos, vantagens da utilização de cada pavimento, etc.

Posteriormente, realizou-se o dimensionamento do pavimento flexível e pavimento rígido, sob orientação das normas do DNIT juntamente com o auxílio da bibliografia levantada.

De posse de todas as informações foi realizada uma análise para verificar qual a melhor opção de pavimento em termos de desempenho, menor custo, menor gasto com manutenção e maior vida útil.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos no TCC e contribuir para o desenvolvimento do tema, o trabalho foi organizado em 04 capítulos

O capítulo 01 se trata da Introdução. Na introdução, foi feita a apresentação do tema destacando as principais informações sobre o estudo, justificativa, objetivos propostos, metodologia utilizada e forma como o TCC será estruturado.

O capítulo 02 se trata da Fundamentação teórica. Onde é apresentada a teoria levantada por meio da pesquisa bibliográfica, neste capítulo estão descritos os conceitos referente a pavimentação, tipos de pavimento, características, propriedades, dimensionamento de

pavimentos flexíveis e rígidos, assim como demais dados importantes para o desenvolvimento do tema.

O capítulo 03 apresenta a Análise comparativa. Nesse capítulo é apresentado o dimensionamento do pavimento flexível e pavimento rígido para em seguida, juntamente com a bibliografia apresentada no Capítulo 02, seja feito o comparativo e determinação da opção mais viável.

Para finalizar o TCC, o Capítulo 04 é formado pela Conclusão. Na conclusão serão apresentadas as considerações finais obtidas com o estudo, bem como contribuições do mesmo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para atender o escopo do trabalho, este capítulo apresenta uma abordagem da literatura descrevendo as principais considerações sobre o tema.

2.1 PAVIMENTAÇÃO

O pavimento se trata de estrutura multicamadas com uma determinada espessura e é construído sobre a terraplenagem concluída, tem finalidades técnicas e econômicas. Além de resistir às intempéries, principalmente ao esforço do trânsito, proporciona conforto aos usuários, melhora as condições de rodagem, e é econômico e seguro (BALBO, 2007).

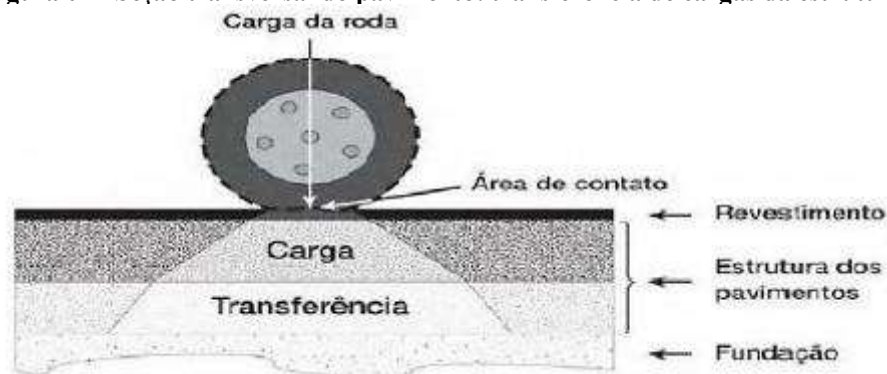
Bernucci *et al.* define pavimentos como:

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Portanto, essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos (2008, p.04).

A superfície do pavimento está relacionada ao estado da superfície de rolamento. A durabilidade da camada de suporte de carga depende de condições meteorológicas, intensidade do tráfego e características estruturais da superfície da estrada, em termos de resistência e distribuição das tensões verticais, melhoria das condições de rolamento em termos de conforto e segurança, e resistência aos esforços horizontais ocasionando em uma superfície mais durável (MENDES; NUNES, 2009).

A Figura 01 ilustra a seção transversal do pavimento, demonstrando a transferência de cargas da estrutura.

Figura 01 - Seção transversal do pavimento: transferência de cargas da estrutura.

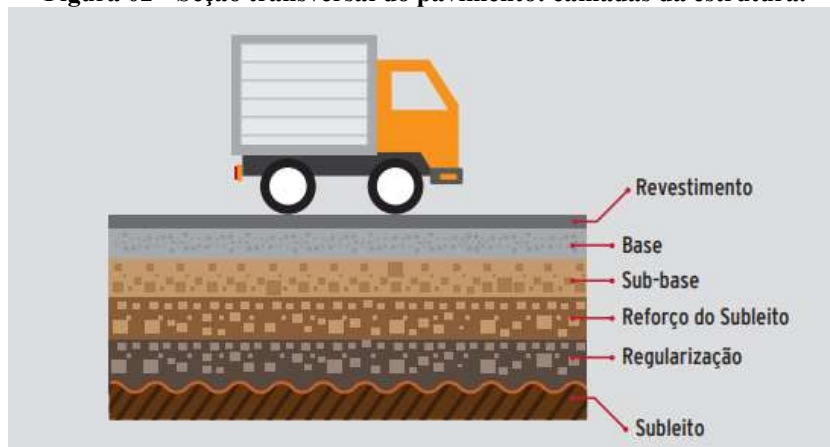


Fonte: PEREIRA, 2014.

A camada mais importante do pavimento é a camada de base. Acima dela, para resistir às intempéries e aos efeitos destrutivos do tráfego está uma camada de revestimento ou rolamento. E abaixo da base, como uma transição da base para o subleito pode-se ter ainda uma camada de sub-base ou reforço do subleito.

A Figura 02 ilustra a seção transversal do pavimento, demonstrando as camadas da estrutura.

Figura 02 - Seção transversal do pavimento: camadas da estrutura.



Fonte: CNT, 2017.

O revestimento é a camada responsável por receber os esforços do tráfego de veículos e também é suscetível a fatores climáticos como luz solar, chuva e mudanças de temperatura. Além de proteger a camada anterior com a impermeabilização do pavimento, atuar na melhoria do conforto e segurança do usuário (DNIT, 2006).

A camada de base é a camada projetada para resistir à pressão gerada pelo tráfego e espalhar sobre o leito da estrada, e a camada de revestimento será construída sobre ela. Em estradas rígidas, essa camada geralmente é omitida. A camada de sub-base é uma camada suplementar à camada de base, ela deve ser usada quando não é recomendado executar a base diretamente na base regular ou barra de aço devido às condições técnicas e econômicas. Pode ser usado para obter uma espessura de substrato uniforme. (MACIEL, 2007).

A camada de reforço do subleito da estrada é uma camada com espessura horizontal constante e sentido longitudinal variável. Essa camada é usada para melhorar a qualidade do subleito e ajustar a espessura da sub-base (DNIT, 2006).

A camada de regularização trata-se basicamente do nivelamento do leito através de cortes ou aterros, transversal e longitudinalmente. E o subleito se trata do terreno de fundação, ou seja, a última camada que irá receber todo o pavimento (MACIEL, 2007).

De maneira geral, os pavimentos são classificados de acordo com sua estrutura, podendo ser flexíveis, semi-flexíveis ou semi-rígidos e rígidos.

2.2 PAVIMENTO FLEXÍVEL

No pavimento flexível todas as camadas sofrerão deformação elástica significativa sob a carga aplicada, portanto, a carga é distribuída em partes aproximadamente iguais entre as camadas (VENESCAU, 2021).

A Figura 03 ilustra esse processo de distribuição das cargas no pavimento flexível.



Fonte: VENESCAU, 2021.

Os pavimentos flexíveis podem ser qualificados também como pavimento asfáltico, pois suas deformações não se rompem até certo ponto. O material utilizado neste pavimento é composto basicamente por concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Além de agregado miúdo (areia ou pó-de-pedra) e agregado graúdo (pedra ou seixo rolado), ligantes asfálticos e filler correspondendo à classificação reconhecida nas normas estabelecidas (DNIT, 2006).

Marques (2002, p. 4), afirma que, “o pavimento flexível é constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente”.

Quanto ao equipamento utilizado, tendo em conta as características impostas ao serviço, deve ser compatível com a área onde será executado o trabalho de instalação. Os equipamentos são: estocagem de aglutinante asfáltico, silos de agregados, equipamentos de mistura asfáltica, caminhões equipados com barris metálicos para transporte da mistura, equipamentos de lançamento e acabamento e, por fim, equipamentos de compactação (BENEVIDES, 2000).

O processo produtivo dos pavimentos flexíveis consiste basicamente na imprimação, pintura de ligação, lançamento do CBUQ, e compressão e compactação do CBUQ.

A Figura 04 ilustra esse processo.

Figura 04 - Processo produtivo dos pavimentos flexíveis.



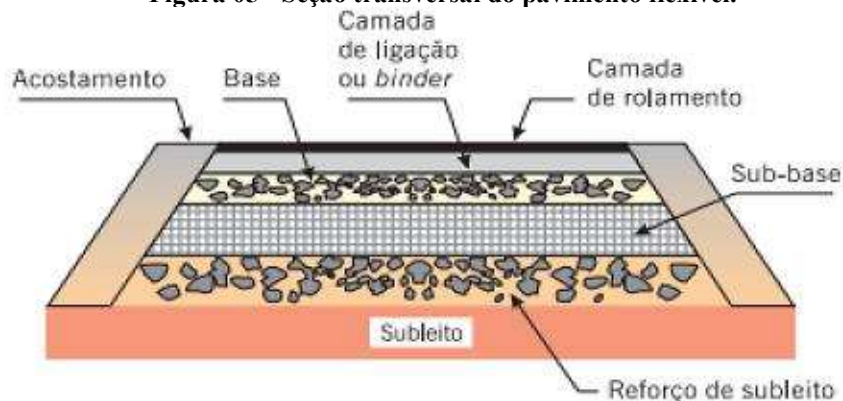
Fonte: BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008

O dimensionamento é feito por meio de flexão e tração, o que resulta em deformação permanente devido ao esforço causado pelo veículo (SILVA, 2019).

De acordo com Senço (2007, p. 23) “pavimentos flexíveis são aqueles em que as deformações, até certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão”.

A Figura 05 ilustra a seção transversal do pavimento flexível.

Figura 05 - Seção transversal do pavimento flexível.



Fonte: SILVA, 2019.

Segundo Silva (2008) nesse tipo de pavimento as condições patológicas que podem ocorrer são: desgaste do asfalto, corrugação e afundamento, trincas e fissuras devido a retração térmica e deslizamento do betume.

2.3 PAVIMENTO SEMI-FLEXÍVEL OU SEMI-RÍGIDO

Segundo Marques (2002, p. 4) os pavimentos semi-flexíveis ou “pavimentos semi-rígidos são situações intermediárias entre os pavimentos flexíveis e rígidos. É o caso das misturas solo-cimento, solo-cal, solo-betume dentre outras, que apresentam razoável resistência à tração”. Ou seja, são caracterizados por uma camada de base cimentada ligada por alguns aglutinantes cimentícios, como uma camada de solo de cimento coberta por uma camada de asfalto.

A superfície do pavimento semi-rígido é composta por uma camada de material asfáltico resistente ao desgaste, colocada sobre a camada de base, que tem função estrutural e é composta por materiais granulares combinados com cimento. A camada de desgaste asfáltica pode ter espessura reduzida, inferior a 10 cm, ou atingir espessura superior a 18 cm (SILVA, 2009).

2.4 PAVIMENTO RÍGIDO

Segundo Senço (2007, p. 23) “pavimentos rígidos são aqueles pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento. Rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações”. Isso significa que seu revestimento possui maior rigidez em relação à camada inferior, por isso absorve quase todas as tensões geradas pela carga aplicada.

A Figura 06 ilustra esse processo de distribuição das cargas no pavimento rígido.



Fonte: VENESCAU, 2021.

Esse tipo de pavimento pode ser denominado também como concreto-cimento ou concreto de cimento Portland por ser composto por PCS (Placas de concreto de cimento

Portland). Sua formação é produzida por uma mistura de agregado, areia, cimento e água, que pode ser reforçada com barras de metal. Este tipo de superfície de estrada deforma-se quando sujeito à tração e flexão (BERNUCCI, 2008).

Além disso, os pavimentos rígidos podem ser formados por diversos tipos de concreto conforme necessidade de cada local, a saber: concreto simples, concreto simples com barras de transferência, concreto armado, concreto protendido, concreto com armadura descontínua e contínua e concreto sem distribuição estrutural (ARAÚJO *et al*, 2016).

No que diz respeito ao processo produtivo, nos pavimentos rígidos é feito primeiramente o lançamento, distribuição e adensamento do material, nivelamento e acabamento, corte, cura e selagem de juntas.

A Figura 06 ilustra o processo produtivo do pavimento rígido.

Figura 07 - Processo produtivo dos pavimentos rígidos.

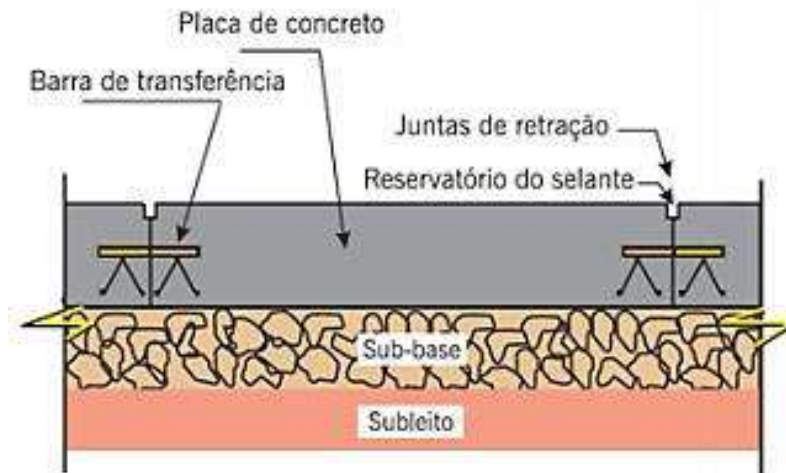


Fonte: BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008

Esse tipo de pavimento tem maior durabilidade e resistência às intempéries e não requer manutenções frequentes. Para fins de sustentabilidade, o leito pode ser tratado adequadamente, mas em termos de estabilidade, como a fundação atende essa demanda, tal reforço pode não existir. Portanto, apenas bons serviços de terraplenagem e compactação podem apresentar bom desempenho na composição desse pavimento de concreto (ARAÚJO *et al*, 2016).

A Figura 08 ilustra a seção transversal do pavimento rígido.

Figura 08 - Seção transversal do pavimento rígido.



Fonte: SILVA, 2019.

Em relação ao surgimento de manifestações de irregularidades, segundo Silva (2008) as patologias desse tipo de pavimento são estruturais, o que inclui afetar diretamente a eficiência de suporte da carga aplicada pelo veículo, como fissuras transversais que se estendem pela espessura da placa. Outro tipo de patologia é a patologia funcional, que afeta diretamente as condições de segurança no trânsito e de direção, como aspereza, ruído e deformidade.

A Figura 09 apresenta uma comparação entre as estruturas dos pavimentos flexíveis, rígidos e semi-rígidos.

Figura 09 - Comparação entre as estruturas dos pavimentos flexíveis, rígidos e semi-rígidos.



Fonte: ADADA, 2008.

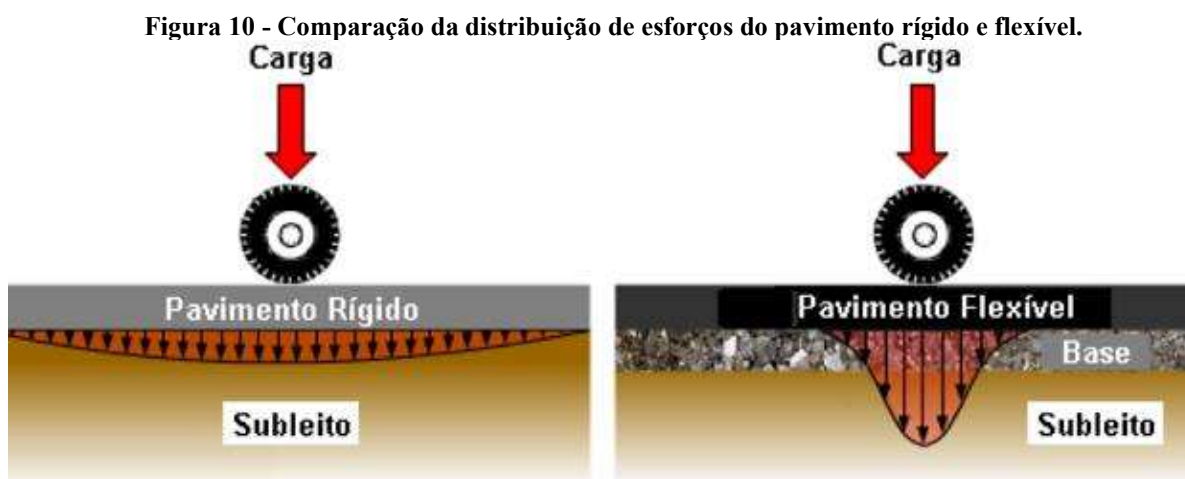
2.5 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS X PAVIMENTOS RÍGIDOS

Ao comparar pavimentos rígidos e flexíveis, pode-se dizer que ambos são adequados para implantação nas rodovias brasileiras, embora os pavimentos rígidos sejam mais adequados para estradas com maior resistência ao carregamento. No entanto, é óbvio que esta não é uma

regra de pavimentação, uma vez que a escolha do pavimento deve ser baseada nas características e necessidades locais, como tipos de solo e condições climáticas diferentes, além dos aspectos econômicos (BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008).

A principal diferença entre um pavimento rígido e um pavimento flexível está na distribuição da força exercida no leito da rodovia, pois a carga aplicada no pavimento flexível adota um campo de tensões muito concentrado próximo ao mesmo ponto de aplicação de carga, enquanto em um rígido pavimento, campo de tensões muito concentradas são verificadas em diversos trechos que distribuem uniformemente o efeito de carregamento por toda a laje, permitindo assim, menor pressão no subleito (BONFIM, 2011).

A Figura 10 ilustra a comparação da distribuição de esforços em ambos os pavimentos.



Fonte: ARAÚJO *et al*, 2016.

- Pavimento rígido: A placa absorve grande parte das tensões, a carga é distribuída em uma área relativamente grande, a qualidade do solo não interfere no comportamento estrutural, o comportamento estrutural não é fácil de deformar e é mais resistente à tração (CASTRO, 2010).
- Pavimento flexível: A carga é distribuída em uma proporção proporcional à rigidez de cada camada. Todas as camadas sofrerão deformação elástica significativa. A deformação não causará fissuras quando a deformação atinge o limite. A qualidade do solo é importante porque suporta altas tensões e absorve maior deflexão (CASTRO, 2010).

Em relação a estrutura, o pavimento rígido é mais simples do que o pavimento flexível, pois a camada de base e o revestimento do pavimento rígido são combinados em uma camada única, conforme demonstrado na Figura 08. Ainda assim, a função da camada de base e

revestimento é a mesma do pavimento flexível, podendo apenas precisar de uma camada de base adicional e o leito final ajustado (ARAÚJO *et al*, 2016.).

O quadro 01 descreve o estudo comparativo entre os pavimentos rígidos e flexíveis apresentado por Bianchi, Brito e Castro (2008).

Quadro 01 - Comparação entre os pavimentos rígidos e flexíveis.

PAVIMENTOS RÍGIDOS	PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
Estruturas mais delgadas de pavimento	Estruturas mais espessas (requer maior escavação e movimento de terra) e camadas múltiplas.
Resiste a ataques químicos (óleos, graxas, combustíveis).	É fortemente afetado pelos produtos químicos (óleos, graxas, combustíveis).
Maior distância de visibilidade horizontal, proporcionando maior segurança.	A visibilidade é bastante reduzida durante a noite ou em condições climáticas adversas.
Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de veículos sem interrupções.	Necessário que se façam várias manutenções e recuperações, com prejuízos no tráfego e custos elevados.
Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação (30 vezes mais durável).
Vida útil mínima de 20 anos.	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção)

Fonte: BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008.

Segundo Bianchi, Brito e Castro (2008) devido a textura da superfície, os pavimentos rígidos possuem uma segurança à derrapagem, já nos pavimentos flexíveis a superfície se torna mais escorregadia. Além disso os pavimentos rígidos possuem melhor escoamento da água superficial, ou seja, melhor drenagem, enquanto os pavimentos flexíveis retêm mais água pois absorvem com maior rapidez a Umidade, sendo necessário a instalação de caimentos.

Para o projeto de pavimentação o engenheiro deve observar os materiais disponíveis, principalmente a gama de soluções alternativas viáveis, e então selecionar o material que melhor atenda aos requisitos do projeto. Nesse contexto, além dos recursos materiais, as obras de estradas e pavimentos também têm como principal limitação de recursos financeiros.

2.6 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de pavimentos significa determinar a espessura das camadas que irão compor o pavimento, resistindo à pressão do tráfego e a transferência para o leito sem fissuras ou deformações e desgaste excessivo. O dimensionamento do pavimento flexível leva em consideração a capacidade de carga do leito e o número equivalente de operações do eixo padrão de acordo com o método DNER do DNIT, enquanto o dimensionamento do pavimento

rígido é baseado nas propriedades mecânicas do concreto, no coeficiente de recalque e nas características de carga de acordo com a PCA (*Portland Cement Association*).

A seguir foram apresentados o dimensionamento do pavimento flexível e pavimento rígido de acordo com os métodos citados acima.

2.6.1 Dimensionamento de pavimento flexível

Atualmente, o método mais difundido e utilizado no projeto de pavimentos flexíveis é o método DNER que consta do manual de pavimentação do DNIT.

Neste caso, o método empírico é utilizado para dimensionar o pavimento flexível de acordo com a situação de apoio do subleito, ou seja, a determinação da capacidade de suporte do subleito bem como os outros materiais que compõem o pavimento, que são feitos por meio do teste CBR (*California Bearing Ratio*) de acordo com a intensidade de tráfego e da camada de componentes do pavimento obtém-se a espessura mínima usada para o pavimento (GRECO, 2012).

O manual do DNIT (2006) afirma que os materiais para reforço do subleito, sub-base e base utilizados para pavimentação, para Numero $N > 5 \times 10^6$, devem atender às classificações a seguir:

- Reforço de subleito: $CBR > CBR$ do subleito e expansão $\leq 2\%$;
- Sub-base: $CBR \geq 20$ e expansão $\leq 1\%$;
- Base: $CBR \geq 80$, expansão de $0,5\%$, limite de liquidez $\leq 25\%$ e índice de plasticidade $\leq 6\%$.

Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis são adotados parâmetros referentes ao fatores FE, FC, FR, FV e Número N.

2.6.1.1 O número N

Um projeto de do pavimento flexível é executado de acordo com o número equivalente de operações do eixo como padrão, em um determinado período de tempo, e com valor de 8,2 tf, o qual é denominado como Número N. Ao calcular o N, são considerados FE, FC e FR (MARQUES, 2013).

O Número N pode ser calculado tanto pela equação 1 ou equação 2:

$$N = Vt \times FV \quad (1)$$

$$N = Vt \times FE \times FC \times FR \quad (2)$$

Onde:

N = Número N

Vt = Volume total final;

FV = Fator de veículo;

FE = Fator de eixo;

FC = Fator de carga;

FR = Fator regional.

O Vt pode ser obtido através da equação 3:

$$Vt = 365 \times Vm \times P \quad (3)$$

Onde:

Vt = Volume total final;

Vm = Volume médio de veículos por dia;

P = Período de duração do projeto.

2.6.1.2 Fator de veículo

O fator de veículo corresponde ao volume de tráfego real do pavimento, se trata do produto do FE pelo FC . É usado para compensar a diversidade de veículos e cargas ao longo da pista. Essas cargas e diferentes veículos são convertidos em operações de eixo padrão (Número N), o que equivale ao valor veículos que solicitam a via (MARQUES, 2013).

O valor desse fator é calculado pela equação 4:

$$FV = FE \times FC \quad (4)$$

Onde:

FV = Fator de veículo;

FE = Fator de eixo;

FC = Fator de carga;

2.6.1.3 Fator de eixo

É um número que representa o número total de eixos de veículos previsíveis que solicitarão faixas. É um coeficiente que é multiplicado pela quantidade total de tráfego comercial necessária para pavimentar a estrada durante um determinado período do projeto para estimar o número total de eixos necessários para pavimentar a estrada durante o mesmo período. Este fator é determinado contando e somando todos os eixos do veículo estimado, portanto é necessário entender a composição do tráfego. Embora relacionado aos eixos, esse fator apenas os quantifica. A análise da relação entre a carga real por eixo e a carga por eixo padrão é feita pelo coeficiente equivalente de operação, que ajuda a determinar o coeficiente de carga, que será introduzido na próxima seção (MARQUES, 2013).

2.6.1.4 Fator de carga

O fator de carga pode ser definido como um fator que é multiplicado pelo número de eixos que tencionam a superfície da estrada durante o período de projeto para obter o número equivalente de operações para um único eixo padrão (GRECO, 2012).

O fator de eixo é calculado pela equação 5:

$$FC = \sum FEO \times PCiAm \quad (5)$$

Onde:

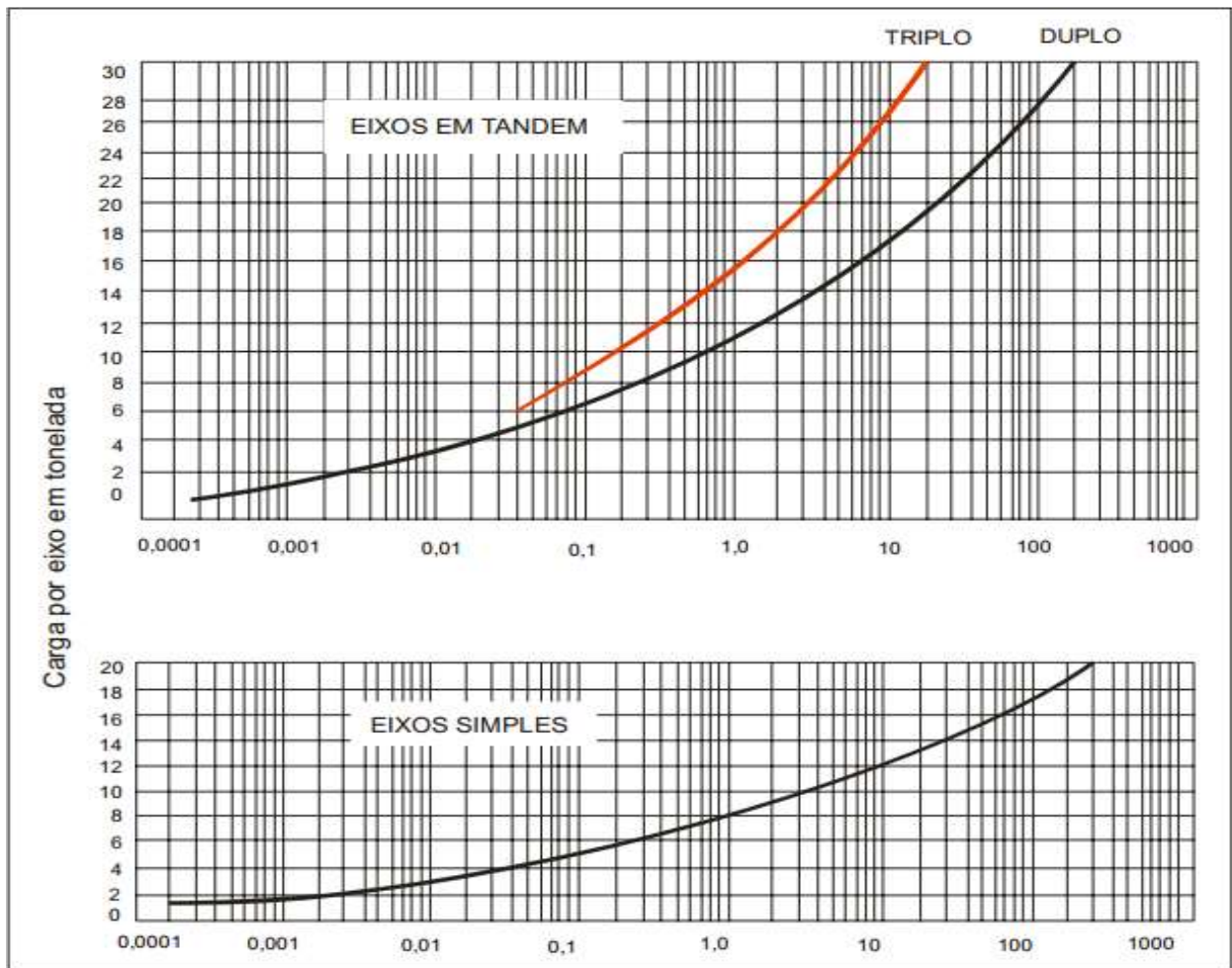
FC = Fator de carga;

FEO = Fator de equivalência de operação;

$PCAm$ = Porcentagem de carga i (tf) na amostra;

O (FEO) fator de equivalência de operação é obtido dos ábacos demonstrados na Figura 11.

Figura 11 - Ábacos do fator de equivalência de operação



Fonte: DNIT, 2006.

2.6.1.5 Fator climático regional

O fator climático regional é um coeficiente, que pode considerar as mudanças no teor de umidade dos materiais do pavimento devido às mudanças climáticas que ocorrem nas diferentes estações do ano. Essas mudanças na umidade levarão a mudanças na capacidade de suporte do material, afetando assim a estabilidade e resistência da superfície da estrada (MARQUES, 2013).

Os coeficientes climáticos regionais finais que devem ser usados são as médias ponderadas dos diferentes coeficientes sazonais, levando em consideração o intervalo de tempo em que ocorrem. A adoção de $FR = 1,0$ é uma boa prática e também está indicada no manual do DNIT (VENESCAU, 2020).

2.6.1.6 Espessura das camadas do pavimento

Conforme demonstrado na Figura 05 a estrutura do pavimento flexível consiste nas camadas de subleito, reforço do subleito, sub-base, camada de rolamento, camada de ligação, base e acostamento.

Determinar a espessura dessas camadas é a segunda etapa no processo de projeto de pavimento flexível. Portanto, uma vez que o número N é conhecido, o asfalto, a camada de base, a camada de base e o reforço do leito da estrada podem ser estimados.

Use o número N , mais o CBR ou IG do leito da estrada e os materiais que podem ser usados para cada camada. As espessuras H_m , H_n , h_{20} (Figura 11) são determinadas pelo ábaco (Figura 11), e R é determinado por o valor mínimo da tabela de espessura para determinar o revestimento asfáltico conforme demonstrado (VENESCAU, 2020).

De acordo com o número N , a espessura mínima deve ser adotada para a camada mais externa do pavimento.

Figura 12- Espessura mínima, estrutura das camadas e equações

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \cdot 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \cdot 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

R	K_r REVESTIMENTO	R	H_{20}	H_m
B	K_b BASE		H_n	
h_{20}	K_s SUB-BASE			
h_n	K_{ref} REFORÇO DO SUBLEITO			

$$K_r \cdot R + K_b \cdot B \geq H_{20}$$

$$K_r \cdot R + K_b \cdot B + K_s \cdot h_{20} \geq H_n$$

$$K_r \cdot R + K_b \cdot B + K_s \cdot h_{20} + K_{ref} \cdot h_n \geq H_m$$

Fonte: DNIT, 2006.

Onde,

R = Espessura do revestimento;

B = Espessura da camada de base;

H_{20} = Espessura sobre a camada de sub base;

h_{20} = Espessura da camada de sub base;

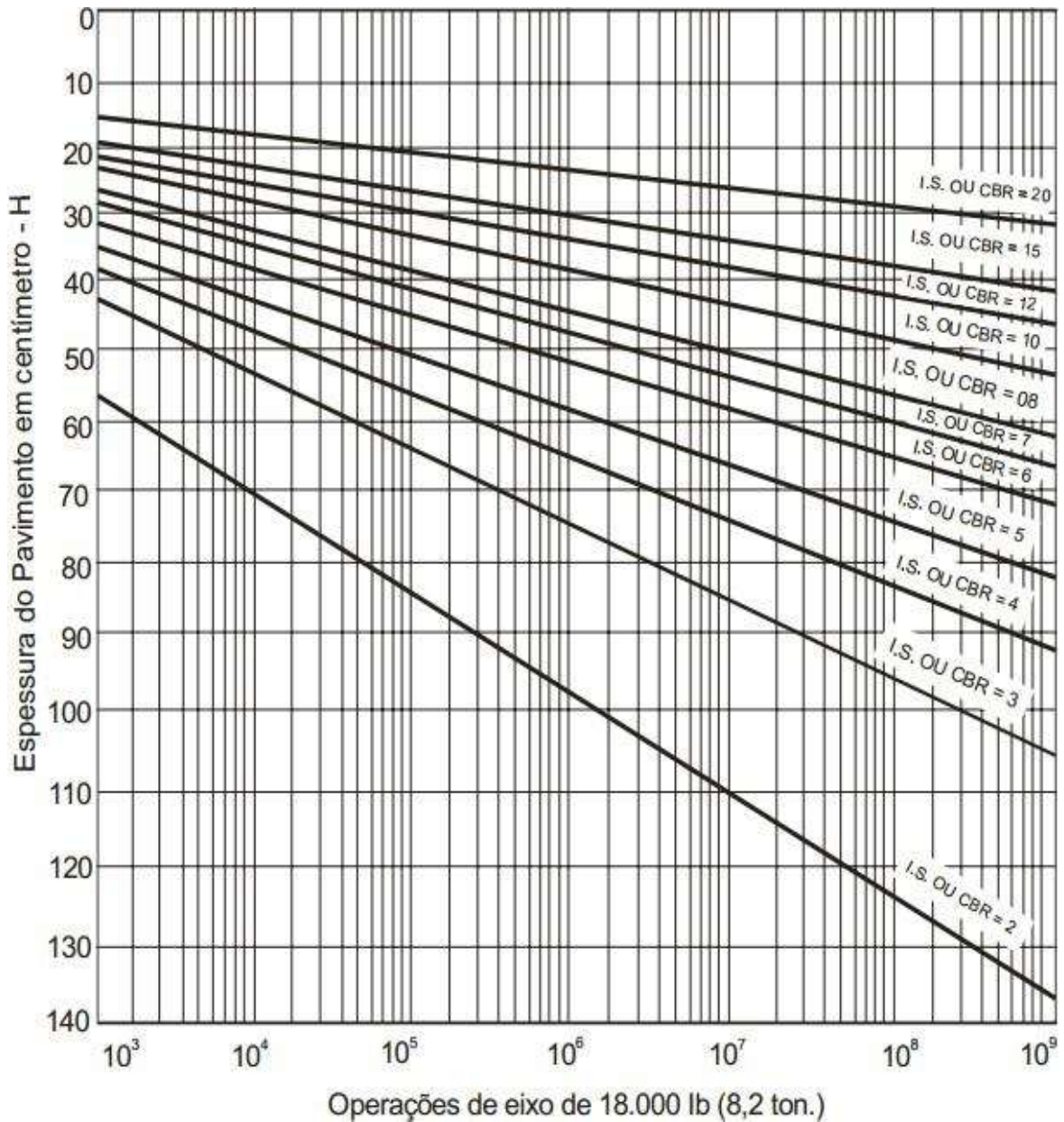
H_n = Espessura sobre a camada de reforço do subleito;

h_n = Espessura da camada de reforço do subleito;

H_m = Espessura sobre a camada de subleito;

A espessura da camada de base (B), da camada de sub-base (h20) e reforço do subleito (Hn) são obtidas resolvendo a mesma equação na Figura 12.

Figura 13 Ábaco de espessura em função de N e CBR



Para o coeficiente K, a constante na desigualdade usa o valor mostrado no Quadro 02. Portanto, após solucionar a equação, verifica-se a aplicabilidade da espessura determinada e, se necessário, pode-se arredondar o resultado para atender às condições exigidas para obter um bom desempenho rodoviário (DNIT, 2006).

Quadro 02 – Coeficientes de equivalência estrutural

Componentes dos pavimentos	Coeficiente de equivalência estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento por penetração	1,20
Base granular	1,00
Sub-base granular	0,77(1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 Kg/cm ²	1,70
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 Kg/cm ² e 28 Kg/cm ²	1,40
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 Kg/cm ² e 21 Kg/cm ²	1,20
Bases de Solo-Cal	1,20

Fonte: DNIT, 2006.

2.6.2 Dimensionamento de pavimento rígido

Um dos métodos de dimensionamento de pavimentos de concreto rígido apontado pelo DNIT é o método PCA, utilizado neste estudo. Este método leva em consideração o consumo de erosão e fadiga da superfície da estrada para calcular a espessura da laje de concreto. Em seguida, é utilizada a espessura estimada da laje de concreto, e o tamanho determina se a espessura utilizada é suficiente para resistir ao desgaste da erosão e fadiga causados pelos veículos que passam pelo pavimento (FILHO, 2011).

Segundo Filho (2011) para esse dimensionamento, os principais fatores relacionados às condições de suporte do solo são o coeficiente de recalque (k) e o módulo de reação, que também pode ser denominado módulo de *Westergaard*. O fator de retenção é determinado por teste de carga. Neste ensaio de carga, a pressão vertical transmitida ao subleito por meio de uma placa rígida com diâmetro de pelo menos 76 cm está relacionada ao deslocamento vertical.

O Quadro 03 mostra o coeficiente de recalque (k) e o tipo de solo correspondente. Os valores fornecidos na tabela podem ser usados para avaliação preliminar do valor k para que ele possa ser calculado antes de pesquisas mais rigorosas.

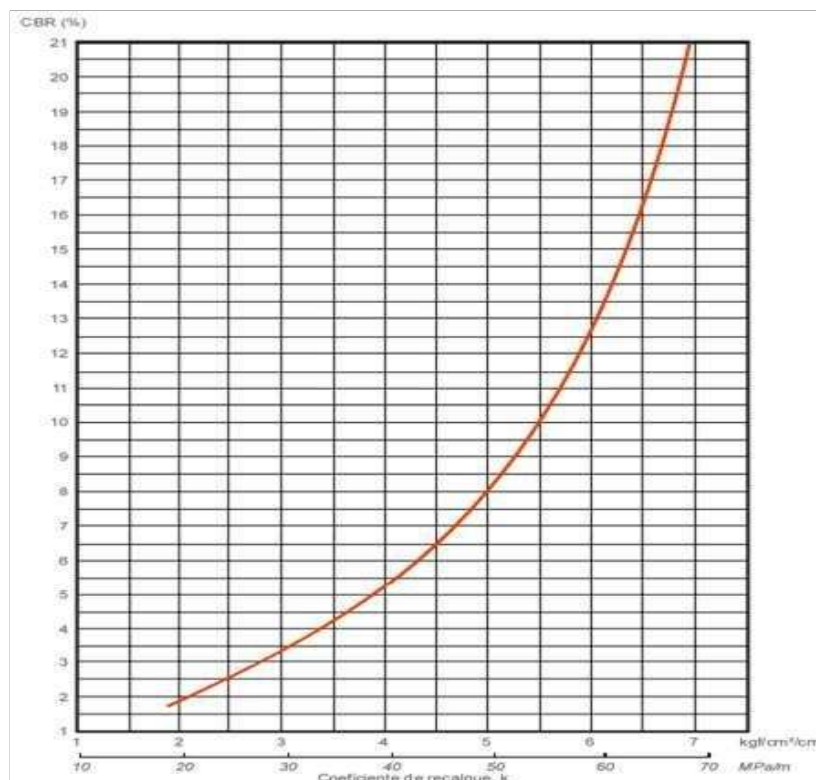
Quadro 03 - Coeficientes de recalque x Tipo de solo

Tipo de Solo (AASHTO M 145)	Coeficiente de Recalque	
	MPa/m	kgf/cm ² /cm
A1-a	>110	>11,0
A1-b	70 - 165	7,0 - 16,5
A2-4, A2-5	>80	>8,0
A2-6, A2-7	50 - 90	5,0 - 9,0
A3	55 - 90	5,0 - 9,0
A4	25 - 80	2,5 - 8,0
A5	<50	<5,0
A6	<60	<6,0
A7-5, A7-6	<60	<6,0

Fonte: DNIT, 2006.

Para a determinação do coeficiente de recalque é permitido usar também a relação correspondente entre o CBR do leito da estrada e seu valor de coeficiente de liquidação, demonstrada na Figura 14.

Figura 14 - CBR x Coeficiente de recalque



Fonte: DNIT, 2006.

O método PCA utiliza um modelo de análise estrutural de elementos finitos, que considera o tipo e o grau de transferência de carga nas juntas, a presença ou ausência de ombros de concreto, e introduz um modelo de falha por erosão (FILHO, 2011).

Para determinar a espessura da placa, o FSC (Fator de segurança de carga) deve ser considerado conforme Quadro 04.

Quadro 04- Fatores de segurança de carga

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 altos volumes de caminhões	1,2
- pavimentos que necessitem de um desempenho acima do normal	Até 1,5

Fonte: DNIT, 2006.

2.6.2.1 Parâmetros iniciais de dimensionamento

Para dimensionar um pavimento rígido, é necessário definir os seguintes parâmetros e características do pavimento (DNIT, 2005):

1. Tipo de acostamento;
2. Definir se serão utilizadas barras de transferência nas juntas;
3. Resistência do concreto aos 28 dias (Tração na flexão);
4. Definir o coeficiente de recalque – k;
5. O fator de segurança de carga – FSC;
6. Definir a espessura teste;
7. Calcular o tráfego esperado para cada carga e de acordo com a vida de projeto.

2.6.2.2 Passo a passo para dimensionar o pavimento rígido

De posse das informações acima, para dimensionar os pavimentos rígidos segue conforme o passo a passo abaixo (DNIT, 2005):

1. Através das Figuras 17, 18, 19 e 20 (ANEXO I), determinar a tensão equivalente para eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, por meio da espessura estimada e coeficiente de recalque. Para a tensão equivalente é considerada a adoção ou não de acostamento de concreto.
2. Através das Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28 (ANEXO II), determinar os fatores de erosão, de acordo com o tipo de junta e o tipo de acostamento. Para a determinação dos fatores de erosão, são considerados os valores da da espessura estimada e coeficiente de recalque.
3. Calcular o fator de fadiga para os eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, obtido através da expressão 6.

$$\text{Fator de fadiga} = \text{Tensões Equivalentes/resistência de projeto} \quad (6)$$

4. Através da Figura 29 (ANEXO III), determinar as repetições admissíveis com o fator de fadiga e as cargas por eixos. Para os eixos tandem triplo divide-se a caixa do eixo por três, pois neste caso, a mesma equivale a três eixos simples.
5. Através das figuras 30 e 31 (ANEXO IV), determinar as repetições admissíveis com o fator de erosão e as cargas por eixo. Para os eixos tandem triplo divide-se a caixa do eixo por três, pois neste caso, a mesma equivale a três eixos simples.
6. Dividir as repetições esperadas pelas respectivas repetições admissíveis determinando as porcentagens de resistência à fadiga e o dano por erosão.

Ao somar os consumos de fadiga e danos por erosão, obtendo-se a porcentagem total de fadiga consumida menor que 100%, a espessura estimada cumpre com a análise de fadiga, caso a porcentagem total de fadiga consumida seja maior que 100%, será preciso definir uma nova espessura e refazer os cálculos (DNIT, 2005).

3 ANÁLISE COMPARATIVA

Na análise comparativa, é apresentada a comparação dos pavimentos flexível e rígido com base na correlação entre as informações coletadas, disponíveis no capítulo anterior, e da teoria também discutida no Capítulo 2, com base no dimensionamento dos pavimentos nos métodos DNER para pavimentos flexíveis e PCA para pavimentos rígidos.

Além do dimensionamento, a comparação é feita a partir dos parâmetros de estrutura do pavimento, execução, manutenção e custos.

3.1 DIMENSIONAMENTO

3.1.1 Pavimento flexível – Método DNER

O dimensionamento do pavimento flexível foi realizado com base nas informações descritas no Quadro 05.

Quadro 05 – Informações para dimensionamento do pavimento flexível

Volume médio de veículos/dia	1600 veículos
Período	20 anos
Fator de veículo	1,8
Subleito	CBR = 4
Reforço do subleito	CBR = 10
Sub-base	CBR = 25
Base	CBR = 90

Fonte: AUTORES, 2021.

1. Número N

Para obter o número N, primeiramente é preciso delimitar o valor do volume total final através da multiplicação do volume médio de veículos por dia pelo período de duração do projeto, expressa na equação 3.

$$Vt = 365 \times Vm \times P \quad (3)$$

$$Vt = 365 \times 1600 \times 20$$

$$Vt = 11.680.000 \text{ veículos}$$

Com isso, pode-se calcular o número N, por meio da equação 1.

$$N = Vt \times FV \quad (1)$$

$$N = 11.680.000 \times 1,8$$

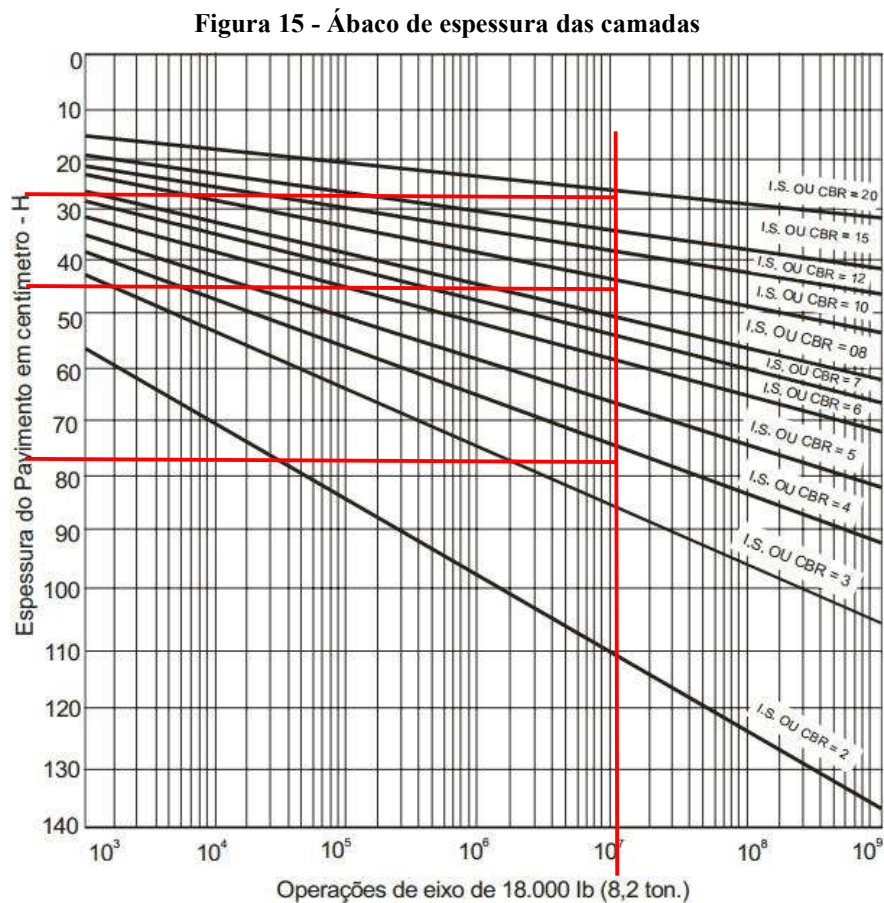
$$N = 2,1 \times 10^7$$

2. Espessura total das camadas do pavimento

Com base no valor do número N e na Figura 12 ($10^7 < 2,1 \times 10^7 \leq 5 \times 10^7$), o revestimento adotado para o pavimento é de concreto betuminoso com 10 cm de espessura.

Para as camadas de base (B), sub-base (h20) e subleito (hn), foi desenhada uma linha vertical do valor N no ábaco da Figura 13 até cruzar com o valor CBR da camada a ser protegida, e posteriormente, desenhou-se outra linha horizontal para o valor da espessura.

A Figura 15 demonstra o valor da espessura das camadas com N em função do CBR.



Fonte: DNIT, 2006 (ADAPTADO).

Obtendo-se as seguintes espessuras totais para as camadas:

- Revestimento = R = 10 cm;
- Base = H20 = 27 cm;
- Sub-base = Hn = 46 cm;
- Reforço do subleito = Hm 78 cm.

3. Determinar o valor de K

Para determinar os valores de K é preciso fazer a multiplicação do coeficiente de equivalência estrutural (K), demonstrados na Figura 15, pela espessura da camada.

Como o revestimento adotado para o pavimento é de concreto betuminoso o valor de K é de 2,0. Já para camadas de base, sub-base e reforço do subleito, como não se conhece o material, adotou-se o valor de K igual a 1,0, levando-se em consideração o tipo de material como granular.

Desta forma, o valor de coeficiente de equivalência estrutural para cada camada é de:

- Kr (Revestimento) = 2,0
- Kb (Base) = 1,0
- Ks (Sub-base) = 1,0
- Kref (Reforço do subleito) = 1,0

Por fim, as espessuras das camadas da base, sub-base e reforço do subleito foram calculadas pelas equações da Figura 12:

Para base, obteve-se a espessura de 12,4 cm, desta forma, adotou-se 15 cm de espessura.

$$R \times KR + B \times KB \geq H20 \times 1,2$$

$$10 \times 2,0 + B \times 1,0 \geq 27 \times 1,2$$

$$B \geq 12,4 \text{ cm}$$

Para a sub-base obteve-se a espessura de 11 cm, adotando também, 15 cm de espessura.

$$R \times KR + B \times KB + h20 \times Ks \geq H9$$

$$10 \times 2,0 + 15 \times 1,0 + h20 \times 1 \geq 46$$

$$h20 \geq 11 \text{ cm}$$

Já para o reforço do subleito, a espessura da camada obtida na equação foi de 28cm.

$$R \times KR + B \times KB + h_{20} \times KS + h_9 \times K_{ref} \geq H_3$$

$$10 \times 2,0 + 15 \times 1,0 + 15 \times 1,0 + h_9 \times 1,0 \geq 78$$

$$h_9 \geq 28cm$$

Entretanto, como a espessura máxima de compactação para o pavimento é de 20 cm aumentou-se a espessura da sub-base e da base de 15 cm para 20 cm. Onde obteve-se a espessura de 18cm, adotando-se 20cm.

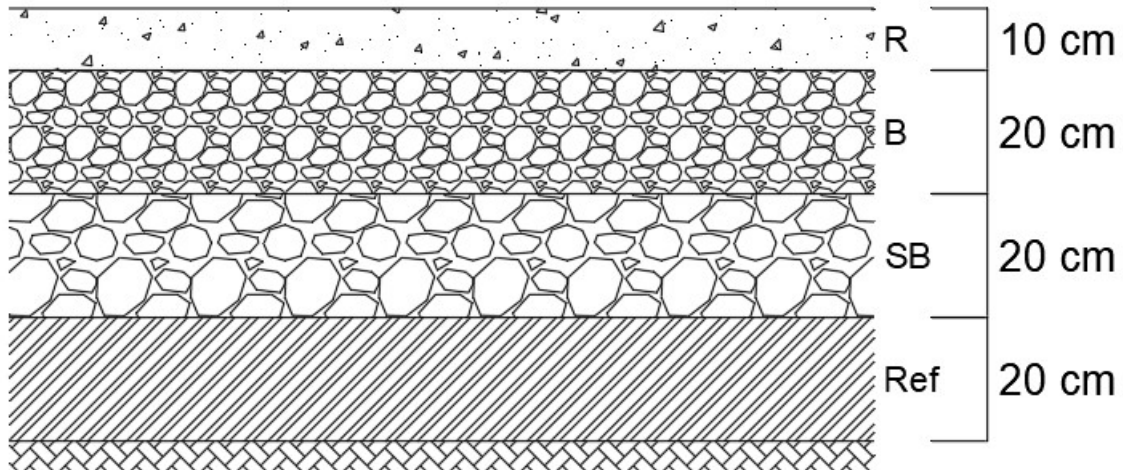
$$R \times KR + B \times KB + h_{20} \times KS + h_9 \times K_{ref} \geq H_3$$

$$10 \times 2,0 + 20 \times 1,0 + 20 \times 1,0 + h_9 \times 1,0 \geq 78$$

$$h_9 \geq 18cm$$

A Figura 16 ilustra o resultado do dimensionamento para o pavimento flexível.

Figura 16 – Resultado do dimensionamento do pavimento flexível



Fonte: AUTORES, 2021.

3.1.2 Pavimento rígido – Método PCA

Para o dimensionamento do pavimento rígido, foram utilizadas as informações contidas no Quadro 06.

Quadro 06 – Informações para dimensionamento do pavimento rígido

Brita tratada com cimento
CBR = 5
Espessura = 15 cm

Fonte: AUTORES, 2021.

1. Parâmetros iniciais de dimensionamento

Para dimensionar um pavimento rígido, é necessário definir os seguintes parâmetros e características do pavimento:

1. Tipo de acostamento = Concreto
2. Utilização de barras de transferência = Sim
3. Resistência do concreto aos 28 dias (Tração na flexão) = $f_{ctMk} = 4,5$ MPa
4. Coeficiente de recalque – $k = 100$ MPa/m
5. O fator de segurança de carga – FSC = 1,2
6. Espessura teste = 20 cm
7. Tráfego esperado para cada carga e de acordo com a vida de projeto = 20 anos (Quadro 07)

Quadro 07 – Valores para eixo simples, tandem duplo e tandem triplo

Eixo simples			Tandem duplo			Tandem triplo		
Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições	Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições	Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições
7	65	474500	12	161	1175300	18	141	1029300
8	47	343100	14	136	990800	21	103	751900
9	30	219000	16	110	803000	24	55	401500
10	20	146000	18	75	577500	27	22	160600
11	9	65700	20	57	416100	30	10	73000
12	5	36500	22	18	131400	33	4	29200
13	2	14600	24	7	51100	36	1	7300
14	1	7300	26	2	14600			

Fonte: AUTORES, 2021.

2. Determinar a Tensão Equivalente para eixos simples, tandem duplos e tandem triplos;
 - Eixo simples = 1,29
 - Tandem duplo = 1,08

- Tandem triplo = 0,87

3. Determinar os Fatores de Erosão, de acordo com o tipo de junta e o tipo de acostamento;

- Eixo simples = 2,34
- Tandem duplo = 2,38
- Tandem triplo = 2,4

$$\text{Interpolação (tandem triplo)} = 2,44 - (2,44 - 2,32) \times 20 \div 60 = 2,4$$

4. Calcular os Fatores de Fadiga para os eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, (Tensões Equivalentes divididas pela resistência de projeto).

$$\text{Eixo simples} = 1,29 \div 4,5 = 0,29$$

$$\text{Tandem duplo} = 1,08 \div 4,5 = 0,24$$

$$\text{Tandem triplo} = 0,87 \div 4,5 = 0,19$$

5. Repetições admissíveis com o fator de fadiga e as cargas por eixos. (Quadros 08, 09 e 10).

Quadro 08 - Repetições admissíveis com o fator de fadiga para eixo simples

Eixo simples					
Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições	Carga por eixo $X \times F$	Repetições admissíveis	Consumo de fadiga
7	65	474500	$7 \times 1,2 = 8,4$	Ilimitado	0
8	47	343100	$8 \times 1,2 = 9,6$	Ilimitado	0
9	30	219000	$9 \times 1,2 = 10,8$	Ilimitado	0
10	20	146000	$10 \times 1,2 = 12,0$	Ilimitado	0
11	9	65700	$11 \times 1,2 = 13,2$	6.000.000	1,095
12	5	36500	$12 \times 1,2 = 14,4$	800.000	4,563
13	2	14600	$13 \times 1,2 = 15,6$	100.500	14,527
14	1	7300	$14 \times 1,2 = 16,8$	50.000	14,600

Fonte: AUTORES, 2021.

Quadro 09 - Repetições admissíveis com o fator de fadiga para tandem duplo

Tandem duplo					
Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições	Carga por eixo $X \times F$	Repetições admissíveis	Consumo de fadiga
12	161	1175300	$12 \times 1,2 = 14,4$	Ilimitado	0
14	136	990800	$14 \times 1,2 = 16,8$	Ilimitado	0
16	110	803000	$16 \times 1,2 = 19,2$	Ilimitado	0
18	75	577500	$18 \times 1,2 = 21,6$	Ilimitado	0
20	57	416100	$20 \times 1,2 = 24,0$	Ilimitado	0
22	18	131400	$22 \times 1,2 = 26,4$	Ilimitado	0
24	7	51100	$24 \times 1,2 = 28,8$	Ilimitado	0
26	2	14600	$26 \times 1,2 = 31,2$	Ilimitado	0

Fonte: AUTORES, 2021.

Quadro 10 - Repetições admissíveis com o fator de fadiga para tandem triplo

Tandem triplo					
Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições	Carga por eixo $X \times F$	Repetições admissíveis	Consumo de fadiga
18	141	1029300	$18 \div 3 \times 1,2 = 7,2$	Ilimitado	0
21	103	751900	$21 \div 3 \times 1,2 = 8,4$	Ilimitado	0
24	55	401500	$24 \div 3 \times 1,2 = 9,6$	Ilimitado	0
27	22	160600	$27 \div 3 \times 1,2 = 10,8$	Ilimitado	0
30	10	73000	$30 \div 3 \times 1,2 = 12,0$	Ilimitado	0
33	4	29200	$33 \div 3 \times 1,2 = 13,2$	Ilimitado	0
36	1	7300	$36 \div 3 \times 1,2 = 14,4$	Ilimitado	0

Fonte: AUTORES, 2021.

Total de consumo de fadiga de 33,39%.

6. Repetições admissíveis com o fator de erosão e as cargas por eixo (Quadros 11, 12 e 13).

Quadro 11 - Repetições admissíveis com o fator de erosão para eixo simples

Eixo simples							
Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições	Carga por eixo $X \times F$	Repetições admissíveis	Consumo de fadiga	Repetições admissíveis	Dano por erosão
7	65	474500	$7 \times 1,2 = 8,4$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
8	47	343100	$8 \times 1,2 = 9,6$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
9	30	219000	$9 \times 1,2 = 10,8$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
10	20	146000	$10 \times 1,2 = 12,0$	Ilimitado	0	40.000.000	0,365
11	9	65700	$11 \times 1,2 = 13,2$	6.000.000	1,095	8.000.000	0,821
12	5	36500	$12 \times 1,2 = 14,4$	800.000	4,563	3.000.000	1,217
13	2	14600	$13 \times 1,2 = 15,6$	100.500	14,527	1.000.000	1,460
14	1	7300	$14 \times 1,2 = 16,8$	50.000	14,600	60.000	1,217

Fonte: AUTORES, 2021.

Quadro 12 - Repetições admissíveis com o fator de erosão para o tandem duplo

Tandem duplo							
Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições	Carga por eixo $X \times F$	Repetições admissíveis	Consumo de fadiga	Repetições admissíveis	Dano por erosão
12	161	1175300	$12 \times 1,2 = 14,4$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
14	136	990800	$14 \times 1,2 = 16,8$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
16	110	803000	$16 \times 1,2 = 19,2$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
18	75	577500	$18 \times 1,2 = 21,6$	Ilimitado	0	40.000.000	1,369
20	57	416100	$20 \times 1,2 = 24,0$	Ilimitado	0	8.000.000	5,201
22	18	131400	$22 \times 1,2 = 26,4$	Ilimitado	0	2.000.000	6,570
24	7	51100	$24 \times 1,2 = 28,8$	Ilimitado	0	1.000.000	5,110
26	2	14600	$26 \times 1,2 = 31,2$	Ilimitado	0	60.000	2,433

Fonte: AUTORES, 2021.

Quadro 13 - Repetições admissíveis com o fator de erosão para o tandem triplo

Tandem triplo							
Carga por eixo	Frequência	Nº de repetições	Carga por eixo $X \times F$	Repetições admissíveis	Consumo de fadiga	Repetições admissíveis	Dano por erosão
18	141	1029300	$18 \div 3 \times 1,2 = 7,2$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
21	103	751900	$21 \div 3 \times 1,2 = 8,4$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
24	55	401500	$24 \div 3 \times 1,2 = 9,6$	Ilimitado	0	Ilimitado	0
27	22	160600	$27 \div 3 \times 1,2 = 10,8$	Ilimitado	0	40.000.000	0,4015
30	10	73000	$30 \div 3 \times 1,2 = 12,0$	Ilimitado	0	8.000.000	0,9125
33	4	29200	$33 \div 3 \times 1,2 = 13,2$	Ilimitado	0	2.000.000	1,46
36	1	7300	$36 \div 3 \times 1,2 = 14,4$	Ilimitado	0	1.000.000	0,73

Fonte: AUTORES, 2021.

Total de dano por erosão de 29,27%.

Total de fadiga = 62,66%. Portanto, a espessura estimada cumpre com a análise de fadiga.

3.2 ESTRUTURA

Visto que o pavimento flexível é composto por um número de camadas superior ao da solução rígida, já aparentemente, a estrutura do pavimento flexível acaba por se mostrar mais complexa frente à estrutura do pavimento rígido. Considerando isso – o maior número de camadas constituintes, aparenta complexidade e afirma como fato, pois o modo como a carga será absorvida pelo pavimento dependerá da interação entre as camadas que o constituem. Como o pavimento flexível tem maior heterogeneidade na composição de seu perfil, exige uma

interação mais sofisticada entre suas camadas. Porém, está sofisticação na interação entre camadas do pavimento não resulta em benefício direto à função da pavimentação, ela acaba por tornar a execução mais trabalhosa e predisposta à incidência de defeitos.

Por outro lado, embora a estrutura do pavimento rígido seja relativamente simples, ela é menos heterogênea do ponto de vista macroscópico, e é composta por materiais produzidos por processos industriais mais controlados, permitindo melhor controle de qualidade de suas camadas constituintes, melhorando a qualidade do pavimento.

Observando a Figura 09 que ilustra a comparação da distribuição de esforços em ambos os pavimentos é possível comparar a espessura total do pavimento, já que, no caso de um pavimento rígido, sua característica costuma ser bem mais fina do que a de um pavimento flexível, mostrando que, o pavimento rígido oferece maior capacidade de carga, o que leva a uma redução na demanda de suporte das camadas.

3.3 EXECUÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, os pavimentos flexíveis tendem a ter maior espessura e consistir em mais camadas do que os pavimentos rígidos. Durante o seu processo construtivo, a compactação precisa ser realizada em várias etapas do processo construtivo, o que significa mais serviços a serem executados, o que por sua vez pode elevar os custos. É importante ressaltar que, por ter maior capacidade de suporte do que o pavimento flexível, o pavimento rígido pode economizar a camada final de ajuste do leito da estrada, o que é impossível para o pavimento flexível na maioria dos casos.

Outro ponto relacionado, ao comparar esses dois tipos de pavimentação, o pavimento flexível permite a liberação de tráfego no pavimento pavimentado em pouco tempo após sua implantação, o que é sem dúvida um fato vantajoso e desejável.

3.4 MANUTENÇÃO

Nestes dois tipos de pavimento, o aparecimento de defeitos está relacionado à má construção, carga excessiva ou baixa qualidade dos materiais utilizados, porém, observa-se que em geral a vida útil do pavimento rígido é muito maior do que a vida útil do pavimento flexível. No entanto, embora a vida útil da solução rígida seja muito mais longa do que a vida útil da solução flexível, o número de intervenções é menor.

A manutenção do pavimento rígido pode se tornar mais caro, pois a espessura das placas é maior e pode exigir uma nova reconstrução, removendo o material antigo e substituir o mesmo por novo, ao contrário do pavimento flexível que permite ser feita uma recuperação com maior facilidade e com tempo de execução inferior ao pavimento rígido. No entanto o custo de implantação da pavimentação rígida tende a ser superior, mais a longo prazo torna-se mais compensativo pois o pavimento flexível tem uma vida útil menor, sendo necessário manutenções periódicas.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como foco central a comparação entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, demonstrando qual opção possui um melhor custo benefício. Para isso, foram apresentados os principais conceitos sobre o tema destacando suas características, vantagens e desvantagens, e posteriormente, demonstrando qual a melhor opção em termos de desempenho, menor custo, menor gasto com manutenção e maior vida útil.

Devido à natureza diferente, os pavimentos discutido aqui tem métodos de projeto diferentes. A complexidade ou a precisão de qualquer método utilizado para determinar a dimensão do pavimento pode ser considerado um fator atraente, mas não é um fator decisivo na escolha do tipo de pavimento a ser utilizado. Considerando que, para efeito de comparação, apenas os dois métodos mais comuns discutidos na revisão da literatura, o método para pavimento rígido é mais preciso e confiável. O método PCA, atribuído ao projeto de pavimentos rígidos, é considerado mais preciso e confiável porque se baseia em uma teoria dos elementos finitos mais complexa e relativamente popular. O método empírico, tendo em vista o dimensionamento de pavimento flexível, é baseado em observações experimentais realizadas no exterior.

Levando em consideração as características do subleito, para o solo com menor resistência, recomenda-se o uso de pavimentação rígida, pois este tipo de pavimento não requer grande capacidade do suporte do subleito, o pavimento flexível será melhor aproveitado para solos de alta resistência, sendo que o subleito principal não é necessário para melhorar o solo de serviço, pois não há necessidade de camada de reforço e / ou sub-base, ou pelo menos a espessura dessas camadas pode ser reduzida, o que tornará as soluções flexíveis mais baratas.

Devido à distribuição de tensões relativamente concentrada e baixa resistência àos pavimentos flexíveis estão sujeitas a marcas de rodas. Portanto, deve ser evitado em locais onde o movimento do veículo é concentrado. Pode-se observar que nesse tipo de pavimento, a maior parte da abrasão visual ocorre devido ao excesso de carga na superfície da estrada, enquanto nos rígidos o desgaste decorre de erros na execução do projeto. Esse é um dos motivos pelos quais os pavimentos rígidos requerem menos manutenção do que pavimentos flexíveis, o que os torna uma opção mais vantajosa.

Em relação aos fatores econômicos, aparentemente, os pavimentos flexíveis possuem maior economia quanto ao custo. Fator este que, afetou a popularidade das estradas e rodovias no Brasil hoje. Entretanto, ao considerar a vida útil de longo prazo, a vantagem da flexibilidade

sobre a rigidez perde valor porque requer maiores custos de manutenção para torná-la em um estado satisfatório.

Enquanto isso, os pavimentos rígidos podem ser caros nas fases iniciais de construção, porém, quando a análise de custos considera ações futuras de proteção e reparo de estruturas de pavimentos, a tendência observada é que soluções rígidas são mais baratas que pavimentos flexíveis.

Com base em tudo o que foi dito, conclui-se que os pavimentos rígidos possuem maior benefício, uma vez que, esse tipo de pavimento requer uma quantidade menor de manutenções durante a vida útil, se tornando mais econômico a longo prazo. Além disso, o mesmo possui uma maior resistência a ataques de produtos químicos e maior visibilidade horizontal proporcionando assim uma maior segurança. Pelos métodos e características comparados, o pavimento rígido é um produto com melhor custo benefício e possui um processo mais complexo.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que, a pavimentação é parte essencial das rodovias e levando-se em consideração a atual necessidade de utilização de materiais sustentáveis, sugere-se como tema para pesquisas futuras:

- A aplicação de materiais sustentáveis na pavimentação de rodovias;
- Estudo sobre a reciclagem de pavimento asfáltico;

REFERÊNCIAS

ADADA, Lucas Bach. **Programa de integração e capacitação – DER 2008**. Disponível em: <https://docplayer.com.br/17341240-Programa-de-integracao-e-capacitacao-der-2008-topicos-de-de-projeto-geometrico-rodoviario-lucas-bach-adada.html>. Acesso em: 05/06/2021.

ARAÚJO, Marcelo Almeida; *et. al.* **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento. 2016. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/metodos-de-pavimentacao>. Acesso em: 04/06/2021.

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

BENEVIDES, S. A. S. **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

BERNUCCI, Liedi Bariani. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras - ABEDA. Rio de Janeiro, 2008.

BIANCHI, Flavia Regina; BRITO, Isis Raquel Tacla; CASTRO, Veronica Amanda Brombley. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste. 2008. Disponível em: http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf. Acesso em: 04/05/2021.

BRASIL, Governo do. **IBGE mapeia a infraestrutura dos transportes no Brasil**. 2017. Disponível em: <https://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2014/11/ibge-mapeia-ainfraestrutura-dos-transportes-no-brasil>. Acesso em: 02/06/2021.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. São Paulo: Exceção Editorial, 2011.

CASTRO, Bruno Almeida Cunha. **Construção de estradas e vias urbanas**. 2010. Universidade Federal de Minas Gerais. UFMG, 2010.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. 2017. Disponível em: <http://anut.org/wp-content/uploads/2017/10/Pavimentos.pdf>. Acesso em: 03/06/2021.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. **Manual de Pavimentos rígidos**. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2005.

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

FILHO, A. L. S. **Estudo Comparativo de Viabilidade Técnica e Econômica Entre Pavimentos Rígido e Flexível Aplicados a Rodovia BR-408 PE / Augusto**. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade do Vale do Ipojuca. Pernambuco, 2011.

GRECO, J. A. S. **Cargas Rodoviárias e Tráfego**. 2013. Notas de Aula – Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <http://etg.ufmg.br/~jisela/>. Acesso em: 15/10/2021.

MACIEL, Anderson Brum. **Dossiê Técnico – Pavimentos Intertravados**. Santa Rosa: SENAI Virgílio Lunardi, 2007.

MARQUES, G. L. de O. **Terminologia e Classificação dos Pavimentos**. Curso Básico Intensivo de Pavimentação Urbana – Módulo I. Juiz de Fora, 2002.

MARQUES, G. L. O. **Pavimentação**. Notas de Aula – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2013. Disponível em: <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2012/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>. Acesso em: 15/10/2021

MENDES, Celso Bráulio Alves; NUNES, Fabio Rinaldi. **Asfalto Borracha – Minimizando os impactos ambientais gerados pelo descarte de pneus inservíveis no meio ambiente**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade Brasileira – UNIVIX. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/2010/artigos_teses/2010/Biologia/monografias/2asfalto.pdf. Acesso em: 03/06/2021.

PEREIRA, Mirian Carvalho. **Revestimentos asfálticos: tipos e propriedades**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário de Formiga – UNIFOR. Disponível em: <https://bibliotecadigital.uniformg.edu.br:21015/xmlui/bitstream/handle/123456789/264/TCC%20MIRIAN%20PDF.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03/06/2021.

REIS, Rafael M. **Martins et al. Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. ABEDA. 2. ed. Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, Luís Francisco Amaral da. **Pavimentos aeroportuários: análise de soluções rígidas e de soluções flexíveis**. 2009. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade de Aveiro, 2009.

SILVA, Alanna Lopes da. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e pavimento flexível**. Trabalho de Conclusão de curso. Unicesumar - Centro Universitário de Maringá, Maringá, 2019. Disponível em: <http://rdu.unicesumar.edu.br/bitstream/123456789/5277/1/TRABALHO%20DE%20CONCLUS%20DE%20CURSO.pdf>. Acesso em: 01/06/2021.

SILVA, Paulo Fernando A. **Manual de Patologia e Manutenção de Pavimentos**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2008.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual técnico de pavimentação: volume 1**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2007.

VENESCAU, Ricardo. **Dimensionamento de Pavimento Flexível – Método do DNER**. Engenharia Rodoviária Teoria e aplicação. 2020. Disponível em:

<http://engenhariarodoviaria.com.br/dimensionamento-de-pavimentos-flexiveis-metodo-dner/>. Acesso em: 04/06/2021.

VENESCAU, Ricardo. **Estrutura e Tipos de Pavimentos**. Engenharia Rodoviária Teoria e aplicação. 2021. Disponível em: <http://engenhariarodoviaria.com.br/estrutura-e-tipos-de-pavimentos/>. Acesso em: 04/06/2021.

ANEXO I

Figura 17 – Tensão equivalente para eixo simples e tandem duplo (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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	0,69	0,62	0,66	0,58			

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT, 2005

Figura 18 – Tensão equivalente para tandem triplo (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	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

Fonte: DNIT, 2005

Figura 19 – Tensão equivalente para eixo simples e tandem duplo (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	0,72	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

Fonte: DNIT, 2005

Figura 20 – Tensão equivalente para tandem triplo (Pavimento com acostamento de concreto)

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

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fonte: DNIT, 2005

ANEXO II

Figura 21 – Fator de erosão para eixos simples e tandem duplos (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		100		150		200					
	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	3,59	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	3,49	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	3,40	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	3,31	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	3,23	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	3,16	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	3,09	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	3,02	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	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	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	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	2,78	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	2,73	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	2,68	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	2,63	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	2,59	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	2,54	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	2,50	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	2,46	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	2,42	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	2,38	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	2,34	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	2,30	2,48				

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Figura 22 – Fator de erosão para eixos tandem triplos (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	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

Fonte: DNIT, 2005

Figura 23 – Fator de erosão para eixos simples e tandem duplos (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	ES	ETD	ES	ETD			
12	3,25	3,29	3,20	3,19	3,18	3,13	3,11	3,17	3,11	3,16	3,09	3,09	3,13	3,04	3,13	3,04	3,11	3,03			
13	3,16	3,23	3,11	3,12	3,09	3,06	3,08	3,08	3,04	3,06	3,02	3,02	3,06	2,97	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	2,97	2,98	2,95	2,95	2,98	2,90	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	2,91	2,90	2,88	2,88	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	2,85	2,82	2,82	2,82	2,82	2,79	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	2,79	2,75	2,77	2,77	2,75	2,72	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	2,74	2,69	2,71	2,66	2,71	2,66	2,65	2,64	2,64	2,62			
19	2,74	2,92	2,68	2,80	2,65	2,72	2,64	2,69	2,69	2,62	2,66	2,66	2,62	2,59	2,60	2,57	2,57	2,57			
20	2,69	2,88	2,62	2,76	2,59	2,68	2,58	2,64	2,64	2,56	2,62	2,62	2,56	2,53	2,55	2,51	2,51	2,51			
21	2,63	2,84	2,57	2,71	2,53	2,64	2,52	2,60	2,60	2,51	2,57	2,48	2,51	2,48	2,50	2,46	2,46	2,47			
22	2,58	2,80	2,51	2,68	2,48	2,59	2,47	2,56	2,56	2,45	2,53	2,42	2,45	2,42	2,46	2,40	2,40	2,42			
23	2,53	2,77	2,46	2,64	2,43	2,55	2,42	2,51	2,42	2,40	2,48	2,37	2,41	2,37	2,41	2,35	2,35	2,37			
24	2,48	2,74	2,42	2,60	2,38	2,52	2,37	2,48	2,36	2,36	2,45	2,33	2,41	2,38	2,31	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	2,31	2,42	2,28	2,34	2,28	2,34	2,26	2,26	2,29			
26	2,40	2,68	2,33	2,54	2,30	2,46	2,28	2,41	2,27	2,27	2,38	2,24	2,31	2,24	2,31	2,22	2,22	2,25			
27	2,36	2,65	2,29	2,51	2,26	2,43	2,24	2,38	2,22	2,22	2,35	2,20	2,27	2,20	2,27	2,17	2,17	2,21			
28	2,33	2,62	2,25	2,49	2,22	2,40	2,20	2,35	2,18	2,18	2,32	2,16	2,24	2,16	2,24	2,13	2,13	2,18			
29	2,29	2,60	2,22	2,46	2,18	2,37	2,16	2,33	2,14	2,14	2,30	2,12	2,21	2,12	2,21	2,09	2,09	2,14			
30	2,26	2,57	2,18	2,43	2,15	2,53	2,12	2,30	2,11	2,11	2,27	2,08	2,18	2,08	2,18	2,06	2,06	2,11			
31	2,22	2,55	2,15	2,41	2,11	2,32	2,09	2,27	2,07	2,07	2,24	2,04	2,15	2,04	2,15	2,02	2,02	2,07			
32	2,19	2,52	2,11	2,38	2,08	2,29	2,05	2,25	2,03	2,03	2,22	2,01	2,13	2,01	2,13	1,98	1,98	2,04			
33	2,16	2,50	2,08	2,36	2,04	2,27	2,02	2,22	2,00	2,00	2,19	1,99	2,10	1,99	2,10	1,95	1,95	2,01			
34	2,13	2,48	2,05	2,34	2,01	2,25	1,98	2,20	1,97	1,97	2,17	1,94	2,07	1,94	2,07	1,92	1,92	1,98			

ES: Eixos Simples
ETD: Eixos Tandem Duplos

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

ETT: Eixos Tandem Triplos

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

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT, 2005

Figura 26 – Fator de erosão para eixos tandem triplos (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
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,68	3,60	3,56	3,52	3,45
13	3,60	3,51	3,47	3,44	3,37
14	3,53	3,43	3,39	3,36	3,29
15	3,47	3,36	3,31	3,28	3,22
16	3,41	3,30	3,25	3,21	3,15
17	3,35	3,24	3,19	3,15	3,08
18	3,30	3,19	3,13	3,09	3,02
19	3,25	3,14	3,08	3,04	2,96
20	3,21	3,09	3,03	2,99	2,91
21	3,16	3,05	2,99	2,94	2,86
22	3,12	3,01	2,94	2,90	2,82
23	3,08	2,97	2,90	2,86	2,77
24	3,05	2,93	2,86	2,82	2,73
25	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69
26	2,98	2,86	2,79	2,74	2,66
27	2,94	2,82	2,76	2,71	2,66
28	2,91	2,79	2,72	2,68	2,59
29	2,88	2,76	2,69	2,65	2,55
30	2,85	2,73	2,66	2,62	2,52
31	2,82	2,70	2,63	2,59	2,49
32	2,80	2,68	2,61	2,56	2,46
33	2,77	2,65	2,58	2,53	2,44
34	2,74	2,62	2,55	2,50	2,41

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fonte: DNIT, 2005

Figura 27 – Fator erosão para eixos simples e tandem duplos (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	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	2,84	2,84	2,84	2,94	2,84	2,83	2,92	2,83	2,83		
13	2,97	3,02	2,92	2,92	2,90	2,86	2,87	2,83	2,86	2,80	2,80	2,80	2,80	2,84	2,76	2,74	2,82	2,74	2,74		
14	2,88	2,96	2,83	2,85	2,81	2,79	2,78	2,76	2,77	2,73	2,73	2,73	2,73	2,75	2,68	2,66	2,73	2,66	2,66		
15	2,80	2,89	2,75	2,79	2,73	2,72	2,70	2,69	2,69	2,66	2,66	2,66	2,66	2,67	2,61	2,59	2,65	2,59	2,59		
16	2,72	2,84	2,67	2,73	2,65	2,66	2,62	2,63	2,61	2,60	2,60	2,60	2,60	2,59	2,55	2,52	2,57	2,52	2,52		
17	2,64	2,78	2,60	2,68	2,58	2,60	2,55	2,57	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	2,52	2,48	2,48	2,49	2,45	2,45		
18	2,57	2,73	2,53	2,62	2,51	2,55	2,48	2,51	2,47	2,48	2,48	2,48	2,48	2,45	2,42	2,42	2,42	2,39	2,39		
19	2,51	2,69	2,47	2,57	2,44	2,50	2,41	2,46	2,40	2,43	2,43	2,43	2,43	2,38	2,36	2,36	2,36	2,33	2,33		
20	2,44	2,64	2,41	2,53	2,38	2,45	2,35	2,41	2,34	2,38	2,38	2,38	2,38	2,32	2,31	2,29	2,29	2,28	2,28		
21	2,38	2,60	2,35	2,48	2,32	2,40	2,29	2,36	2,28	2,33	2,33	2,33	2,33	2,26	2,26	2,23	2,23	2,22	2,22		
22	2,33	2,56	2,30	2,44	2,27	2,36	2,24	2,32	2,23	2,29	2,29	2,29	2,29	2,21	2,21	2,18	2,18	2,17	2,17		
23	2,27	2,52	2,24	2,40	2,21	2,31	2,18	2,27	2,17	2,24	2,24	2,24	2,24	2,15	2,15	2,12	2,12	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	2,20	2,20	2,20	2,10	2,10	2,07	2,07	2,08	2,08		
25	2,18	2,43	2,14	2,33	2,11	2,24	2,09	2,20	2,08	2,17	2,17	2,17	2,17	2,05	2,05	2,02	2,02	2,03	2,03		
26	2,14	2,39	2,09	2,29	2,06	2,21	2,04	2,17	2,03	2,13	2,13	2,13	2,13	2,01	2,01	1,97	1,97	1,99	1,99		
27	2,19	2,35	2,05	2,26	2,02	2,17	2,00	2,13	1,99	2,10	2,10	2,10	2,10	1,96	1,96	1,93	1,93	1,95	1,95		
28	2,06	2,32	2,01	2,23	1,98	2,14	1,95	2,10	1,94	2,07	2,07	2,07	2,07	1,92	1,92	1,98	1,98	1,94	1,94		
29	2,03	2,28	1,97	2,19	1,94	2,11	1,91	2,07	1,90	2,04	2,04	2,04	2,04	1,88	1,88	1,85	1,85	1,87	1,87		
30	1,99	2,25	1,93	2,16	1,90	2,08	1,87	2,04	1,86	2,01	2,01	2,01	2,01	1,83	1,83	1,81	1,81	1,83	1,83		
31	1,96	2,21	1,89	2,13	1,86	2,05	1,83	2,01	1,82	1,98	1,98	1,98	1,98	1,80	1,80	1,77	1,77	1,80	1,80		
32	1,92	2,18	1,86	2,11	1,83	2,03	1,80	1,99	1,79	1,95	1,95	1,95	1,95	1,76	1,76	1,74	1,74	1,76	1,76		
33	1,89	2,15	1,82	2,08	1,79	2,00	1,76	1,96	1,75	1,92	1,92	1,92	1,92	1,72	1,72	1,70	1,70	1,73	1,73		
34	1,86	2,12	1,79	2,05	1,76	1,97	1,73	1,93	1,72	1,90	1,90	1,90	1,90	1,69	1,69	1,67	1,67	1,70	1,70		

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT, 2005

Figura 28 – Fator de erosão para eixos tandem triplos (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto

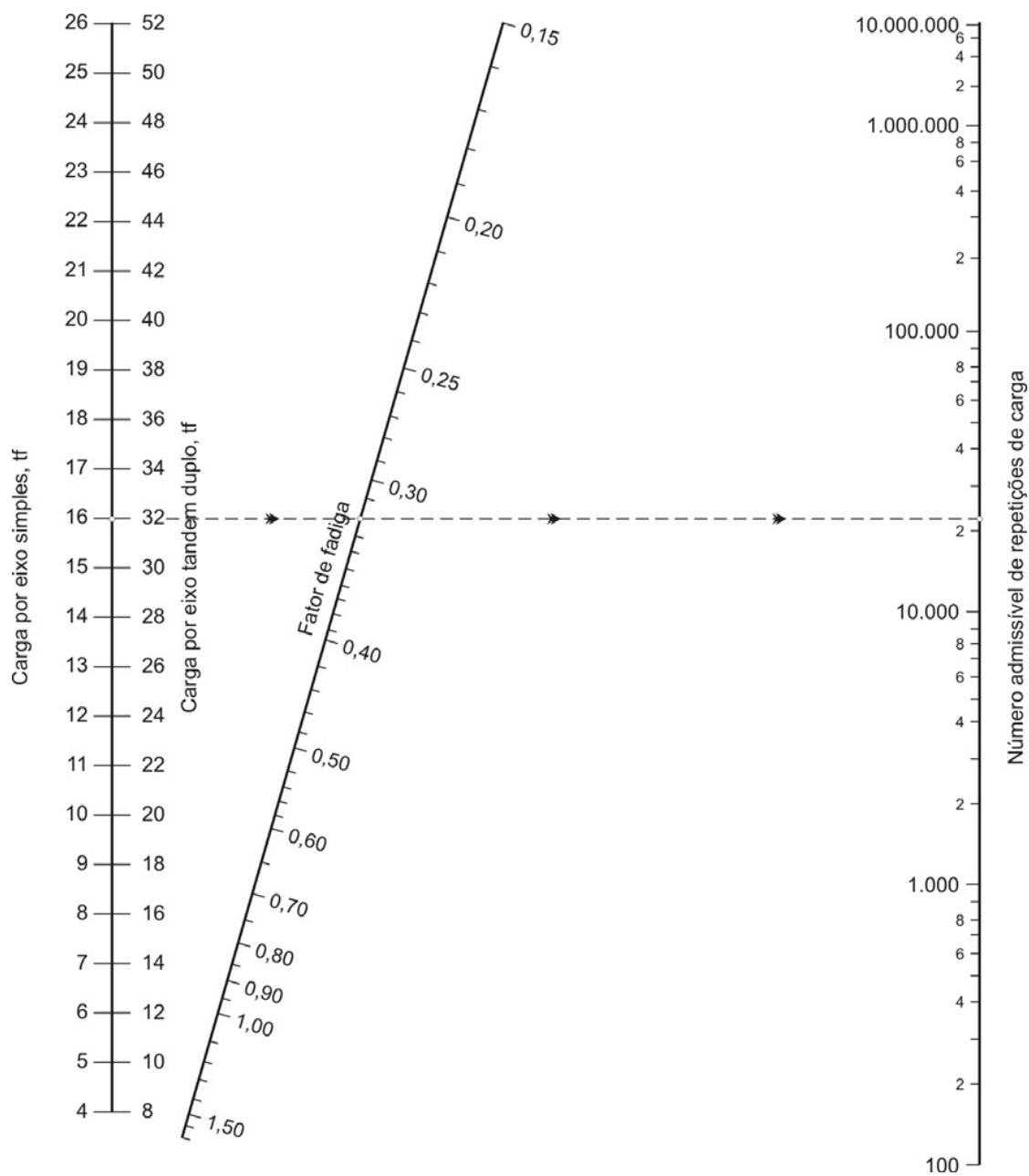
Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,12	2,99	2,93	2,90	2,85	2,82
13	3,06	2,92	2,85	2,81	2,76	2,73
14	3,00	2,86	2,78	2,74	2,67	2,64
15	2,95	2,80	2,73	2,67	2,59	2,56
16	2,91	2,76	2,67	2,62	2,52	2,49
17	2,86	2,71	2,62	2,57	2,47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

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fonte: DNIT, 2005

ANEXO III

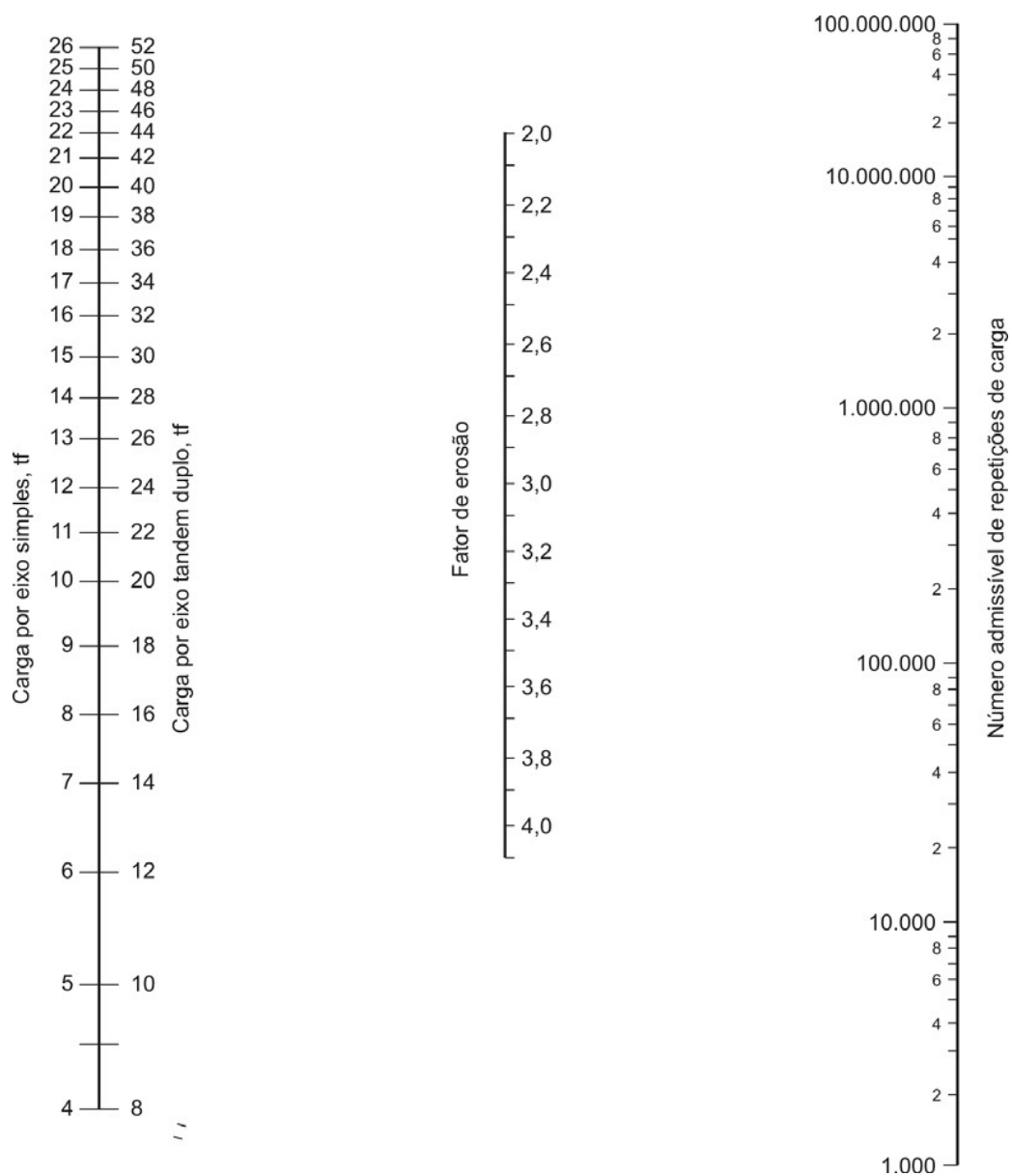
Figura 29 – Análise de fadiga - número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga (com ou sem acostamento de concreto)



Fonte: DNIT, 2005

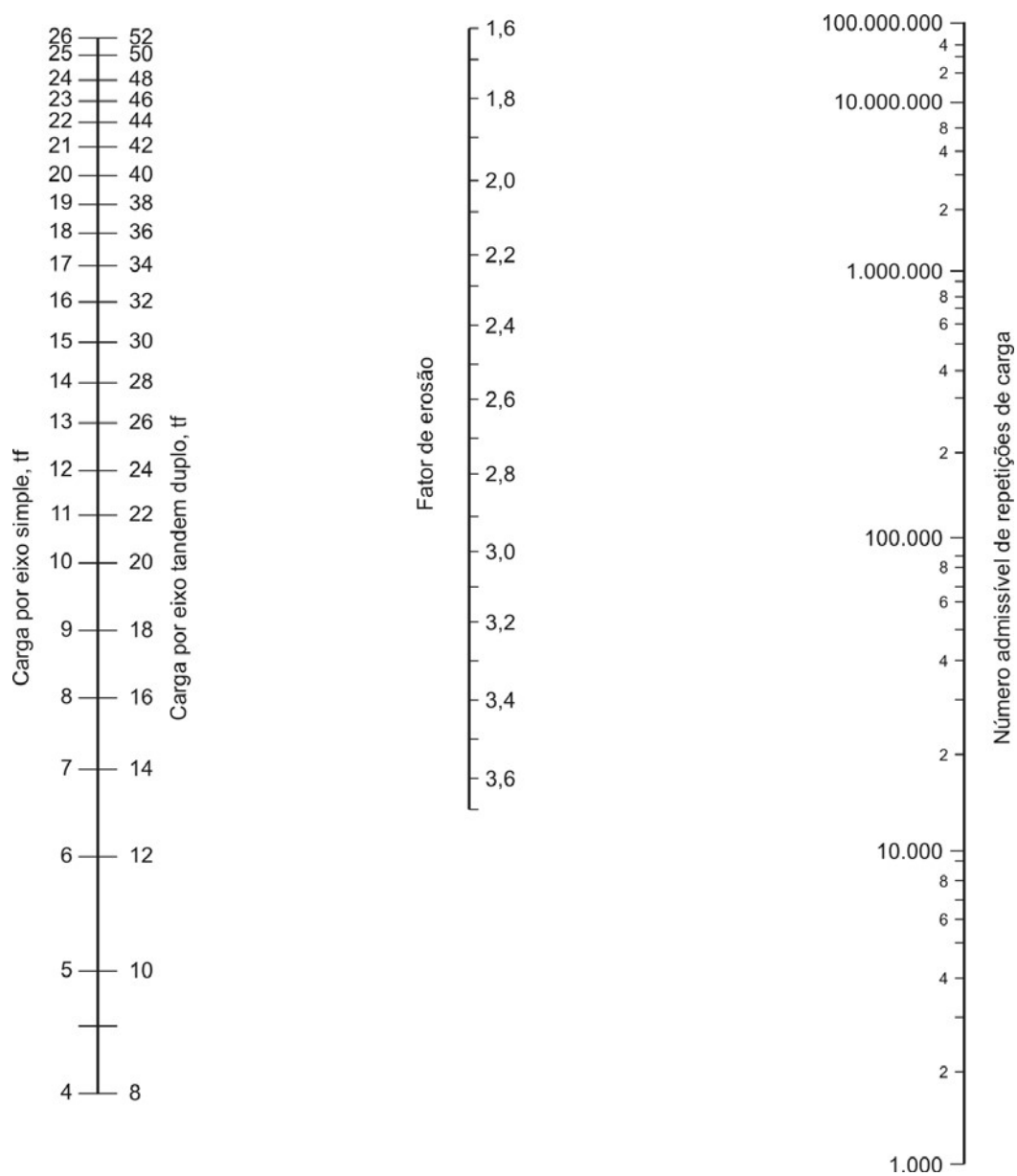
ANEXO IV

**Figura 30 – Análise de erosão - número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão
(sem acostamento de concreto)**



Fonte: DNIT, 2005

**Figura 31 – Análise de erosão - número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão
(sem acostamento de concreto)**



Fonte: DNIT, 2005