



**Universidade Politécnica  
A POLITÉCNICA**

**INSTITUTO SUPERIOR DE GESTÃO, CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS**

Curso:

Licenciatura em Engenharia civil

Tema:

**DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO**

Autor: Hugo Miguel Pechirra Simões

Código: 496721

Agosto de 2024



**Universidade Politécnica  
A POLITÉCNICA**

**INSTITUTO SUPERIOR DE GESTÃO, CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS**

Tema:

**DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO**

**ESTUDO DE CASO: DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DO PARQUE  
DOS TRANSPORTES CATOJA**

Autor: Hugo Miguel Pechirra Simões

Código: 496721

Supervisor: Prof. Doutor Eng. José Francisco Rufino Diogo

Trabalho de conclusão de curso apresentado, no curso de Engenharia Civil, como requisito para obtenção do grau de licenciatura, sob a orientação do Prof. Doutor Eng. José Francisco Rufino Diogo

Agosto de 2024

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Declaro por minha honra que este trabalho foi inteiramente realizado por mim, sendo fruto da minha dedicação e pesquisa, constados ao longo do mesmo e na bibliografia todas as fontes utilizadas para a sua realização.

.....

Hugo Simões

## **APROVAÇÃO DO JÚRI**

Este trabalho foi aprovado por nós, com \_\_\_\_\_ valores, membros do júri da Universidade Politécnica A Politécnica.

Maputo, aos: ...../...../ 2024

---

(O Presidente do Júri)

---

(O Arguente)

---

(O Supervisor)

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado aos meus pais Paulo Jorge Lebreux Simões e Lucinda Maria Mouco Pechirra Simões e aos meus irmãos Dirce Lara dos Prazeres Simões, Bruno Jorge Pechirra Simões e Paulo Jorge Lebreux Simões Júnior.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus primeiramente por ter guardado, cuidado e guiado todos meus passos nessa jornada, por ter me proporcionado saúde física e mental, através da qual foi possível enfrentar e vencer mais uma batalha no percurso da vida.

A minha família no geral, aos meus pais, Paulo Simões e Lucinda Simões que me deram grandes ensinamentos e a oportunidade de seguir em frente com meus próprios pés, a minha Tia Maria Margarida Pechirra e aos meus eternos e amados irmãos, Bruno Simões, Paulo Simões Júnior e Dirce Simões, pelo incentivo em todos os momentos directa ou indirectamente, me apoiando e incentivando para que tudo dê certo.

Aos meus amigos, pelo incentivo e companheirismo em todos os momentos bons e maus, os queridos e grandes amigos que tive a oportunidade de conhecer e conviver durante esses quatro anos de curso, pelo incentivo e aprazível ambiente de ensino e trabalho.

Agradecer ao Prof. Doutor Eng. José Francisco Rufino Diogo pelo seu apoio e acompanhamento no percurso de elaboração do trabalho final.

## RESUMO

O dimensionamento de pavimentos rígidos é uma área central da engenharia de transportes, focada no projeto de pavimentos duráveis e resistentes, capazes de suportar tráfego intenso e cargas pesadas, especialmente em estradas e aeroportos. Pavimentos rígidos, geralmente feitos de concreto, são essenciais para a segurança, eficiência e sustentabilidade das infraestruturas viárias, garantindo sua durabilidade frente ao uso contínuo. Esse estudo analisa os princípios do dimensionamento de pavimentos rígidos, incluindo cálculo de espessuras, escolha de materiais, condições de tráfego e métodos de construção, visando fornecer uma base sólida para o desenvolvimento de infraestruturas confiáveis que apoiem a mobilidade e o crescimento econômico

**Palavras-chave:** Pavimentos rígidos, Dimensionamento de pavimentos, Cimento Portland. PCA/84.

## **ABSTRACT**

The design of rigid pavements is a central area of transportation engineering, focused on the design of durable and resistant pavements capable of supporting heavy traffic and loads, especially on roads and airports. Rigid pavements, typically made of concrete, are essential for the safety, efficiency, and sustainability of road infrastructure, ensuring their durability under continuous use. This study explores the principles of rigid pavement design, including thickness calculations, material selection, traffic conditions, and construction methods, aiming to provide a solid foundation for the development of reliable infrastructure that supports mobility and economic growth.**Keywords:** Rigid pavements, Pavement design, Portland cement. PCA/84.

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

- AASHO - American Association of State Highway Officials
- AASHTO - American Association Of State Highway And Transportation Officials
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI - American Concrete Institute
- ASTM - American Society of Testing Materials
- B.A.C. - Betão Armado Contínuo
- CBR - California Bearing Test – Índice de Suporte Califórnia
- CCR - Concreto Compactado a Rolo
- CEN - Comité Europeu de Normalização
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- EN – Normas Europeias mantidas pelo Comité Europeu de Normalização
- EP - Estradas de Portugal, EPE
- JAЕ - Junta Autónoma de Estradas
- MACOPAV – Manual de Concepção de Pavimentos
- PCA - Portland Cement Association

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.3.1 CAMADAS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEL, RÍGIDO E SEMI-RÍGIDO	8
FIGURA 2.4.2 DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NO PAVIMENTO RÍGIDO.	10
FIGURA 2.5.1 PAVIMENTOS DE BETÃO SIMPLES COM E SEM BARRA DE TRANSFERÊNCIA (FONTE: CARVALHO, 2009)	12
FIGURA 2.5.2.1 PAVIMENTO COM ARMADURA DISTRIBUÍDA DESCONTINUAMENTE (FONTE: CARVALHO, 2009)	14
FIGURA 2.5.2.2 ESTRUTURA DO PAVIMENTO ESTRUTURALMENTE ARMADO (FONTE: CARVALHO, 2009)	14
FIGURA 2.5.4. PAVIMENTO CONTINUAMENTE ARMADO (FONTE: CARVALHO, 2009)	15
FIGURA 2.5.5. PAVIMENTO DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO (FONTE: GUERRA, (2017))	16
FIGURA 2.5.6. PAVIMENTO DE BETÃO COM REFORÇO DE FIBRAS (FONTE: GUERRA (2017))	17
FIGURA 3.3.2. CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE CBR E K (FONTE: PCA, 1984)	26
FIGURA 3.3.4. CURVA DE FADIGA (FONTE: DNIT, 2005)	27
FIGURA 3.3.3. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO ADMISSÍVEL DE REPETIÇÕES DE CARGA PELA FADIGA (FONTE: PCA, 1984)	29
FIGURA 3.3.4. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO ADMISSÍVEL DE REPETIÇÕES DE CARGA PELA EROÇÃO (FONTE: PCA, 1984)	31
FIGURA 4. LOCALIZAÇÃO DO PAVIMENTO DE ESTUDO DE CASO NA FIGURA A DIREITA (FONTE: GOOGLE EARTH, ADAPTADO PELO AUTOR)	34
FIGURA 4.2.2. CAMIÃO DE 6 EIXOS.	35
FIGURA 4.2.3. CAMIÃO DE 7 EIXOS DE LONGO CURSO.	36
TABELA 4.2.2. TIPOS DE CAMIÕES E DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS POR EIXOS.	36
TABELA 5. FACTORES DE SEGURANÇA (FSC).	37
TABELA 5.1.1. NÚMERO DE SOLICITAÇÕES DURANTE PERÍODO DE DIMENSIONAMENTO	38

FIGURA 5.4.1. DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES: A) FACE INFERIOR B) NO TOPO DA PLACA	51
FIGURA 5.4.2. DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DA SUB-BASE, FACE INFERIOR	52
FIGURA 5.4.3. DEFORMAÇÃO DAS LAJES(FONTE: EVERFE 2.24, ADAPTADO PELO AUTOR)	52
FIGURA 1 ÁBACO PARA A DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REPETIÇÕES ADMISSÍVEIS DE CADA EIXO PARA A ANÁLISE A FADIGA [FONTE: PCA, (1984)]	62

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.2.2. TIPOS DE CAMIÕES E DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS POR EIXOS.	36
TABELA 5.1.1. NÚMERO DE SOLICITAÇÕES DURANTE PERÍODO DE DIMENSIONAMENTO.	38
TABELA 5.1.2. VALOR DE TENSÃO EQUIVALENTE.	38
TABELA 5.1.3. VALOR DE FACTOR DE EROSÃO.	39
TABELA 5.1.4. DIMENSIONAMENTO DO MÉTODO PCA PARA 25CM DE ESPESSURA.	40
FIGURA 5.1. REPETIÇÕES ADMISSÍVEIS PARA A FADIGA E EROSÃO (25CM).	40
TABELA 5.1.5. DIMENSIONAMENTO DO MÉTODO PCA PARA 20CM DE ESPESSURA.	41
FIGURA 5.2. REPETIÇÕES ADMISSÍVEIS PARA A FADIGA E EROSÃO (20CM).	41
TABELA 5.1.6. DIMENSIONAMENTO DO MÉTODO PCA PARA 15CM DE ESPESSURA.	42
FIGURA 5.3. REPETIÇÕES ADMISSÍVEIS PARA A FADIGA E EROSÃO (15CM).	42
TABELA 5.2. DIÂMETRO, COMPRIMENTO E ESPAÇAMENTO DE BARRAS DE TRANSFERÊNCIA( BARRAS- AÇO CA-25), FONTE: DNIT(2005).	48
TABELA 5.4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ESPESSURAS E DAS BARRAS.	53
TABELA I FOLHA DE CÁLCULO DO MÉTODO DO PCA PARA VERIFICAÇÃO DA ESPESSURA DA LAJE. [FONTE: PCA (1984)]	59
TABELA II AUMENTO DE K DEVIDO A PRESENÇA DE SUB-BASE: 1) GRANULAR, 2) DE SOLO-CIMENTO, 3) SOLO MELHORADO COM CIMENTO E 4) BETÃO ROLADO. (FONTE: HENRIQUE)	60
TABELA III CÁLCULO DA TENSÃO EQUIVALENTE, SEM BERMAS DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	61
TABELA IV CÁLCULO DA TENSÃO EQUIVALENTE, NO CASO DE EXISTÊNCIA DAS BERMAS DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	61 62

TABELA V	FACTORES DE EROSÃO – JUNTAS COM BARRAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA, SEM BERMA DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	63
TABELA VII	FACTORES DE EROSÃO – JUNTAS COM TRANSFERÊNCIA DE CARGA POR ENTROSAGEM DE AGREGADOS, SEM BERMA DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	63
TABELA VII	FACTORES DE EROSÃO – JUNTAS COM BARRAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA, COM BERMA DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	64
TABELA IX	FACTORES DE EROSÃO – JUNTAS COM TRANSFERÊNCIA DE CARGA POR ENTROSAGEM DE AGREGADOS, COM BERMA DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	64
TABELA X	ÁBACO PARA A DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REPETIÇÕES ADMISSÍVEIS DE CADA EIXO PARA A ANÁLISE À EROSÃO (DESGASTE), NO CASO DA EXISTÊNCIA DE BERMAS DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	65
TABELA XI	ÁBACO PARA A DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REPETIÇÕES ADMISSÍVEIS DE CADA EIXO PARA A ANÁLISE À EROSÃO (DESGASTE), SEM BERMAS DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	65
TABELA VIII	XII CÁLCULO DA TENSÃO EQUIVALENTE, SEM E COM BERMAS DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	66
TABELA XIII	FACTORES DE EROSÃO PARA EIXOS TRIDEM – JUNTAS COM BARRAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA, SEM E COM BERMA DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	66
TABELA XIV	FACTORES DE EROSÃO PARA EIXOS TRIDEM – JUNTAS COM TRANSFERÊNCIA DE CARGA POR ENTROSAGEM DE AGREGADOS, SEM E COM BERMA DE BETÃO. [FONTE: PCA, (1984)]	66

## ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE HONRA .....	i
APROVAÇÃO DO JÚRI .....	ii
DEDICATÓRIA .....	iii
AGRADECIMENTOS .....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	x
CAPÍTULO I–INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objectivos .....	2
1.2.1. ObjectivoGeral.....	2
1.2.2. Objectivos Específicos .....	2
1.3. Justificativa .....	2
1.4. Definição do problema.....	3
1.5. Hipóteses (H0 e H1) .....	3
1.6. Capítulos propostos.....	4
CAPÍTULO II–REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. Historial da pavimentação .....	5
2.2. Definição de pavimento .....	6
2.3. Introdução ao conceito de pavimento rígido.....	7
2.3.1. Diferença do pavimento rígido com o flexível e semi-rígido.....	7
2.3.2. Vantagens na escolha do pavimento rígido .....	8
2.3.3. Desvantagens na escolha do pavimento rígido.....	8
2.3.4. Aplicação .....	8
2.4. Constituição e composição do pavimento rígido .....	9
2.4.1. Constituição do pavimento rígido .....	9
2.4.2. Modo de funcionamento do pavimento rígido .....	9
2.4.3. As camadas do pavimento rígido e suas funções .....	10
2.5. Tipos de pavimentos rígidos .....	12
2.5.1. Pavimentos de betão simples com juntas .....	12

2.5.2.	Pavimentos de betão armado com juntas.....	13
2.5.3.	Pavimentos de betão armado contínuo (B.A.C.) reforçados com camada superficial de asfalto.....	14
2.5.4.	Pavimentos de betão pré-esforçado .....	15
2.5.5.	Pavimento de betão com reforço de fibras .....	16
2.6.	Juntas .....	17
2.6.1.	Tipos de juntas e suas funções.....	17
<b>CAPÍTULO III– METODOLOGIA DE PESQUISA .....</b>		<b>21</b>
3.1.	Metodologia.....	21
3.2.	Introdução .....	22
3.3.	Metodologias de dimensionamento .....	23
3.4.	Metodologias de dimensionamento de pavimentos rígidos.....	24
3.4.1.	Método PCA (1984) .....	24
3.4.2.	Ensaio CBR e Módulo de Reação .....	25
3.4.3.	Lei da Fadiga .....	27
3.4.4.	Lei da Erosão .....	30
3.4.5.	Programa EverFE2.24 .....	32
<b>CAPÍTULO IV– APRESENTAÇÃO, LEITURA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS RECOLHIDOS.....</b>		<b>34</b>
<b>ESTUDO DE CASO: PARQUE DE CAMIÕES DE TRANSPORTES CATOJA .....</b>		<b>34</b>
4.1.	Localização da área de estudo.....	34
4.2.	Estrutura do pavimento .....	35
4.2.1.	Estrutura adoptada.....	35
4.2.2.	Estudo de tráfego.....	35
<b>CAPÍTULO V - DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>		<b>37</b>
5.1.	Dimensionamento pelo método PCA/84 .....	37
5.2.	Tensões no pavimento.....	43
5.3.	Dimensionamento das barras de transferência .....	48
5.4.	Dimensionamento de barras de ligação.....	49
5.5.	Análise estrutural pelo programa EverFe2.24.....	50
<b>CAPÍTULO VI–CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....</b>		<b>54</b>
6.1.	Conclusão.....	54
6.2.	Recomendações .....	55
Referências Bibliográficas.....		56

Anexos ..... 58

# CAPÍTULO I—INTRODUÇÃO

## 1.1.Contextualização

A infraestrutura rodoviária desempenha um papel vital no desenvolvimento económico e na conectividade global, tornando-se uma espinha dorsal da mobilidade moderna. A capacidade de estradas e rodovias é de resistir ao desgaste causado por cargas veiculares e condições climáticas adversas é essencial para garantir a segurança e eficiência do transporte terrestre. Nesse contexto, o dimensionamento de pavimentos rígidos se destaca como uma disciplina fundamental da engenharia de transportes, voltada para o projeto, construção e manutenção de superfícies de pavimentação duráveis e confiáveis.

Os pavimentos rígidos, frequentemente compostos por betão de cimento, destacam-se por sua capacidade de suportar cargas substanciais e fornecer uma vida útil prolongada quando comparados a pavimentos flexíveis. Essas estruturas são projetadas para resistir a pressões consideráveis, incluindo o tráfego intenso de veículos de carga e as variações climáticas extremas.

O dimensionamento de pavimentos rígidos abrange um espectro de conceitos e práticas, indo desde os princípios teóricos que regem o comportamento dos materiais até a aplicação prática de métodos de cálculo e o uso eficaz de técnicas de construção.

O método PCA/84 é uma ferramenta que se baseia em princípios de engenharia sólida e análise de desempenho para determinar a espessura adequada do pavimento de betão de cimento, levando em consideração factores como o tráfego esperado, as características do solo, a resistência do material e a durabilidade desejada. A abordagem leva em conta a previsão do comportamento do pavimento ao longo de sua vida útil, visando evitar defeitos prematuros e a necessidade de manutenção onerosa.

Ao final deste trabalho, esperamos fornecer uma visão abrangente deste campo fundamental da engenharia, fazendo o uso do método de dimensionamento PCA para efectuar o dimensionamento do pavimento rígido para um parque de estacionamento para camiões.

## **1.2.Objectivos**

### **1.2.1. ObjectivoGeral**

A) Avaliar a durabilidade e a vida útil estimada do pavimento rígido projectado.

### **1.2.2. Objectivos Específicos**

A) Utilizar as directrizes do método PCA para calcular a espessura mínima do betão de cimento necessário para suportar as cargas previstas, levando em consideração as características do solo.

B) Deixar recomendações finais com base na análise, indicando se o pavimento rígido é a opção mais viável para o parque de camiões, levando em conta os aspectos técnicos, económicos e ambientais.

## **1.3. Justificativa**

Moçambique está passando por um período de desenvolvimento intenso, especialmente nas áreas de infraestrutura estratégica como portos, aeroportos, zonas industriais e parques de camiões. Essas estruturas são vitais para o crescimento do país e demandam pavimentação robusta que suporte o constante carregamento e descarregamento de mercadorias pesadas.

A escolha do tipo de pavimento para esses locais é fundamental, pois eles são diariamente submetidos a altos volumes de tráfego pesado, e qualquer erro de planejamento pode levar a problemas de manutenção frequentes e custos adicionais.

Os pavimentos de betão de cimento são frequentemente escolhidos por sua durabilidade e resistência, que garantem uma vida útil mais longa. No entanto, a decisão de uso desse tipo de pavimento não é simples. Embora sejam mais caros, esses pavimentos tornam-se a melhor opção em regiões onde o solo apresenta uma capacidade de carga muito baixa, uma característica comum em diversas áreas de Moçambique. Os pavimentos flexíveis, que geralmente são mais económicos, acabam sendo pouco viáveis, pois as condições geológicas locais não oferecem o suporte necessário para esse tipo de estrutura. A combinação de solos frágeis com o peso das cargas pesadas acaba inviabilizando uma solução que, em teoria, seria financeiramente vantajosa.

Nesse contexto, o planejamento de pavimentação em Moçambique exige um olhar atento que considere não só a economia, mas também a realidade geológica do país e as demandas por infraestrutura de qualidade. As decisões sobre pavimentação precisam equilibrar a durabilidade e o custo para que o desenvolvimento do país seja sustentado por uma infraestrutura sólida e duradoura, acompanhando o crescimento económico sem comprometer a segurança e eficiência desses espaços essenciais.

#### **1.4. Definição do problema**

O bom funcionamento dos pavimentos dos terminais destas infra-estruturas como parques de camiões, zonas portuárias e aeroportuárias depende de consideração clara das capacidades máximas das cargas rolantes e estáticas estimadas quanto às suas exigências estruturais e funcionais tendo em conta os limites das cargas padrão recomendadas. Acrescer que, as características de solos de fundação para áreas de edificação de infra-estruturas geralmente são de baixa qualidade.

A adopção de materiais de pavimentação de última geração, com propriedades mecânicas aprimoradas, resistência ao desgaste e capacidade de adaptação a variações climáticas, resultará em pavimentos mais duráveis e economicamente eficientes ao longo de sua vida útil.

Os pavimentos de betão de cimento, especialmente para terminais aeroportuários, portuários, parques e suas áreas conexas, têm recebido grande interesse pelos projectistas devido à grande dificuldade de seleccionar um pavimento que seja não só económico, mas, em simultâneo, atenda aos critérios de resistência mecânica e química, durabilidade, funcionalidade, conforto e segurança aos utentes.

O desafio conceptual surge da disparidade de características geográficas e geológicas entre as distintas zonas, e a necessidade de projectar o pavimento que constitua solução do problema identificado num local específico e que ao mesmo tempo responda os aspectos locais.

Assim sendo surge a colocação do problema:

- ✓ Quais os métodos que podem ser utilizados no dimensionamento que optimizem a durabilidade dos pavimentos, levando em consideração as cargas pesadas e as atividades operacionais constantes?

#### **1.5. Hipóteses (H0 e H1)**

**H0-** Estratégias específicas de manutenção preditiva, baseadas em monitoramento contínuo das condições, como deformações e desgastes superficiais, não permitem intervenções oportunas, não preservando a integridade dos pavimentos rígidos e estendendo sua vida útil.

**H1-** Estratégias específicas de manutenção preditiva, baseadas em monitoramento contínuo de condições, como deformações e desgastes superficiais, permitem intervenções oportunas, preservando a integridade dos pavimentos rígidos e estendendo sua vida útil.

### **1.6. Capítulos propostos**

O presente trabalho encontra-se organizado em 6 capítulos dos quais:

**1. Capítulo I – Introdução** - irá fazer a apresentação do tema do trabalho, que aborda o dimensionamento de pavimento rígido.

- ✓ Explorar os métodos de dimensionamento e avaliar a viabilidade de um pavimento rígido para essa aplicação e avaliar ainda a vida útil do pavimento.

**2. Capítulo II – Revisão da literatura** - será abordada a revisão dos conceitos fundamentais de pavimentação e métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos e será feita ainda a exploração de estudos anteriores sobre pavimentos com base em literaturas ou artigos já publicados.

**3. Capítulo III – Metodologia de Dimensionamento de Pavimento Rígido**

Será abordada a descrição detalhada dos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos utilizados no estudo de caso.

- ✓ Explicação dos critérios de projeto, cálculos de carga e normas utilizadas.

**4. Capítulo IV – Estudo de Caso** - será abordada a apresentação do estudo de caso específico: análise da área do parque de caminhões, número de caminhões, cargas esperadas.

- ✓ Aplicação dos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos para determinar a espessura e os detalhes do projeto do pavimento para o parque de caminhões.

**5. Capítulo V – Discussão e Análise** - é onde será feita a interpretação dos resultados do estudo de caso em relação aos métodos de dimensionamento utilizados.

- ✓ Comparação entre as soluções propostas e as práticas recomendadas na literatura revisada.

**6. Capítulo VI – Conclusão e Recomendações** - é onde será feita uma recapitulação dos principais resultados e descobertas do estudo de caso.

- ✓ Conclusões sobre a viabilidade e eficácia do pavimento rígido dimensionado para o parque de caminhões. Sugestões para futuras melhorias ou pesquisas adicionais nesta área.

## CAPÍTULO II–REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Historial da pavimentação

As lembranças mais remotas de pavimentação provêm da China, país que as inventou. Bem mais tarde, os romanos aperfeiçoaram as estradas instalando pavimentos e drenagem, com o intuito de torná-las duradouras. Segundo autores alemães durante a fase áurea da Roma, mais de oitenta mil quilômetros de estradas foram construídas, permitindo aos dominadores o transporte de legiões militares, e o acesso a bens disponíveis nos longínquos territórios dominados.

Os romanos também procuraram estabelecer rotas por terra mais racionais, para galgar montanhas e atingir os principais portos no mediterrâneo, combinando meios de transportes da maneira mais eficiente que seus estrategistas poderiam conceber (BALBO, 2007, p. 23). Tamanha foi a importância desses caminhos pavimentados para a sociedade romana que, na época áurea de Otávio Augusto (30 a.C. a 14 d.C.), por solicitação do Senado e da população do Império, o senhor de Roma era responsável pelo direito pela manutenção das grandes vias de circulação, e serviço de extrema necessidade para estabilidade política, econômica, militar, e, sobretudo para a agricultura como atividade econômica (ROSTOVTZEFF, 1983).

Na década de 1920, o advento da Mecânica dos Solos deu grande impulso às pesquisas aplicadas à pavimentação, em especial por pesquisadores ligados a universidades e a agências viárias Americanas. Entre 1922 e 1929, O. J. Porter, engenheiro do California Division of High ways, realizou pesquisas que permitiram definir algumas das principais causas dos rupturados pavimentos flexíveis apresentando, então, a primeira curva empírica para dimensionamento com base em critério de resistência ao cisalhamento do subleito indiretamente obtida pelo ensaio do California Bearing Ratio (CBR) – Índice de Suporte Californiano.

Na mesma época e local, estabelecia-se o ensaio de Proctor (nome em homenagem ao autor) para a compactação de solos. Tais trabalhos geraram frutos inimagináveis anos mais tarde, em especial nos critérios de pavimentos asfálticos e flexíveis estabelecidos pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (BALBO, 2007, p. 24).

Nos anos 1950, foi concebido um grande plano de pavimentação nos Estados Unidos, para a ligação entre os estados americanos de cidades de médio e grande porte, denominado Interstate System, que culminou no planejamento dos experimentos

realizados pela AASHO (atual AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials). Os engenheiros da AASHO, congregando representantes de todos os Estados, conceberam uma pesquisa sobre o desempenho de pavimentos, compreendendo seis pistas experimentais com dezenas de seções de pavimentos, empregando diversos tipos de materiais de construção (tratou-se da maior pesquisa já realizada, sendo inclusive integrada ao Museu Smithsonian, em 2004) (BALBO, 2007, p.25).

Em 1966, a Portland Cement Association dos Estados Unidos oferecia à comunidade rodoviária seu método de dimensionamento de pavimentos de concreto simples (placas), sem barras de transferência de cargas em juntas, fundamentado nos modelos analíticos de Westergaard e na experimentação à fadiga do concreto. Tal método seria reformulado posteriormente; em 1984, a PCA (Portland Cement Association) publicava um critério para cálculo de tensões de tração na flexão em placas de concreto, desta vez baseado no método dos elementos finitos e considerando a presença de barras de transferência de cargas em juntas; além disso, introduzia o modo de danificação por erosão de camadas granulares em bases, com fundamento empíricos, até mesmo sobre resultado de desempenho verificados na AASHO Road Test (BALBO, 2007, p.27).

## **2.2. Definição de pavimento**

Segundo Francisco José d'Almeida Diogo (2008), Pavimento é um revestimento sobre uma superfície, formado por camadas de diferentes características, destinado a distribuir cargas sobre um plano subjacente, apresentando uma superfície adequadamente resistente à abrasão, com textura e declividade capazes de oferecer segurança e conforto à circulação de seres vivos ou máquinas (veículos).

O pavimento é uma super-estrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito (infra-estrutura ou terreno de fundação) a qual é designada de subleito (manual do DNIT, 2006, p.11). O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios (BALBO, 2007, p. 29).

### **2.3.Introdução ao conceito de pavimento rígido**

Os pavimentos rodoviários são considerados um sistema formado por várias camadas horizontais construídas sobre o terreno, tendo como principais funções:

- ✓ Qualidade funcional - proporcionar uma superfície cómoda e segura para a circulação dos veículos, ao longo de sua vida útil;
- ✓ Qualidade estrutural - distribuir as acções induzidas pelo tráfego, para que estas possam ser suportadas pela fundação, na qual pode ser um terreno natural ou pode ter um coroamento de qualidade melhorada. [CEPSA, (2010)]

O conceito de um pavimento executado com betão, como o principal material, teve a sua precursão em 1865, pelos ingleses, e, em 1891 foi construído, nos Estados Unidos, o primeiro “pavimento de betão”, na Court Avenue, em Bellefontaine, Estado de Ohio, por um farmacêutico e químico chamado George Bartholomew. [ACPA, (2016)]

De acordo com Nikolaidis, (2015), “pavimentos rígidos são pavimentos de alta rigidez constituída com camada de revestimento principal de betão de cimento Portland. Por causa de sua alta rigidez em contraste com outros pavimentos, a deformação na superfície do pavimento é muito reduzida. No entanto, após um certo período, aparecem fissuras na superfície da laje de betão.”

#### **2.3.1. Diferença do pavimento rígido com o flexível e semi-rígido**

Segundo Branco et al. (2011), “A distinção do pavimento rígido em relação aos outros tipos, nomeadamente, pavimentos flexíveis e semi-rígidos, é feita de acordo com os dois critérios de classificação dos pavimentos rodoviários: o tipo de materiais constituintes e a deformabilidade.”

Nos pavimentos rígidos, são empregues materiais: hidráulicos e granulares, e estes tipos de pavimentos são classificados como de deformabilidade muito reduzida.

A utilização dos materiais hidráulicos nas camadas dos pavimentos rígidos, como principal, a camada superficial de laje de betão, traz comportamentos diferentes em relação aos outros tipos de pavimentos quando solicitados pelas cargas dos veículos em combinação com determinadas condições climáticas, na forma de distribuição de tensões.

No pavimento rígido, a camada de rolamento também funciona como estrutural, redistribui os esforços e diminui a tensão imposta à sub-base, que, normalmente, é a

única camada executada entre as placas de betão e o subleito, enquanto o pavimento flexível, executado com materiais betuminosos, que funciona como camada de rolamento, sendo que a que absorve os esforços é a fundação, por vezes compostas por mais camadas.



**Figura 2.3.1 Camadas dos pavimentos flexível, rígido e semi-rígido**

### 2.3.2. Vantagens na escolha do pavimento rígido

Diversos factores podem conduzir à escolha de um pavimento rígido:

- ✓ Menor tempo de execução;
- ✓ Limitações de espessura;
- ✓ Qualidade e durabilidade do pavimento, o betão não deteriora com a acção da chuva, de óleos ou de combustíveis e não deforma a ponto de formar as trilhas de rodas;
- ✓ Fácil disponibilidade dos materiais;
- ✓ Reduzida intervenção de reparos devido a problemas de drenagem;
- ✓ Possibilidade de reutilização como agregado na construção de novos pavimentos.

### 2.3.3. Desvantagens na escolha do pavimento rígido

Algumas desvantagens oferecidas pela escolha de pavimento rígido, podem-se listar:

- ✓ Custo alto, para situações de estradas sem elevado tráfego;
- ✓ Requer período longo de cura;

### 2.3.4. Aplicação

Estes pavimentos são largamente executados em pisos de edifícios industriais, em pátios de estacionamento, nos terminais de portos, grandes ou pequenos armazéns, aeroportos, postos de gasolina e outras instalações, também são viáveis para auto-estradas, rodovias e vias urbanas.

## **2.4. Constituição e composição do pavimento rígido**

### **2.4.1. Constituição do pavimento rígido**

Um pavimento rígido típico é constituído por uma laje de betão de cimento Portland, e uma camada de sub-base apoiada sobre a fundação que, é constituída pelo terreno natural ou solos de qualidade melhorada.

AASHTO, (1993), acrescenta que pode ser incluída nos pavimentos rígidos uma camada de drenagem, sendo ela parte sobrejacente da camada de sub-base ou a própria sub-base, dependendo do projectista e experiência local.

As metodologias e técnicas de construção recentes também permitem, no caso da laje de betão armado contínuo, o uso de uma camada superficial de asfalto. O uso desta camada de asfalto na parte superior pode aumentar a vida do pavimento e oferecer a redução de ruído. [Highways Agency (2006b), citado por Nikolaides, (2015)]

AASHTO, (1993) e CEPISA, (2010), referem que, no caso de a fundação ter características de qualidade igual a sub-base ou baixo tráfego de camiões, a laje de betão pode ser colocada directamente sobre a fundação, não sendo necessária a camada de sub-base.

Porém, embora teoricamente seja referida esta situação, tal não é desejável, uma vez que, nas funções da sub-base, um apoio relativamente uniforme e resistente a erosão é essencial para garantir a durabilidade do pavimento.

### **2.4.2. Modo de funcionamento do pavimento rígido**

No pavimento rígido, a carga vertical quando aplicada sobre a camada de betão de cimento, que funciona como estrutural, esta sofre a compressão superiormente e tracção inferiormente. As tensões verticais provocadas pelas cargas distribuem-se sobre uma grande área da laje de betão, diminuindo a tensão imposta à sub-base, de modo que quando atinge a fundação representa uma pequena fracção da pressão de contacto dos pneus.

A elevada resistência deste tipo de pavimentos, devido a resistência a flexão do betão, faz com que estes não sofram deformações acentuadas, mesmo quando submetidos a condições severas de tráfego pesado, intenso e lento, e à elevadas temperaturas.



**Figura 2.4.2 Distribuição de carga no pavimento rígido.**

### **2.4.3. As camadas do pavimento rígido e suas funções**

#### **2.4.3.1. Camada de sub-base**

Neste tipo de pavimento, a sub-base consiste em uma ou mais camadas de material granular estabilizado mecanicamente ou estabilizado com ligante hidráulico (cimento), colocada entre a laje rígida e um subleito.

Geralmente, o papel da sub-base nos pavimentos rígidos não é aumentar a resistência estrutural do pavimento como acontece nos outros tipos de pavimentos, apesar desta espessura representar certa contribuição. Tem, entretanto, as seguintes finalidades:

- ✓ Fornecer um apoio uniforme, estável e permanente para a laje;
- ✓ Aumentar o módulo de reacção do subleito ( $k$ );
- ✓ Ser resistente a erosão, quer sob a acção do tráfego de obra, quer em serviço para evitar o descalçamento da laje;
- ✓ Evitar o bombeamento de solos de grãos finos nas juntas, fissuras e nas bordas da laje;
- ✓ Fornecer uma plataforma de trabalho para os equipamentos de construção, e permitir a execução da laje em boas condições;
- ✓ Minimizar os efeitos prejudiciais da acção de geada.

#### **2.4.3.2. Camada da laje de betão**

A camada da laje de betão é o principal elemento estrutural em um pavimento rígido. Devido ao seu modo de funcionamento, considera-se que a laje de betão desempenha o papel funcional e estrutural como a de camada de base, diferente dos outros pavimentos.

Considera-se a laje de betão como um elemento rígido por ser muito resistente às pressões de contacto e distribuir as tensões verticais sobre grande área, sem provocar deformações permanentes.

Por isso, tem as funções:

- ✓ Receber e distribuir as cargas do tráfego para a camada subjacente;
- ✓ Fornecer uma superfície confortável e segura para o tráfego;
- ✓ Suportar os esforços térmicos atribuídos à expansão, contracção ou deformações; as tensões de atrito que se desenvolvem com a camada subjacente; e as tensões atribuídas a alterações de humidade do betão.

A sua resistência e durabilidade dos pavimentos rígidos depende da proporção entre os materiais que os constituem, sendo estes: cimento, agregados, água e aditivos químicos. Por outro lado, os esforços e tensões mencionados causam o aparecimento de fissuras que desenvolvem uma das grandes preocupações nestes pavimentos.

As fissuras tornam o betão mais permeável, o que contribui para a deterioração mais rápida além de prejudicar a aparência da estrutura. [Pool, (2005); Neville (2011) citado por Nikolaidis (2015)].

As fissuras não afectam muito a capacidade de carga porque a zona enfraquecida geralmente limita-se ao topo aproximadamente 50 milímetros de betão, apenas se ocorrer fissuração de profundidade completa ou se o tempo de cura do betão for insuficiente. [Pool, (2005) citado por Nikolaidis (2015)].

É muito mais fácil prevenir as fissuras no betão fresco do que no endurecido pois é quase impossível reparar eficientemente e com sucesso. Por isso, como uma solução, realiza-se juntas, a intervalos de poucos metros, dividindo as lajes em painéis em que os esforços de tração são reduzidos, para contrariar o aparecimento, ou a importância, destas fendas.

Assim, as juntas constituem um elemento importante para o funcionamento destes pavimentos, e são elementos delicados que exigem cuidados especiais de realização e de conservação. O desenvolvimento deste assunto será dado num capítulo específico a posterior.

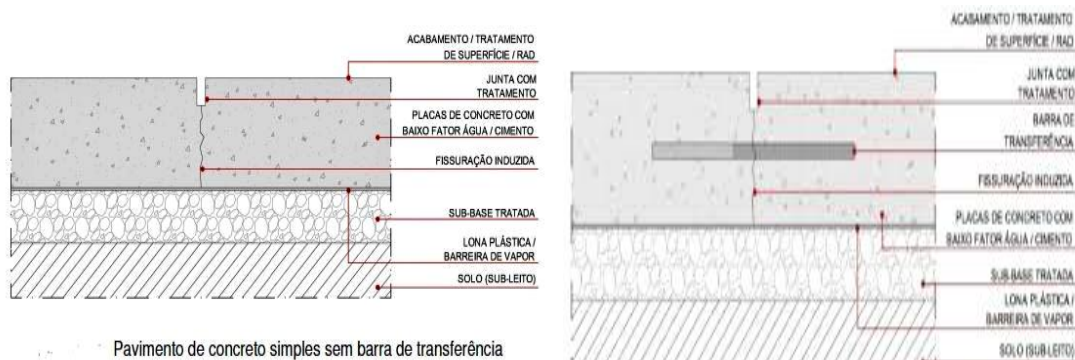
## 2.5. Tipos de pavimentos rígidos

Geralmente, classificam-se os pavimentos rígidos de acordo com: o tipo de betão associado ao modo como é controlado o aparecimento de fendas por retracção, e/ou tecnologia aplicada.

Os tipos de pavimentos rígidos variam entre as bibliografias, sendo os mais conhecidos descritos sucintamente a seguir.

### 2.5.1. Pavimentos de betão simples com juntas

São constituídos por placas curtas de betão, separadas por juntas transversais e longitudinais, moldadas ou serradas, que controlam as fissurações, e podem estar dotadas ou não de barras de transferência de carga (passadores).



**Figura 2.5.1 Pavimentos de betão simples com e sem barra de transferência [Carvalho, (2009)]**

Todos os esforços, tanto os de compressão quanto os de tracção, são absorvidos apenas pelo betão. As barras de transferência de aço, empregadas com a função de transferir esforços entre as placas, não são consideradas armaduras, portanto não descaracterizam o pavimento de betão simples. A CEPISA, (2010), indica dimensões das placas de 3 a 5 m, com ou sem dispositivos de transferência de cargas.

Já Oliveira, (2000): “quando não são utilizadas as barras de transferência, o pavimento tem entre 15 a 20 cm de espessura e as dimensões das placas são de 4 a 6 metros de comprimento e de 3 a 4 metros de largura” e “os pavimentos de concreto simples com barras de transferência têm, em média, de 16 a 45 cm de espessura e suas dimensões em planta podem chegar a 7 metros.”

Os pavimentos de betão, sem barras de transferência são restritos a vias de baixo volume de tráfego e cargas de pequena intensidade e deve ser executada sub-base tratada com cimento ou em betão pobre, a fim de minimizar os efeitos de erosão na

região de encontro entre duas placas. Há necessidade de procurar um betão que sofra menor retracção possível, e que tenha resistência suficiente para absorver os esforços impostos por grandes variações de humidade e de temperatura, como também apresentar elevada resistência à tracção na flexão, a fim de suportar o momento flector, visto que, os esforços de tracção devem ser absorvidos apenas pelo betão. Considera-se a construção do pavimento de betão simples, a mais simples e mais barata quando comparado aos armados. A desvantagem do betão simples é exigir maior número de juntas transversais que reduz o conforto durante a condução, aumenta as possibilidades de falha de construção e assentamento diferencial da laje no futuro.

### **2.5.2. Pavimentos de betão armado com juntas**

Estes pavimentos são análogos aos de betão simples, mas com lajes armadas, por isso, são constituídas com maiores dimensões e com juntas de contracção mais afastadas. Podem ou não incluir dispositivos de transferência de cargas.

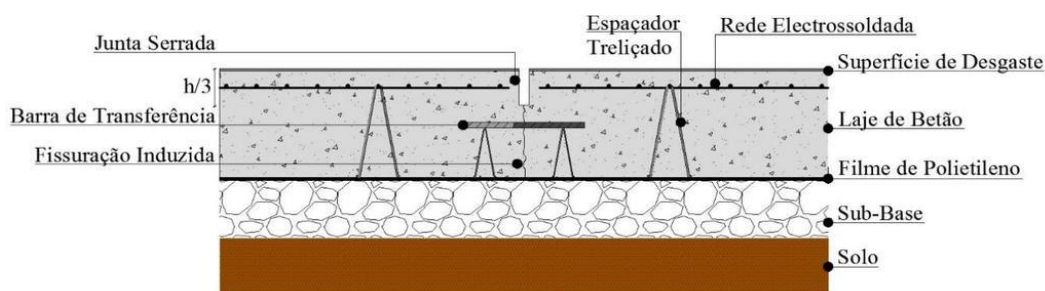
A armadura pode ser composta por barras de aço amarradas no local da obra, ou aplicação de telas soldadas, como é mais comum hoje em dia. A malha funciona como dispositivo de controlo das fissuras, mantendo as faces fortemente ligadas. Com esse tipo de aplicação consegue-se reduzir consideravelmente o número das juntas transversais, que são elementos mais delicados dos pavimentos rígidos, em relação aos pavimentos de betão simples.

Os pavimentos de betão armado, podem-se subdividir em dois tipos segundo a posição da armadura e a função procurada:

#### **2.5.2.1. Armadura distribuída descontinuamente**

Neste tipo, a malha de aço posiciona-se acima do plano médio da secção, mantendo-se ao menos 5 cm de recobrimento. Tem a função de impedir a propagação de fissuras, ao absorver os esforços de tracção, tanto derivados da retracção característica do betão, como os que ocorrem por efeito das variações de volume devido as mudanças de temperatura.

É necessário frisar, que, colocada nesta posição, a armadura absorve pouco esforço gerado pela acção de cargas. Segundo Oliveira, (2000), “O pavimento de concreto com armadura distribuída descontínua possibilita a execução de placas de até 30 metros de comprimento e mais de 6 metros de largura. É mais usual a construção de placas com cerca de 15 metros de comprimento.”

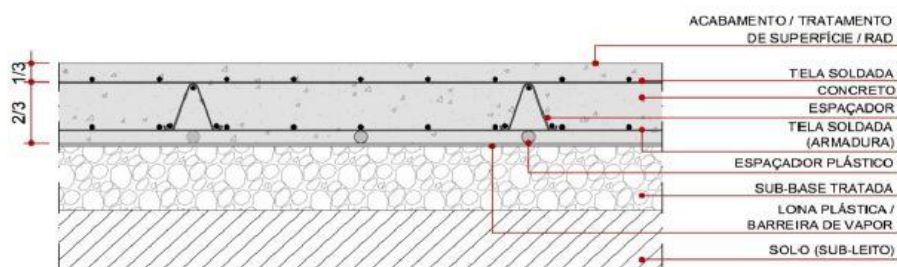


**Figura 2.5.2.1 Pavimento com armadura distribuída descontinuamente [Carvalho, (2009)]**

### 2.5.2.2. Estruturalmente armado

Neste tipo procura-se maior eficiência da estrutura, determinando as posições das diversas tensões actuantes e armando os painéis nestes pontos específicos. Por isso, possuem duas malhas de armadura: uma na parte inferior, abaixo do plano médio, onde se desenvolvem as maiores tensões de tracção provocadas pelo momento flector.

O aço tem função de resistir a essas tensões, diminuindo, assim, a espessura de betão. E outra acima para controlar a fissuração por retracção. Além da utilização de dispositivos de transferência de carga nas juntas.



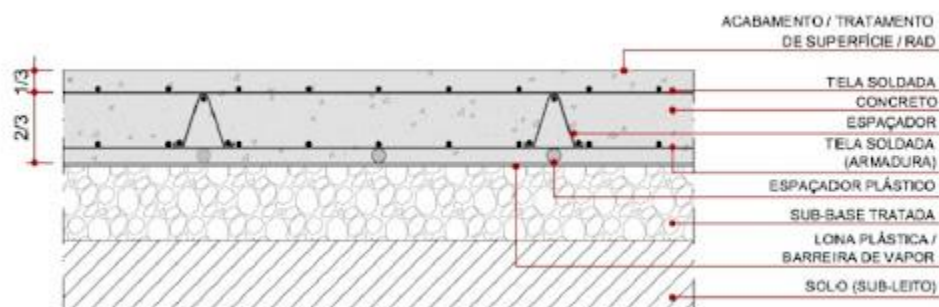
**Figura 2.5.2.2 Estrutura do pavimento estruturalmente armado [Carvalho, (2009)]**

Os pavimentos de betão estruturalmente armados são mais vantajosos, em relação aos pavimentos de betão simples, visto que proporcionam a redução da espessura de betão e maior espaçamento entre juntas. As placas de betão estruturalmente armado possuem, em média, 15 metros de comprimento e de 14 a 16 centímetros de espessura.

### 2.5.3. Pavimentos de betão armado contínuo (B.A.C.) reforçados com camada superficial de asfalto

Trata-se de um pavimento sem juntas transversais e com uma armadura distribuída em toda a sua extensão, colocada no centro da laje. Assim como no caso dos pavimentos de betão com armadura distribuída descontinua, o aço tem a função de controlar a fissuração devida a retracção do betão e variações volumétricas, que surgem pelo facto de não serem executadas juntas, a não ser as de construção.

O pavimento de B.A.C. frequentemente apresenta fissuras de retracção, distanciadas em geral de 1 a 3 m. Estas, com abertura inferior a 0.5 mm são imperceptíveis para o utente e não se deterioram sob a acção do tráfego, não pondo, assim, em perigo a capacidade estrutural do pavimento.



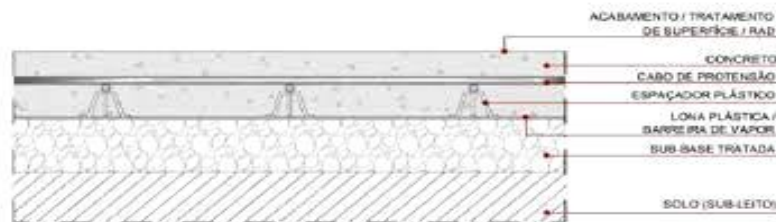
**Figura 2.5.4. Pavimento continuamente armado [Carvalho, (2009)]**

Este tipo de pavimento tem a vantagem de não apresentar juntas transversais e, dependendo do método de execução, também não apresenta juntas longitudinais. São necessárias apenas as juntas de construção, executadas ao término de um ciclo de trabalho, ou quando as faixas de rolamento são construídas separadamente. A redução ou eliminação das juntas transversais tem um impacto directo na melhoria da qualidade de condução oferecida.

A quantidade de aço utilizada normalmente varia de 0,5% a 0,7% da área transversal de laje, dependendo do método de projecto usado. É colocada quase sempre no sentido longitudinal e na profundidade média da espessura específica da laje. Quando são usados agregados silicosos, é recomendado localizar a armadura à uma profundidade de um terço da espessura da laje, uma vez que melhora o padrão de fissuras dos agregados silicosos. [Hassan et al., (2005) citado por Nikolaidis (2015)].

#### **2.5.4. Pavimentos de betão pré-esforçado**

Os pavimentos de betão pré-esforçado são constituídos por lajes de elevado comprimento, em que os varões de aço pré-traccionados criam uma carga que vai comprimir o betão. Esta reserva de tensão criada no betão permite reduzir a espessura até cerca de 50%, em relação a um pavimento rígido não armado, visto que as extensões de tracção são muito acentuadas. [Oliveira, (2000)].



**Figura 2.5.5. Pavimento de betão pré-esforçado [Guerra, (2017)]**

A redução da espessura, resulta na economia do betão, aumenta a capacidade de construir um pavimento onde a restrição de acesso de espessura é um problema (túneis, pontes etc.) em conjunto com a incapacidade de cavar profundamente para acomodar a espessura de uma laje de betão típica. [Nikolaides, (2015)].

A placa comprimida é praticamente impermeável e sem trincas. Apresenta ainda a vantagem de capacidade de aplicar cargas maiores e substancial redução do número total das juntas transversais, podem ser espaçadas na ordem dos 120 até 150 metros.

#### **2.5.5. Pavimento de betão com reforço de fibras**

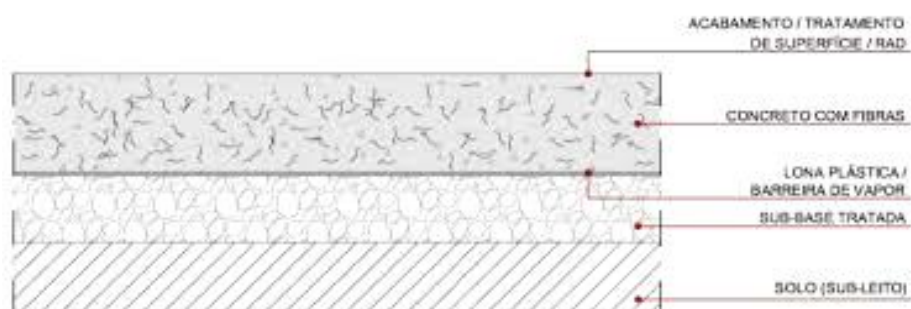
Este tipo de pavimento é composto por placas de betão com uma dispersão de fibras descontínuas. Estas podem ser fibras: de aço, sintéticas (microsintética ou macrosintético), de vidro (resistente a alkalis, fibra de vidro AR) ou fibras naturais. [Rodrigues, (2011)].

O betão reforçado com fibras pode ser utilizado em pavimentos de betão simples como também armado ou contínuo. É um material relativamente recente, que tem sido muito estudado nas duas últimas décadas. Já foi comprovado que, em diversos aspectos, apresenta características superiores às do betão simples.

Considerando o comportamento elástico do betão com fibras, quando se faz um dimensionamento considerável, obtém-se um ganho qualitativo: o controlo da fissuração, permitindo aumentar o espaçamento entre as juntas, e considerando o comportamento plástico do material, é possível aproveitar sua ductilidade, e obter também um ganho quantitativo: a redução da espessura. [CARNIO (1998), citado por Oliveira (2000)].

Por essas razões o betão com fibras está sendo cada vez mais utilizado em estruturas como: pavimentos de aeroportos, pavimentos de auto-estradas, leito de pontes, pisos de

edifícios industriais, estruturas de suporte de máquinas, dormentes e tanques de estocagem.



**Figura 2.5.6. Pavimento de betão com reforço de fibras[Guerra (2017)]**

## **2.6. Juntas**

As práticas construtivas normalmente adoptadas prevêm a execução de juntas com dispositivos de transferência de carga ou união, por ser possível prever as posições das fissuras. Este critério é aplicável para juntas em pavimentos de betão simples, armado e pavimentos contínuos.

A existência das juntas, com espaçamento adequado, permite evitar ou pelo menos atenuar fortemente a instalação destas tensões devido as mudanças climáticas ou fricção, de modo a não ser considerado no dimensionamento. No caso do pavimento de betão armado contínuo, a armadura também tem a função de absorver as tensões referidas.

As juntas permitem a fissuração com geometria pré-definida das placas, e assim garante o funcionamento estrutural previsto e também mantém o nível estético do pavimento, sem contar que também servem para facilitar a construção. A vantagem da formação das fissuras ser em local desejado permite que sejam reforçadas (se necessário) e adequadamente seladas e podem ser moldadas, ou, como é mais usual hoje em dia, serradas.

### **2.6.1. Tipos de juntas e suas funções**

As juntas distinguem-se em três categorias principais: (a) juntas de contracção, (b) juntas de expansão (dilatação) e (c) juntas de deformação, em que as duas primeiras são transversais ao sentido de circulação e a última longitudinal, formando-se assim painéis ou lajes rectangulares ou quadradas. Ambos os tipos de juntas, longitudinais e transversais, podem também constituir (d) juntas de construção.

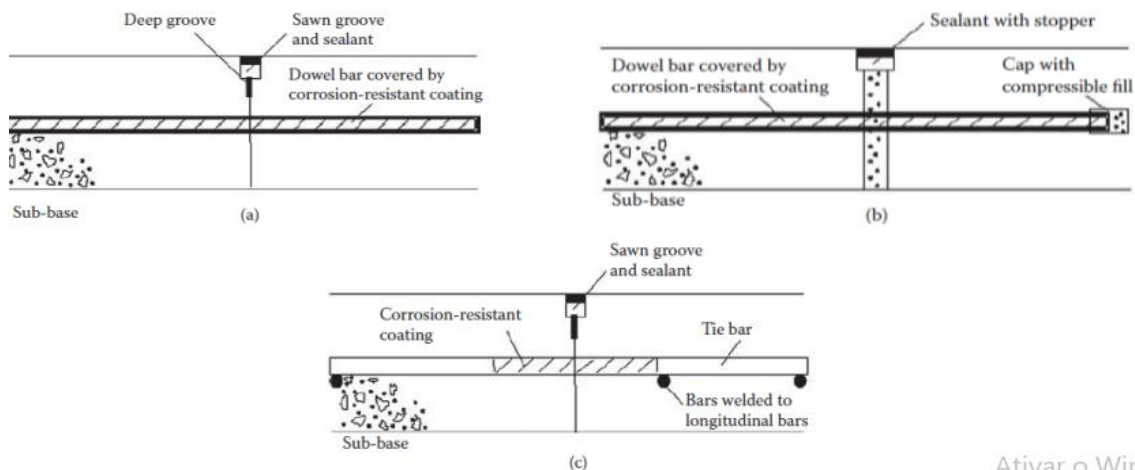


Figura 2.6.1. Tipos de juntas e pormenores construtivos. [Nikolaides, (2015)]

Para pavimentos de betão simples e armado, são providenciados todos os tipos de juntas, enquanto em pavimentos armados contínuos, somente são fornecidas as juntas longitudinais. As juntas de construção longitudinal são as juntas de deformação.

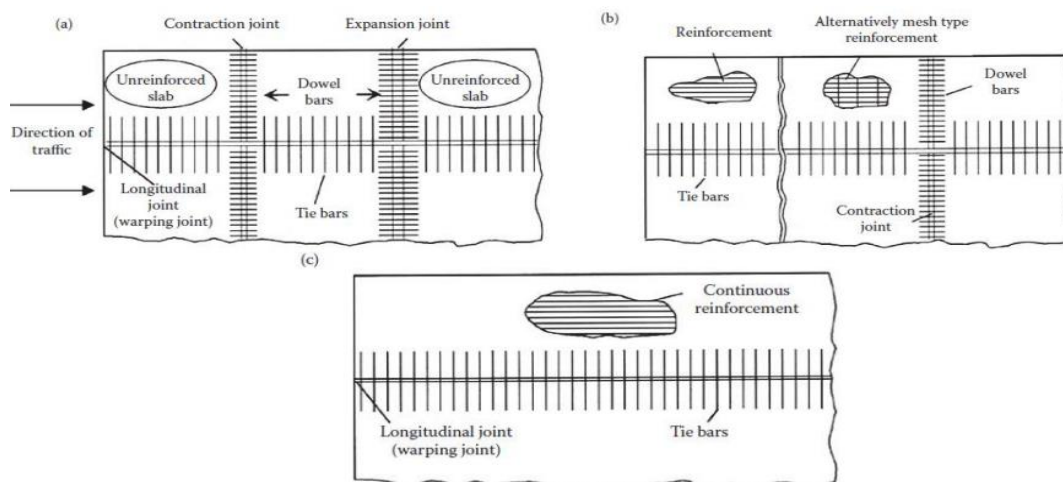
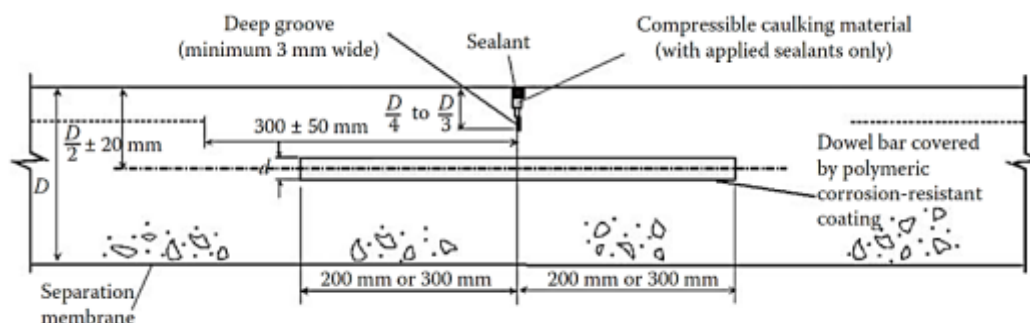


Figura 2.6.2. Plano esquemático dos tipos de pavimentos rígidos: (a) betão simples com juntas de contracção e expansão, (b) betão armado com juntas de contracção e expansão (esta não demonstrada) e (c) armado contínuo com juntas longitudinais. [Nikolaides, (2015)]

### 2.6.1.1. Juntas de contracção

As juntas de contracção são construídas no sentido transversal para aliviar as tensões de tracção que se desenvolvem por causa da contracção térmica, humidade, e principalmente do atrito (tensão de fricção), e para forçar a laje a fissurar controladamente em posição prédeterminada. Se as juntas de contracção não forem executadas, ocorre fendilhamento aleatório na superfície do pavimento.

Esta junta é obtida por reduzir a profundidade efectiva da laje através de um sulco serrado no local onde se quer criar a junta, de largura calculada e preenchido com um material vedante apropriado. A posterior retracção do betão vai provocar a abertura de uma fenda nesse local onde a secção resistente está enfraquecida.



**Figura 2.6.3. Detalhes construtivos de uma junta de contracção típica. [Nikolaides, (2015)]**

Em uma laje de betão simples, as juntas de contracção são espaçadas aproximadamente em cada 4 a 5 m (Nikolaides, (2015)) ou 3 a 7 m (Branco et al., (2011)), dependendo da espessura da laje e do tipo de agregado.

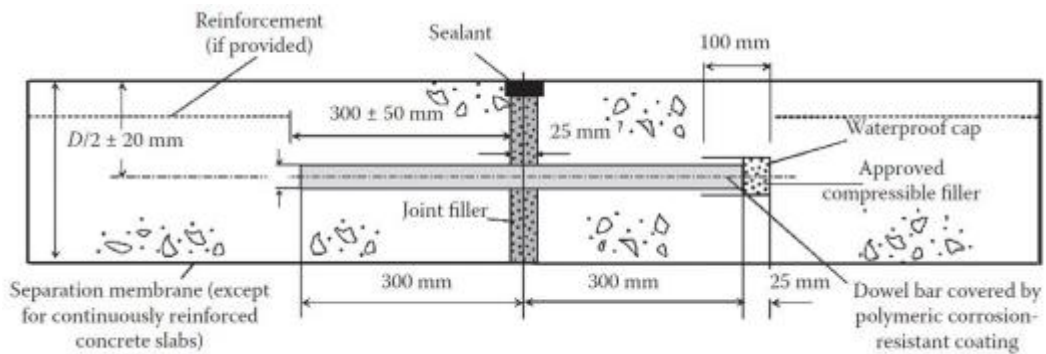
Em uma laje de betão armado, normalmente são espaçadas a cada 20 a 25 m (Nikolaides, 2015) ou até 30 m (Oliveira, 2000), dependendo da quantidade de armadura, devendo sempre seguir as instruções da metodologia de pavimento usada no que se refere ao espaçamento das juntas de contracção.

### **2.6.1.2. Juntas de expansão/dilatação**

As juntas de dilatação são construídas no sentido transversal para proporcionar espaço para a expansão térmica da laje, impedindo o desenvolvimento de tensões compressivas que pode causar deformação e fendilhamento do pavimento.

De acordo com Justo e Khanna, (2001) “As juntas de expansão são projectadas baseando na máxima variação de temperatura esperada, e a largura da junta.”

Na junta de dilatação, há uma descontinuidade completa da laje de betão. A largura da junta introduzida depende da espessura da laje, do coeficiente de expansão térmica do betão, a fricção desenvolvida com a sub-base e o espaçamento entre duas juntas de contracção. Quanto maior a distancia entre as juntas de expansão, maior será a largura da junta.



**Figura 2.6.4. Detalhes construtivos de uma junta de expansão. [Nikolaides, (2015)]**

As barras de transferência de cargas para juntas de dilatação são ligeiramente mais longas do que as usadas nas juntas de contração, tipicamente de 500-600 mm e geralmente são colocadas a cada 300 mm. O diâmetro é sempre maior do que as colocadas nas juntas de contração, geralmente 25 ou 32 mm. Como nas juntas de contração, as barras são de aço liso e revestidas por um material resistente à corrosão. As juntas de dilatação podem também ser juntas de encontro, construídas quando o pavimento tangencia estruturas como pontes, pilares e bases de máquinas.

### **2.6.1.3. Juntas de deformação ou longitudinais**

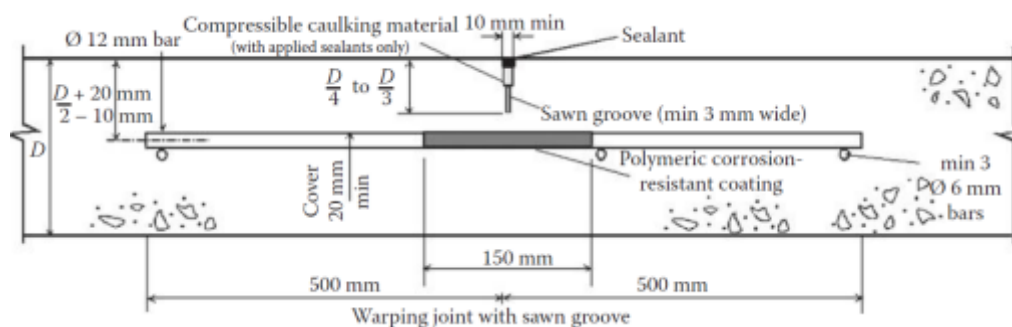
As juntas de deformação são construídas ao longo da direção longitudinal entre lajes de qualquer tipo de pavimento de betão, por isso, também conhecidas como longitudinais.

O único caso que as juntas de deformação podem ser construídas no sentido transversal é nos pavimentos simples, porque em pavimentos armados a deformação que se desenvolve ao longo da direção transversal é compensado pela armadura longitudinal. De acordo com Justo e Khanna (2001) “se as juntas de expansão e contração forem devidamente projectadas e construídas, não será necessário providenciar juntas de deformação adicional.”

A função da junta de deformação é parar o encurvamento das lajes atribuídas à temperatura diferencial da laje em relação a sua profundidade, como também controlar a fissuração ao longo da direção longitudinal, que podem ocorrer devido as tensões deste encurvamento. Funcionam também como junta de construção. Estas não são criadas para resistir a expansão ou contração das placas. São colocadas barras de aço entre as lajes, de vital importância, chamados de barras de ligação.

A fixação adequada destas barras de ligação é alcançada por soldadura entre elas com a armadura longitudinal de suporte colocada em uma determinada profundidade (ou altura) ou dobrando-se ambas as extremidades. As barras de ligação não são cobertas com um revestimento resistente à corrosão no seu comprimento todo, em contraste com as barras de transferência de carga nas juntas de expansão ou contracção.

Como as barras de ligação não são projectadas para agir como um mecanismo de transferência de carga, eles têm um diâmetro menor e geralmente são mais longas que as barras de transferência de carga.



**Figura 2.6.5. Detalhes construtivos típicos de uma junta de deformação para pavimentos simples na direcção transversal. [Nikolaides, (2015)]**

#### 2.6.1.4. Juntas devido à interrupção das obras

As juntas atribuídas à interrupção das obras não são na verdade um tipo diferente de juntas. São criadas como resultado da interrupção do trabalho.

Deve-se fazer coincidir com as juntas anteriormente mencionadas ou em caso de interrupções de trabalho súbita e imprevista, por falha mecânica ou outra, a superfície vertical do betão deve ser formada em forma trapezoidal e deve-se colocar barras de ligação de 1 m de comprimento e 12 mm de diâmetro, espaçadas a 600 mm.

## CAPÍTULO III– METODOLOGIA DE PESQUISA

### 3.1. Metodologia

#### 1. Definição do Problema e Justificativa :

O estudo dos pavimentos rígidos é essencial para infraestruturas de tráfego intenso, como terminais de carga, zonas portuárias e aeroportos, onde a durabilidade e resistência são cruciais para suportar cargas pesadas e condições climáticas adversárias. Projetos inadequados nesses pavimentos podem resultar em falhas precoces e altos custos de manutenção, impactando diretamente a economia e a segurança. A pesquisa em métodos precisos de dimensionamento e escolha de materiais traz benefícios significativos, incluindo maior vida útil dos pavimentos, redução de custos operacionais e segurança aprimorada, contribuindo para uma infraestrutura de transporte mais eficiente

## **2. Descrição da Abordagem e Tipo de Pesquisa :**

A abordagem utilizada neste trabalho é uma abordagem quantitativa pois se baseia na coleta, análise e interpretação de dados numéricos. A principal característica dessa abordagem é o uso de diretrizes objetivas para descrever especificidades e variáveis relacionais.

O tipo de pesquisa aplicada neste estudo é exploratória, descritiva e explicativa, com uma forte ênfase no estudo de caso

## **3. Métodos de Coleta de Dados :**

A coleta de dados foi realizada de forma experimental , com objectivo de validar o impacto das espessuras de 25 cm, 20cm e 15 cm.

## **4. Instrumentos e Procedimentos de Coleta de Dados :**

O instrumento de coleta de dados foi a entrevista, na qual fui ao parque e abordei o assunto ao gestor do parque e de seguida colhi as distancias com recurso a uma roda metrica e a contagem dos veiculos que compoem o parque de camiões.

### **3.2. Introdução**

Os pavimentos de concreto têm sido um dos pilares da infraestrutura, com muitas estruturas originais ainda em serviço. O concreto não enferruja ou apodrece e é resistente a incêndios. Além de ser um material forte o suficiente para suportar as mais diversas estruturas criadas pelo homem, é ao mesmo tempo flexível o suficiente para ser moldado em qualquer tamanho ou forma, suportando elevadas variações de temperatura.

Na aplicação de pavimentos rodoviários a forma de descrição é complexa, tendo em conta que o tráfego solicitante é extremamente variado e difícil de caracterizar, sendo composto por veículos que vão desde os ligeiros até aos camiões articulados com reboques de diversos eixos e cargas por eixo; as condições climáticas (temperatura e teor de água nas camadas não tratadas do pavimento), determinantes do comportamento

dos materiais, também são muito variáveis e difíceis de caracterizar. [Branco et al. (2011)].

### **3.3. Metodologias de dimensionamento**

No caso dos pavimentos rígidos, os métodos de dimensionamento se estruturam em três abordagens: analítica, numérica e probabilística.

A abordagem analítica envolve a aplicação de equações e teorias fundamentais da mecânica dos sólidos para calcular as respostas do pavimento sob diferentes condições de carga e ambiente. Ela busca soluções matemáticas exatas para os problemas de dimensionamento, utilizando modelos simplificados que podem ser resolvidos de forma direta. Na abordagem analítica para o cálculo de tensões e deflexões em pavimentos rígidos, o trabalho teórico mais extenso produzido por Westergaard (Huang, 1993), que com alguns ajustamentos, ainda hoje, é suporte do método da Portland Cement Association (PCA, 1984), um dos métodos de dimensionamento mais usado em todo o mundo.

A abordagem numérica envolve o uso de técnicas computacionais para modelar o comportamento do pavimento e resolver as equações que governam o seu desempenho. Esta abordagem é particularmente útil em situações em que as soluções analíticas não são possíveis ou práticas devido à complexidade do problema.

Na abordagem numérica são de destacar os métodos e programas desenvolvidos com base no método dos elementos finitos para a determinação do estado de tensão nas zonas mais solicitadas das lajes de betão dum pavimento com juntas de contracção.

A abordagem probabilística reconhece a natureza estocástica e incerta de muitos dos parâmetros envolvidos no dimensionamento de pavimentos rígidos, como as propriedades do solo, as cargas de tráfego e as condições ambientais. Em vez de fornecer uma solução determinística única, essa abordagem considera a variabilidade desses parâmetros e suas probabilidades associadas.

Na abordagem probabilística deve-se citar a expressão presente no manual de dimensionamento da AASHTO (AASHTO, 1993).

### **3.4. Metodologias de dimensionamento de pavimentos rígidos**

O principal objectivo no dimensionamento de pavimento rígido é determinar a espessura da laje de betão que será adequada para suportar a carga de tráfego previsto no período do projecto.

Vários métodos de dimensionamento foram desenvolvidos ao longo dos anos, alguns dos quais são baseados nos resultados de testes de estrada em grande escala, outros no desenvolvimento teórico de sistemas em camadas e outros na combinação dos resultados dos testes e desenvolvimento teórico.

Entre os vários métodos para determinação da espessura de pavimentos rígidos de betão, o que será mais usado no presente trabalho será o:

- ✓ Método da PCA (1984);

O método da PCA/84 indica coeficientes de segurança de carga, adopta curva de fadiga e diferencia a rotura por fadiga da rotura por erosão. Dependendo dos dados de projecto, um ou outro método pode ser mais eficiente.

#### **3.4.1. Método PCA (1984)**

No método de Portland Cement Association (PCA) de 1984 o cálculo do estado tensão de formação crítico foi efectuado por um programa de elementos finitos (Tayabji et al., (1986) citado por Branco et al (2011)), o qual, juntamente com os critérios de dimensionamento, foi usado para estabelecer as tabelas e ábacos que permitem a aplicação do método.

Este método aplica-se para determinação de espessuras de diferentes tipos de pavimentos rígidos, nomeadamente dos pavimentos de betão simples formado por lajes separadas por juntas, dos pavimentos de betão armado descontínuo e armado contínuo.

##### **3.4.1.1. Critérios a ser considerados no dimensionamento**

Após a seleção do tipo de pavimento rígido a aplicar (com ou sem juntas, com ou sem barras de transferência), do tipo de sub-base, se necessário, da inclusão de berma em betão ou não, a espessura da camada de betão é determinada com base em quatro parâmetros de dimensionamento:

- ✓ Fadiga (fendilhamento excessivo);
- ✓ Erosão do apoio das lajes (desgaste);

- ✓ Escalonamento.

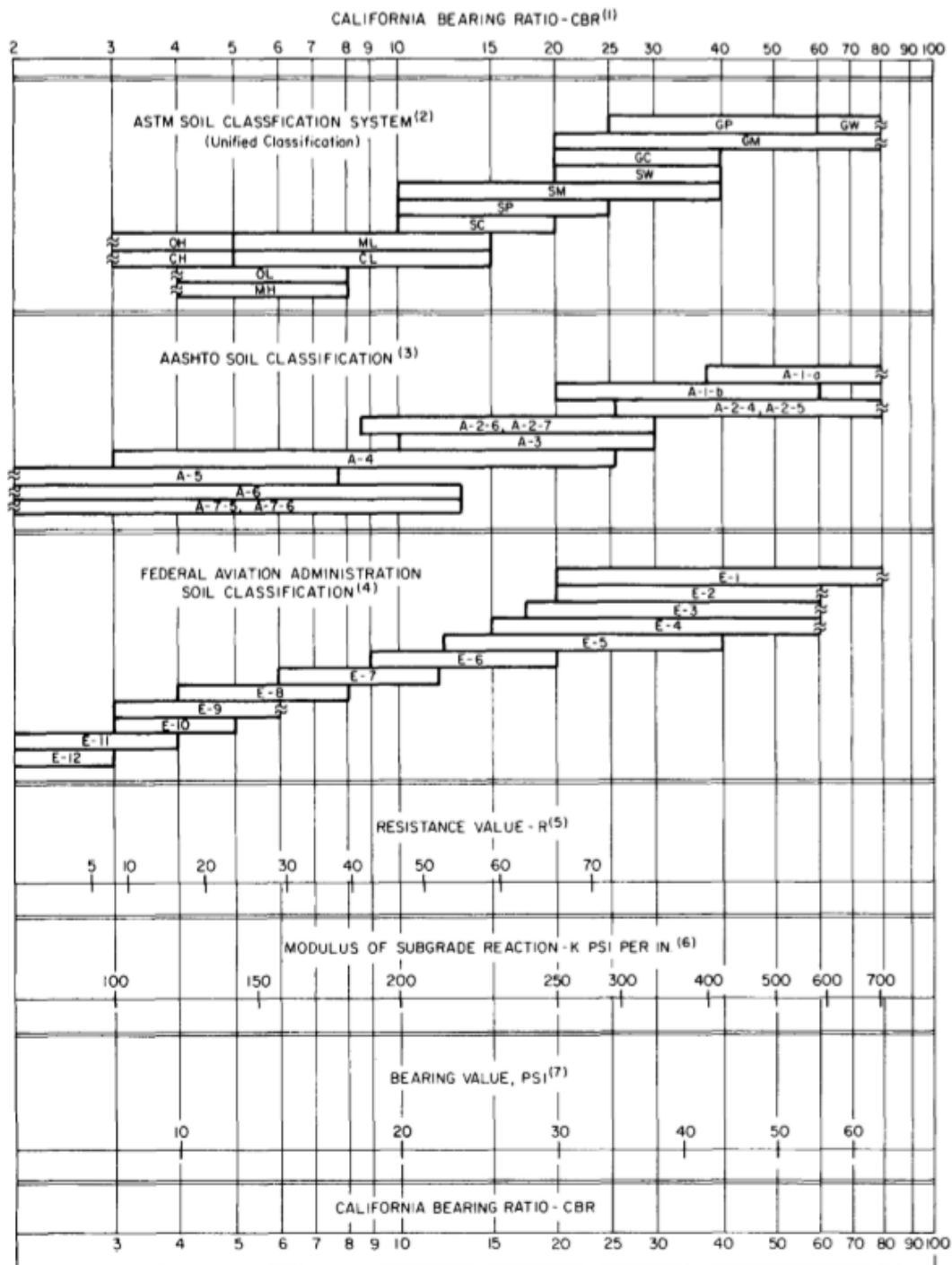
### **3.4.2. Ensaio CBR e Módulo de Reação**

A capacidade de suporte de um solo compactado pode ser estimada através do método do índice de suporte, que fornece o “Índice de Suporte Califórnia - ISC” (California Bearing Ratio - CBR), idealizado pelo engenheiro O. J. Porter, em 1939, no estado da Califórnia - USA.

Trata-se de um método de ensaio empírico, adotado por uma grande parcela dos organismos rodoviários no mundo. O objetivo do ensaio é determinar o Índice de Suporte Califórnia (CBR) e a expansão (E). O ensaio CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão. Essa relação é expressa em percentagem.

Para efeitos de dimensionamento, a capacidade da fundação do pavimento é medido pelo coeficiente de recalque  $k$ , também denominado módulo de reação, cujo valor é determinado por meio de prova de carga estática ou, indiretamente por ensaios mais simples, como o Índice de Suporte Califórnia, CBR.

A correlação entre  $k$  e CBR apresenta precisão suficiente para fins de dimensionamento, pois pequenas variações no coeficiente de recalque não têm consequências significativas na determinação das espessuras.



**Figura 3.3.2. Correlação entre os valores de CBR e K (Fonte: PCA, 1984)**

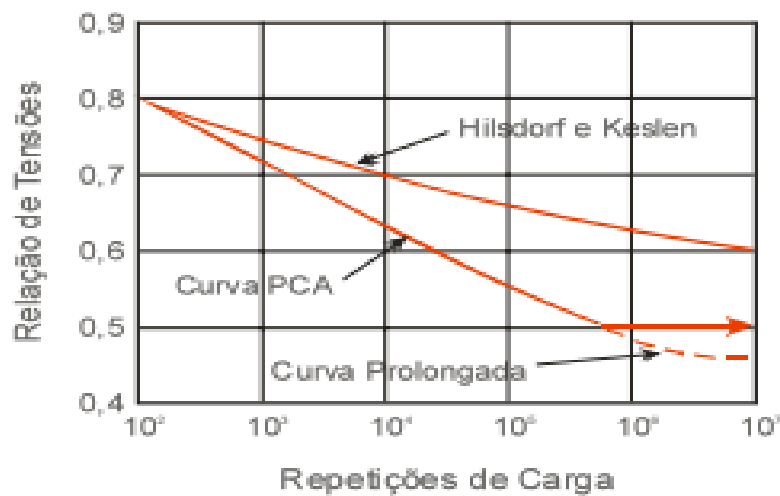
Os pavimentos rígidos costumam ter bom desempenho mesmo em terrenos com capacidade de suporte baixa. É necessário referir que a utilização de sub-bases em pavimentos rígidos confere benefícios que tornam imprescindível o seu emprego, pois:

- ✓ Impedem a ocorrência de bombeamento, caracterizado pela expulsão de finos plásticos através das juntas quando da passagem de cargas pesadas;

- ✓ Uniformizam o suporte da fundação;
- ✓ Promovem o incremento do coeficiente de recalque da fundação, nomeadamente quando são utilizadas sub-bases tratadas com cimento;
- ✓ Reduzem os efeitos prejudiciais de solo expansivos na estrutura do pavimento.

### 3.4.3. Lei da Fadiga

A análise de fadiga é feita com a utilização da regra de Miner, do dano acumulado por fadiga, e refere que “a parcela da resistência à fadiga não consumida por certo grupo de cargas é disponibilizada para o consumo de outras cargas, e a soma final dos consumos individuais de resistência à fadiga é igual ao dano total” (Oliveira, 200). Sendo admitido um consumo máximo da fadiga de 100%, em que esse valor não pode ser superado. Para efeitos de dimensionamento do pavimento pelo método de PCA/84, o cálculo da tensão máxima é calculado impondo que o eixo solicitante está localizado na tangente à borda longitudinal da placa, mesmo sabendo que só uma pequena parte dos veículos circula por essa posição (cerca de 6%).



**Figura 3.3.4. Curva de Fadiga (Fonte: DNIT, 2005)**

A curva de fadiga é a representação das três seguintes equações abaixo sendo N, o número admissível de repetições de carga, e  $R_t$  a relação entre a tensão de tração na placa e a resistência característica à tração na flexão do betão.

$N = \text{Ilimitado}$ , se  $R_t < 0,45$

$$N = \left[ \frac{4,2577}{(R_t - 0,4325)} \right]^{3,268}, \text{ se } 0,45 < R_t < 0,55$$

$$\log(N) = \frac{0,9718 - R_t}{0,0828}, \text{ se } R_t > 0,55$$

- ✓  $N$  = Número de repetições de carga até a fadiga do pavimento;
- ✓  $R_t$  = Razão entre a tensão aplicada e a resistência do concreto à tração;
- ✓ 4,2577 = Coeficiente empírico que reflete resistência e durabilidade;
- ✓ 0,4325 = Ponto de ajuste para cargas moderadas;
- ✓ 3,268 = Expoente que indica a sensibilidade do pavimento à carga;
- ✓ 0,9718 e 0,0828 = Parâmetros para a diminuição da durabilidade sob cargas altas.

O método do PCA adota como constantes o coeficiente de Poisson, o comprimento da placa, tal como a carga no eixo, a área de contacto do pneu e o espaçamento das rodas. Além disso possui fatores de correção relacionados com o efeito da capacidade da fundação além da borda da placa, os efeitos da localização da carga ao longo da secção transversal da placa, o ganho da resistência do betão após 28 dias e o efeito da variabilidade das propriedades do betão, para obtenção das tensões equivalentes. Tais tensões equivalentes podem ser obtidas em tabelas e variam em função do tipo de eixo, da espessura da placa, do coeficiente de recalque e da existência ou não de berma em betão. Com o valor das tensões equivalentes é possível descobrir o valor  $N$ , número admissível de repetições de carga em função da fadiga através do seguinte gráfico.

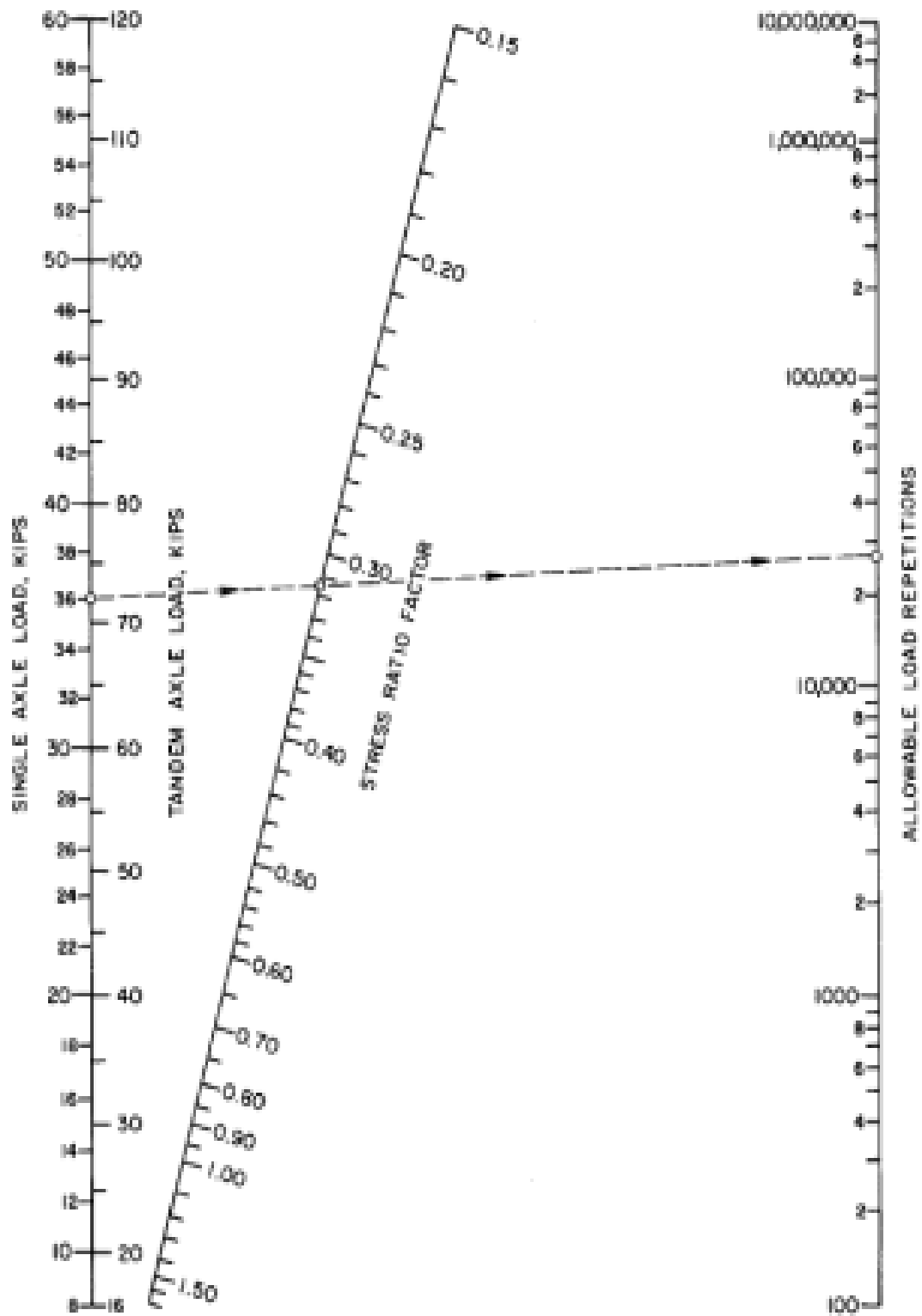


Fig. 3. Fatigue analysis—allowable load repetitions based on stress ratio factor (with and without concrete shoulder).

Figura 3.3.3. Determinação do número admissível de repetições de carga pela Fadiga (Fonte: PCA, 1984)

#### 3.4.4. Lei da Erosão

A erosão pode ser entendida como a degradação dos bordos das lajes e a perda de material nas juntas e no topo da camada que está sob a placa de betão, por direta ação da água e passagem de cargas pesadas, nomeadamente dos eixos múltiplos.

Este género de fenómeno não pode ser estimado pelo método da fadiga. O fenómeno da erosão é então a correlação entre os valores calculado das deformações verticais do canto da placa e das pressões verticais exercidas na interface entre a placa e a fundação. Sendo assim, foi criado, como parâmetro da erosão, um conceito de potência ou facto de erosão (P) que possibilita medir o poder que uma certa carga tem para produzir deformação vertical na placa: vai ser o produto da pressão vertical na interface (p) pela deformação vertical (w), dividido pelo raio de rigidez relativa (lc) da bacia de deformação da fundação, por unidade de área.

Usando fatores de ajustamento constantes, oriundos de correlações em pistas experimentais para um índice de serventia fina igual a 3,0, obteve-se uma expressão para P.

$$P = \frac{(268,7 \times (6,69 p))^2}{(2,54h \times K^{0,73})}$$

Em que:

- ✓ 268,7 = constante;
- ✓ h = espessura da placa em centímetros;
- ✓ k = coeficiente de recalque, k, em KPa/m;
- ✓ p = pressão vertical exercida na fundação sob o canto da placa, em KPa.

De forma que o critério da erosão inclua os devidos efeitos do escalonamento das juntas transversais, foram usados outros estudos que relacionam o índice de serventia do pavimento com a severidade do escalonamento, o tráfego de veículos pesados e a espessura do pavimento.

A representação gráfica que relaciona o fator de erosão com o tipo de eixo (figura 3.3.4)

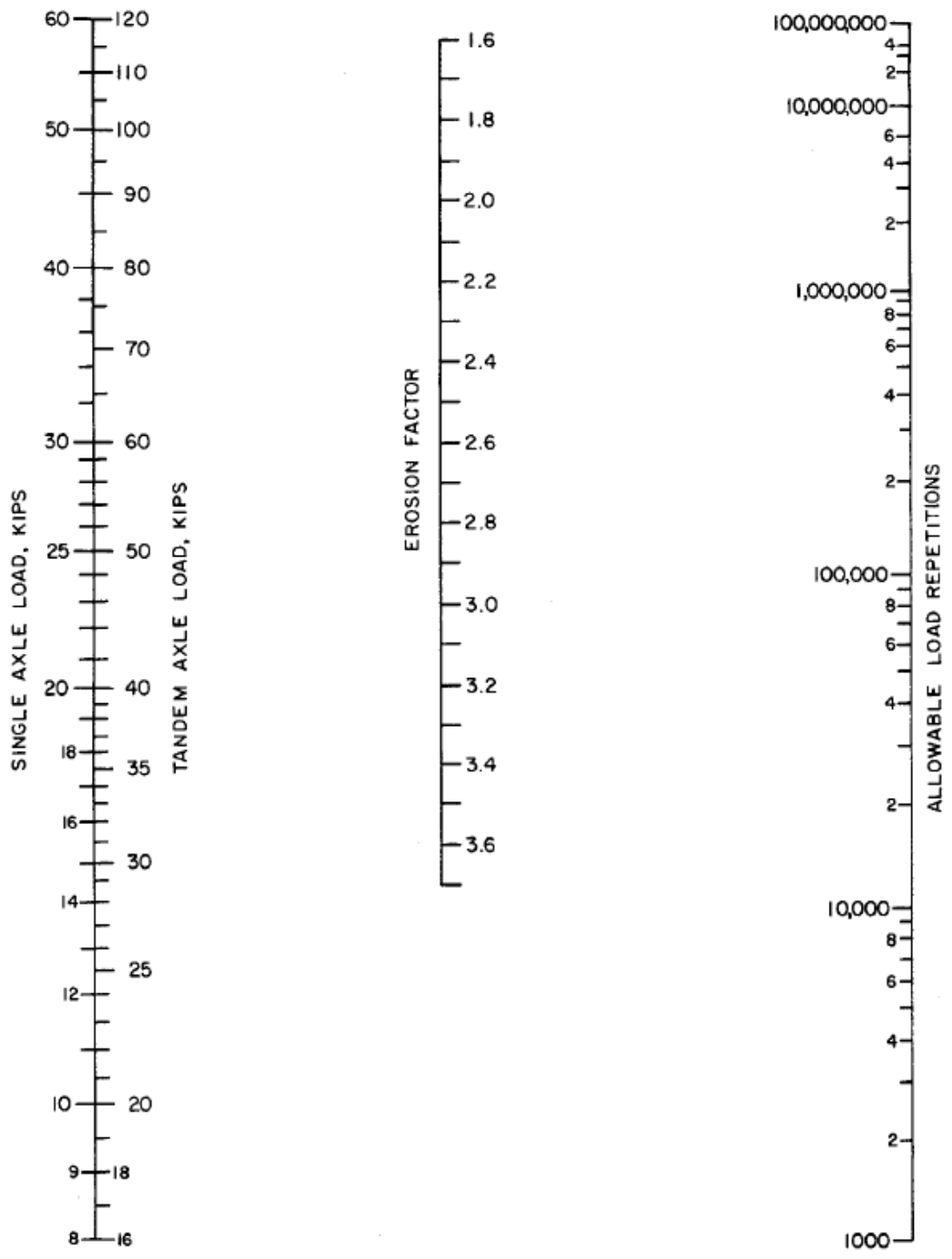


Fig. 6b. Erosion analysis—allowable load repetitions based on erosion factor (with concrete shoulder).

Figura 3.3.4. Determinação do número admissível de repetições de carga pela Erosão  
(Fonte: PCA, 1984)

### **3.4.5. Programa EverFE2.24**

O programa EverFE versão 2.24 é uma ferramenta de análise de elementos finitos 3D, que simula a resposta do sistema de pavimentos de betão simples/armados com juntas às cargas por eixo e efeitos ambientais. O programa EverFE tem a capacidade de modelo 1, 2 ou 3 unidades de laje/separadores longitudinalmente ou transversalmente (até 9 unidades de laje/separadores totais em uma configuração de 3 x 3). Barras de ligação podem ser especificadas explicitamente entre unidades adjacentes laje/separadores.

#### **3.4.5.1.Dados de entrada**

Para o cálculo no programa, são permitidos os seguintes dados de entrada:

##### **a) Geometria**

Permite especificar a geometria básica do sistema de pavimento rígido, dividido em duas partes: configuração da laje e sub-base/subleito. Podem ser especificadas até três camadas de base elásticas com uma base ligada ou não.

##### **b) Material**

Permite especificar as propriedades do material para lajes, barras de transferência, camadas de base/subleito, fundação líquido- denso e interface de base de laje.

##### **c) Cargas**

Podem ser especificadas, tanto as cargas por eixo/roda quanto os efeitos térmicos. As cargas por eixo fornecidas são: rodagem única, eixo de rodagem única, eixo de dupla-rodagem, eixo tandem com única-rodagem, tandem com rodagem dupla, e eixo genérico de multi rodagem. Todas as áreas de contacto são tratadas como rectangulares. Podem ser simulados gradientes de temperatura linear, bilinear, e trilinear através da espessura da laje.

##### **d) Barras de transferência e de ligação**

Podem ser especificadas nas juntas transversais de três maneiras: espaçadas uniformemente através da junta transversal, localizado no plano de rodagem, ou manualmente localizado digitando (x, y, z) as coordenadas. Parâmetros de passadores desalinhados podem ser especificados pela base passador-a-passador pelo usuário. Além disso, as barras de ligação podem ser especificadas nas juntas longitudinais. Pode ser simulado a interacção entre o passador e a laje, e transferência de carga transversal

imperfeita por especificar o parâmetro de folga da barra para a linha de lajes, ou por especificar o suporte e módulos de retenção do passador-laje para a linha de lajes.

#### **e) Entrosagem/interligação de agregados**

O EverFE tem duas opções básicas para simular o comportamento de entrosagem de agregados nas juntas transversais: um modelo linear e um modelo não-linear. O modelo padrão é linear. Independentemente se for seleccionada a opção linear ou não linear, o modelo de entrosagem do agregado aplica-se ao longo de toda a largura de cada junta transversal no modelo de elementos finitos.

#### **3.4.5.2.Solução e visualização de resultados**

O menu de solução fornece duas opções para executar a análise de elementos finitos: executar a análise mostrada e executar múltiplas análises. Na visualização dos resultados da análise de elementos finitos pós-processamento do EverFE estão disponíveis 4 principais opções: as tensões, deslocamentos, resultados de pontos de momentos e resultados das barras de transferência.

## CAPÍTULO IV– APRESENTAÇÃO, LEITURA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS RECOLHIDOS

### ESTUDO DE CASO: PARQUE DE CAMIÕES DE TRANSPORTES CATOJA

#### 4.1. Localização da área de estudo

O parque de camiões em estudo é uma área destinada ao estacionamento e manobras de veículos pesados, no qual efectua-se também a manutenção dos mesmos veículos de transportes de cargas pesadas.

O parque de camiões está situado na província de Maputo, Machava-Sede, A.V Josina Machel, com uma area de 80 m x 60 m.

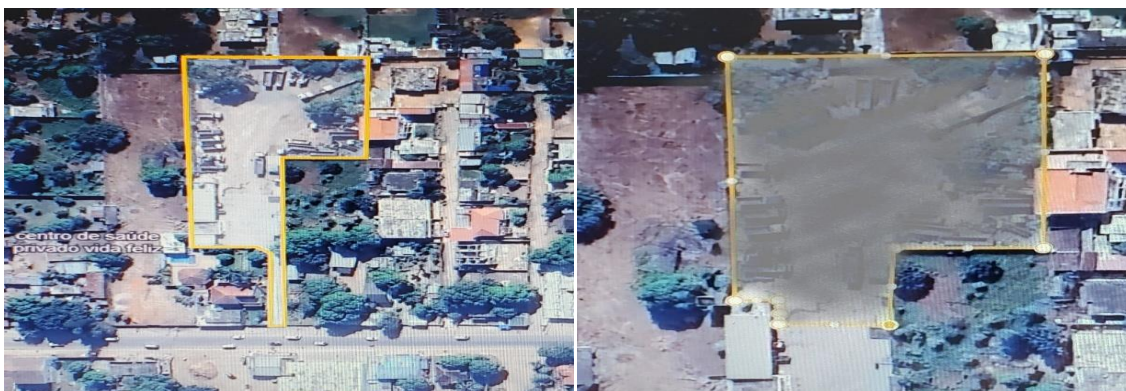
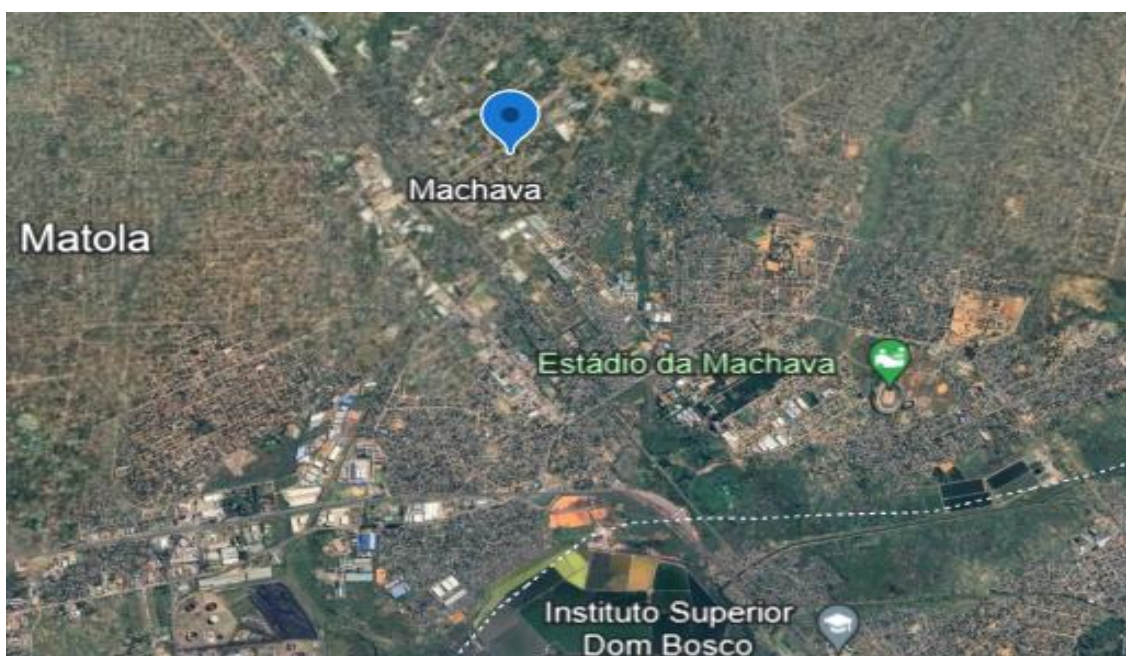


Figura 4. Localização do pavimento de estudo de caso na figura a direita (fonte: google earth, adaptado pelo autor)

## **4.2. Estrutura do pavimento**

### **4.2.1. Estrutura adoptada**

A estrutura do pavimento adoptada pelo candidato foi feita com base nos conhecimentos adquiridos em outras cadeiras. Uma vez que o método PCA 1984 é um método tentativo, executar-se-ão algumas tentativas até chegar-se a um resultado próximo ao que se considera estável de acordo com as directrizes do mesmo método.

O pavimento adoptado foi rígido de betão armado com juntas e barras de transferência, e que por sua vez serão efectuadas tentativas por forma a encontrar-se a espessura de pavimento adequada dos quais tem como ponto de partida 25 cm de laje de betão e se as análises de fadiga e de erosão conforme a folha de cálculo apresentada no método PCA 1984/ DNIT (2005).

### **4.2.2. Estudo de tráfego**

O estudo do pavimento em área privada de parque de camiões do transporte Catoja, foi concedido com finalidade de atender a demanda e a necessidade na melhoria das condições do pavimento, contando com uma área de estacionamento dos mesmos camiões e uma área de oficina para a reparação.

O pavimento foi projectado para um período de vida útil de 40 anos. O parque funciona de segunda a sábado, durante todo o ano, porém para o dimensionamento, irá se considerar os domingos visto que a área em referência poderá conhecer movimentos de camiões para parqueamento ou saída do parque.



**Figura 4.2.2. Camião de 6 eixos. ( Fonte: tirada pelo autor, Parque dos transportes Catoja 10/08/2023)**



**Figura 4.2.3. Camião de 7 eixos de longo curso.( Fonte: tirada pelo autor, Parque dos transportes Catoja 10/08/2023)**



**Figura 4.2.4. Camião de 3 eixos.( Fonte: tirada pelo autor, Parque dos transportes Catoja 10/08/2023)**

A área que se destina ao pavimento é uma área em que estão situadas as oficinas do parque, armazéns de material para reparação dos camiões, zona esta onde também ficam estacionados os veículos que já não estão em uso.

Com isto, apresenta-se a tabela abaixo onde estão representados os tipos de camiões, os respectivos pesos e tipos de eixos :

Tipos de camiões	Quantidade de veículos	Pesos Tonf	Distribuição (tnf)
3 eixos	10	24	7(simples)+17(tandem)
6 eixos	8	48,5	6(simples)+17(tandem)+25,5(tridem)
7 eixos	3	57	6(simples)+17(tandem)+17(tandem)+17(tandem)
Total	21		

**Tabela 4.2.2. Tipos de camiões e distribuição de cargas por eixos.**

## CAPÍTULO V - DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, discutiremos e analisaremos os resultados obtidos a partir do estudo baseado no procedimento de cálculo e pelos resultados obtidos com as folhas de cálculo do método PCA/84, onde foram realizadas três tentativas com espessuras de 25 cm, 20 cm e 15 cm.

### 5.1. Dimensionamento pelo método PCA/84

Para o dimensionamento por este método o candidato seguiu os procedimentos descritos do Capítulo 3 do Portland Cement Association(PCA, 1984), que se baseia no método tentativo para determinação da espessura do pavimento, como se descreve a seguir:

#### ✓ Módulo de reacção global (subleito e sub-base) $k$

Tendo em consideração que o CBR = 6 % conforme o estipulado como valor mínimo devido a falta de realização de ensaio o módulo de reação do solo,  $k$ , de acordo com a tabela B do Anexo I será de  $k_{\text{solo}} = 38 \text{ Mpa/m}$

O valor de  $K$  global no topo do sistema determinado através da mesma tabela do anexo I, para sub-base de betão rolado com 10 cm de espessura será  $K_{\text{global}} = 120 \text{ Mpa/m}$ .

#### ✓ O módulo de rotura do betão

A resistência característica a tracção na flexão aos 28 dias, será assumida com 4,5 Mpa, conforme recomendações da Associação Brasileira de cimento Portland.

#### ✓ O factor de segurança, relacionado com o tipo de tráfego

O coeficiente de segurança relativo adoptado de 1,0.

O candidato adoptou este coeficiente com base nas limitações da instalação, já tida em conta na contagem de tráfego.

Tipo de Pavimento	FSC
– para ruas com tráfego com pequena percentagem 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

Tabela 5. Factores de segurança (FSC).

✓ **Período de vida útil e tráfego**

O período de vida útil é de 40 anos. Em função dos dados de tráfego disponíveis, elaborou-se um quadro resumo.

- Distribuição das cargas por eixos;
- Número de solicitação diária;
- Número total de solicitações previstas durante o período de projecto de 40 anos.

Cargas por eixos		Solicitações	N=(40x365xsolicitações)
Eixo simples			
Tonf	Kips		
6	13	9	131400
7	15	4	58400
Tandem duplo			
17	37	4	58400
17,5	39	16	233600
Tandem triplo			
25,5	56	9	131400

**Tabela 5.1.1. Número de solicitações durante período de dimensionamento**

✓ **Tensão equivalente**

O candidato obteve a tensão equivalente que depende do módulo de reacção global e da espessura da laje de betão por meio de interpolação dos valores das tabelas em anexo

Os valores obtidos são os seguintes:

Tensão equivalente- sem berma de betão				Interpolação de tensão equivalente			
Eixos	Espessura Laje	K		Eixos	K inf	k de proj	Ksup
		300	500				
					300	<b>442,01</b>	500
Eixo simples	10 in	164	150	ES	164	<b>154,06</b>	150
Eixo tandem	10 in	144	126	ETD	144	<b>131,22</b>	126
Eixo tridem	10 in	108	95	ETR	108	<b>98,77</b>	95

**Tabela 5.1.2. Valor de Tensão Equivalente.**

### ✓ Factores de erosão

Os factores de erosão de que depende o módulo de reacção global e a espessura da laje de betão foram obtidos pelo candidato por meio da interpolação dos valores das tabelas em anexo.

Os valores obtidos são os seguintes:

Factores de Erosão – juntas com barras de transf. sem bermas de betão				Interpolação de factores de erosão			
Eixos	Espessura laje	K		Eixos	K inf	K de proj	K sup
		300	500		300	500	500
Eixosimples	10 in	2,71	2,68	ES	2,68	<b>2,69</b>	2,71
Eixo tandem	10 in	2,89	2,81	ETD	2,89	<b>2,83</b>	2,81
Eixo tridem	10 in	2,93	2,85	ETR	2,93	<b>2,87</b>	2,85

**Tabela 5.1.3. Valor de Factor de Erosão**

### ✓ Determinação da espessura da laje por método tentativo

O roteiro seguido pelo candidato conforme recomenda o PCA (1984), apresenta-se abaixo:

Na primeira tentativa foi adoptada uma laje de espessura igual de 25 cm, cuja verificação consta na folha de cálculos ilustrada na **Tabela 5.1.4.** e repetições admissíveis obtidas com ajuda da **Figura 5.1.**; na segunda tentativa foi adoptada uma laje de espessura igual de 20 cm, cujos resultados estão apresentados na folha de cálculos ilustrada na **Tabela 5.1.5.** e repetições admissíveis obtidas com ajuda da **Figura 5.2.** e na terceira tentativa, foi adoptada uma laje de espessura igual de 14 cm, cuja verificação consta na folha de cálculos conforme ilustrado na **Tabela 5.1.6.** e repetições admissíveis obtidas com ajuda da **Figura 5.3.**

Cálculo de Pavimentos Rígidos - Metodo P.C.A. (1984)						
Projecto Pavimento de betão ar mado - Transportes Catoja						
Espessura considerada	10 in.	25 cm	Juntas c/ passadores	Sim	x	Nao
Módulo de reacção do solo, k	173,4 pci	38 MPa/m	Bermas em betão	Sim	Nao	x
Tipo de sub-base		betão pobre		Período de vida do projecto		
Espessura de sub-base	4 in.	10 cm				
Módulo de reacção Global, k	442,01 pci	120 MPa/m				
Tensão característica de rotura por tracção a flexão, MR			652,7 psi	4,5 MPa		
Coeficiente de segurança relativo a solicitação, LSF			1			
Cargas por eixo (kips)	Multiplicadas por LSF (kips)	Repetições previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Repetições admissíveis	Porcentagem de fadiga	Repetições admissíveis	Porcentagem de desgaste
1	2	3	4	5	6	7
<b>EIXO SIMPLES</b>			8. Tensão equivalente	154,06	10. Factor de desgaste	2,69
			9. Factor de tensão	0,24		
13	13	131400	ilimitado	0,0%	ilimitado	0,0%
15	15	58400	ilimitado	0,0%	ilimitado	0,0%
<b>EIXO TANDEM</b>			11. Tensão equivalente	131,22	13. Factor de desgaste	2,38
			12. Factor de tensão	0,20		
37	37	58400	ilimitado	0,0%	20.000.000	0,29%
39	39	233600	ilimitado	0,0%	10.000.000	2,34%
<b>EIXO TANDEM TRIPLOS</b>			14. Tensão equivalente	98,77	16. Factor de desgaste	2,87
			15. Factor de tensão	0,15		
56	56	131400	ilimitado	0,0%	400.000	32,85%
			TOTAL	0,0%	TOTAL	35,48%

Tabela 5.1.4. Dimensionamento do método PCA para 25cm de espessura

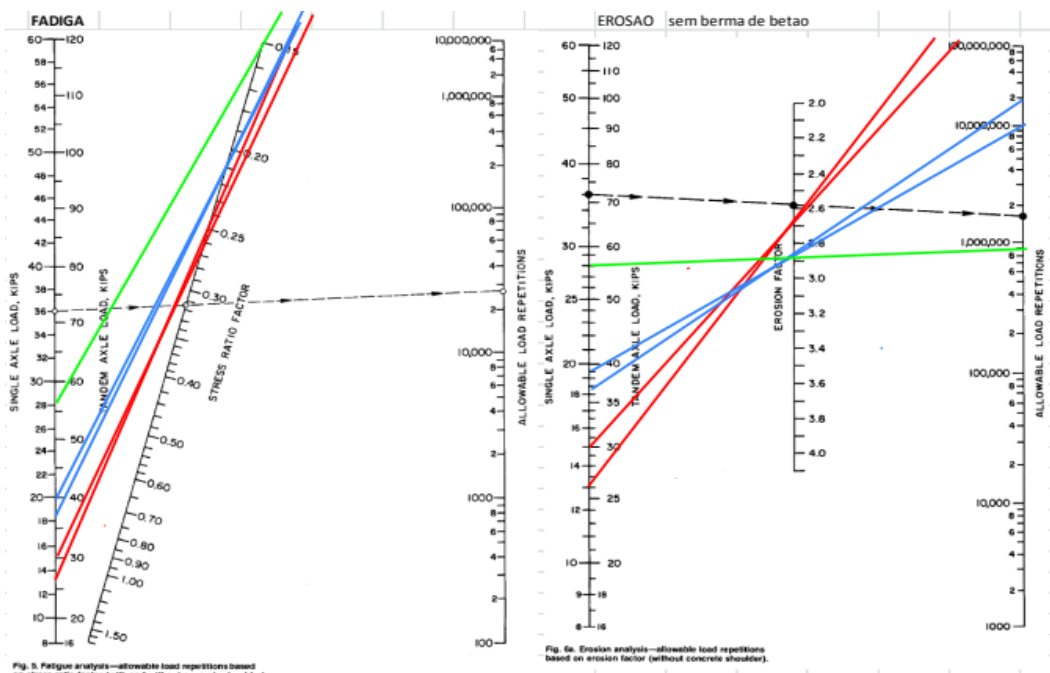


Figura 5.1. Repetições admissíveis para a fadiga e erosão (25cm)

Cálculo de Pavimentos Rígidos - Metodo P.C.A. (1984)						
Projecto Pavimento de betão armado -Transportes Catoja						
Espessura considerada	8 in.	20 cm	Juntas c/ passadores	Sim	x	Não
Módulo de reacção do solo, k	173,4 pci	38MPa/m	Bermas em betão	Sim		Não x
Tipo de sub-base	betão pobre		Periodo de vida do projecto	40 Anos		
Espessura de sub-base	4 in.	10 cm				
Módulo de reacção Global, k	442,01 pci	120 MPa/m				
Tensão característica de rotura por tracção a flexão, MR			652,7 psi	4,5 MPa		
Coefficiente de segurança relativo a solicitação, LSF	1					
Cargas por eixo (kips)	Multiplicadas por LSF (kips)	Repetições previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Repetições admissíveis	Porcentagem de fadiga	Repetições admissíveis	Porcentagem de desgaste
1	2	3	4	5	6	7
<b>EIXO SIMPLES</b>		8. Tensão equivalente	210,80	10. Factor de desgaste	2,97	
		9. Factor de tensão	0,32			
13	13	131.400	ilimitado	0,0%	ilimitado	0,0%
15	15	58400	ilimitado	0,0%	30.000.000	0,19%
<b>EIXO TANDEM</b>		11. Tensão equivalente	173,09	13. Factor de desgaste	3,05	
		12. Factor de tensão	0,27			
37	37	58400	ilimitado	0,0%	3.200.000	1,83%
39	39	233.600	ilimitado	0,0%	2.500.000	9,34%
<b>EIXO TANDEM TRIPLOS</b>		14. Tensão equivalente	130,35	16. Factor de desgaste	3,09	
		15. Factor de tensão	0,20			
56	56	131.400	ilimitado	0,0%	2.600.000	50,54%
			TOTAL	0,0%	TOTAL	61,9%

Tabela 5.1.5. Dimensionamento do método PCA para 20cm de espessura

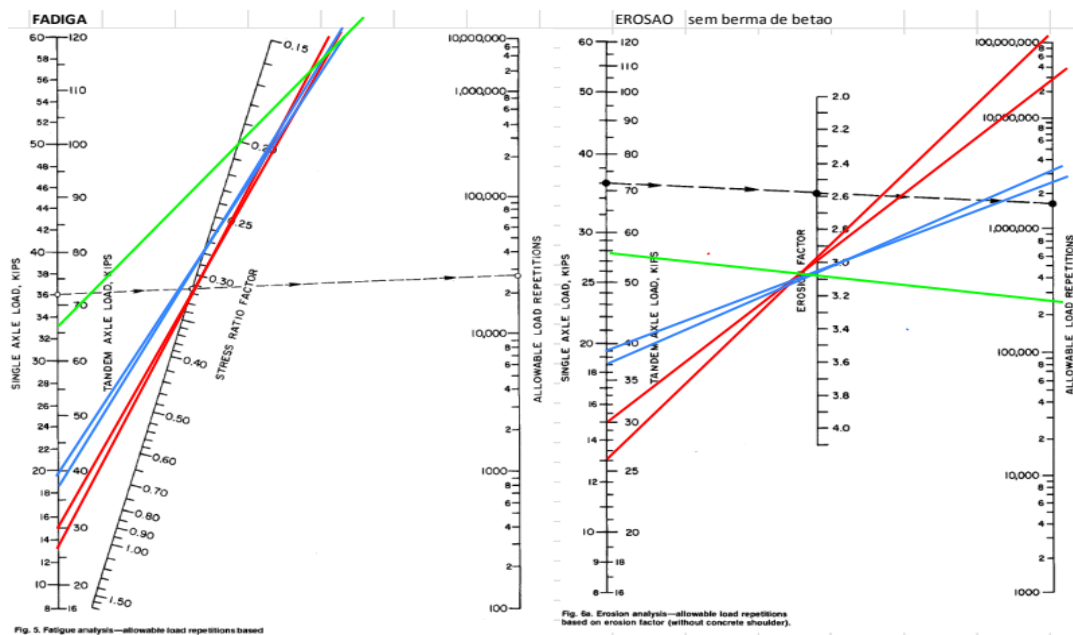


Figura 5.2. Repetições admissíveis para a fadiga e erosão (20cm)

Cálculo de Pavimentos Rígidos - Metodo P.C.A. (1984)						
Projecto Pavimento de betão armado -Transportes Catoja						
Espessura considerada	6 in.	15 cm	Juntas c/ passadores	Sim	x	Nao
Módulo de reacção do solo, k	173,4 pci	38MPa/m	Bermas em betão	Sim	Nao	x
Tipo de sub-base	betão pobre		Periodo de vida do projecto	40 Anos		
Espessura de sub-base	4 in.	10 cm				
Módulo de reacção Global, k	442,01 pci	120 MPa/m				
Tensão característica de rotura por tracção a flexão, MR			652,7 psi	4,5 MPa		
Coefficiente de segurança relativo a solicitação, LSF	1					
Cargas por eixo (kips)	Multiplicadas por LSF (kips)	Repetições previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Repetições admissíveis	Percentagem de fadiga	Repetições admissíveis	Percentagem de desgaste
1	2	3	4	5	6	7
<b>EIXO SIMPLES</b>		8. Tensão equivalente	313,28	10. Factor de desgaste	3,33	
		9. Factor de tensão	0,48			
13	13	131.400	ilimitado	0,0%	40.000.000	0,33%
15	15	58400	ilimitado	0,0%	20.000.000	0,29%
<b>EIXO TANDEM</b>		11. Tensão equivalente	253,25	13. Factor de desgaste	3,36	
		12. Factor de tensão	0,39			
37	37	58400	ilimitado	0,0%	500.000	11,68%
39	39	233.600	ilimitado	0,0%	300.000	77,87%
<b>EIXO TANDEM TRIPLOS</b>		14. Tensão equivalente	201,19	16. Factor de desgaste	3,37	
		15. Factor de tensão	0,31			
56	56	131.400	2.000.000	6,57%	40.000	328,5%
			TOTAL	6,57%	TOTAL	418,67%

Tabela 5.1.6. Dimensionamento do método PCA para 15cm de espessura

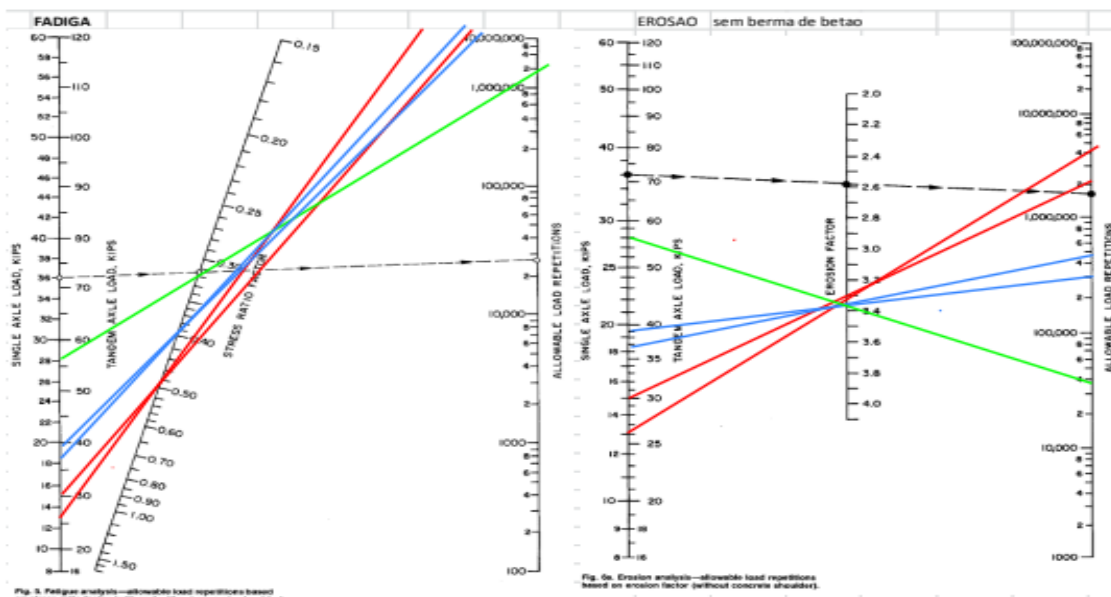


Figura 5.3. Repetições admissíveis para a fadiga e erosão (15cm)

### ✓ **Análise de resultados**

Da verificação da fadiga, usando uma espessura de 25cm estando sob carregamento, o **consumo de fadiga seria igual a 0%**, para o período de projecto. Quanto a **percentagem de desgaste**, o consumo seriam de apenas **35,48%**.

Devido a estes resultados, procedeu-se também a verificação de espessuras menores, nomeadamente, de 20 e 15 cm. Para a espessura de 20 cm, obteve-se o consumo de **fadiga de 0,0%** e uma **percentagem de desgaste de 61,9%** e para a espessura de 15 cm a **fadiga do pavimento foi de 6,57%** e a **percentagem de desgaste foi de 418,67%**. Portanto as espessuras de 20 cm seriam suficientes para o pavimento em estudo ao invés de 25 cm.

### **5.2. Tensões no pavimento**

Por tratar-se de um dimensionamento em que os valores não foram determinados em laboratório, mais sim de uma determinação feita de maneira a que se obteve-se resultado por meio de estudos com base em literaturas e exemplos já elaborados os valores adoptados são os mínimos assumidos e partindo de princípio que a espessura da laje assumida no cálculo é a de 25 cm.

#### **Dados:**

**L** = 12 m (longitude de losa)

**B** = 3,60 m (ancho de losa)

**k** = 2,77 kg/cm<sup>3</sup> (módulo de reacção da subrasante)

**Δt** = 16,6 °C (diferença de temperatura entre as capas °C)

**S<sub>D</sub>** = 34,3 cm (Separação entre eixos das rodas duais cm.)

**p<sub>contacto</sub>** = 5,25 kg/cm<sup>2</sup> (pressão de contacto do pneu (kg/cm<sup>2</sup>)).

**ε<sub>t</sub>** = 9x10<sup>-6</sup> unidades de long/°C (coeficiente de dilatação térmica do hormigón)

**μ** = 0,15 (coeficiente de Poisson do hormigón)

**E<sub>HORMIGÓN</sub>** = 280 000 kg/cm<sup>2</sup> (módulo de elasticidade do hormigón kg/cm<sup>2</sup>.)

$f = 1,5$  (coeficiente de fricção da losa – costume)

$W$ : 24 kg/cm<sup>2</sup>/cm. de losa (peso de 1 m<sup>2</sup> de losa/cm. de espesor. (kg.)).

$R'_{bk} = 300$  kg/cm<sup>2</sup> (resistência característica a compressão do hormigón)

A carga actuante será de 6.5 ton por eixos simples com rodas duais espaçadas a 34.3 cm.

✓ **Tensões por temperatura:**

$$\text{No bordo: } \sigma_B = \frac{C_1 \cdot E \cdot \varepsilon_t \cdot \Delta t}{2}$$

$$\text{No interior: } \sigma_i = \frac{E \cdot \varepsilon_t \cdot \Delta t}{2} \left( \frac{C_1 + \mu \cdot C_2}{1 - \mu^2} \right)$$

$$\text{O rádio de rigidez relativa: } \ell = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)k}}$$

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{(280000)(25)^3}{12(1 - 0,15^2) \cdot 2,77}} = 107,72 \text{ cm}$$

Para calcular os valores de  $C_1$  e  $C_2$  é necessário saber os valores da relação  $L_X/l$  y  $L_Y/l$ , assim temos :

$$L_X/l = 1200/107,72 = 11,14$$

$$L_Y/l = 360/107,72 = 3,34$$

$$C_1 = 1,02$$

$$C_2 = 0,20$$

Com isso temos:

$$\text{Bordo: } \sigma_b = \frac{(1,02)(280000)(9 \times 10^{-6})(16,6)}{2} = \mathbf{21,33 \text{ kg/cm}^2}$$

$$\text{Interior: } \sigma_i = \frac{(280000)(9 \times 10^{-6})(16,6)}{2} \left[ \frac{1,02 + 0,15(0,20)}{1 - 0,15^2} \right] = \mathbf{22,47 \text{ kg/cm}^2}$$

✓ **Tensões devidas à carga:**

No bordo e interior:  $\sigma_{b,i} = \frac{P}{h^2} \cdot C$

Antes de usar as expressões conhecidas, é preciso realizar alguns cálculos.

$$P = \frac{6500}{2} = 3250 \text{ kg}$$

Área de contato de uma roda (assumir  $k_r = 1.0$ )

$$A_c = \frac{P}{p_c * k_r} = \frac{3250}{5,25 * 1.0} = 619 \text{ cm}^2$$

Longitude do rastro:  $L = \sqrt{\frac{A_c}{0,523}} = \sqrt{\frac{619}{0,523}} = 34,4 \text{ cm}$

$$A_T = S_D * L + A_c$$

$$A_T = (34,3) (34,4) + 619 = 1799 \text{ cm}^2$$

Logo:

$$a = \sqrt{\frac{A_T}{\pi}} = \sqrt{\frac{1799}{3,1416}} = 23,93 \text{ cm}$$

Ver agora se **a** é maior ou menor que 1,724h

$$1,724(25) = 43,1 \text{ cm} \quad \text{logo } a < 0,172h. \text{ Então:}$$

$$b = \sqrt{1,6.a^2 + h^2} - 0,675h$$

$$b = \sqrt{1,6(23,93)^2 + (25)^2} - 0,675(25)$$

$$\mathbf{b = 22,38 \text{ cm.}}$$

$$\text{Logo } l/b = 107,72/22,38 = 4,81$$

Com este valor vai ao ábaco e se obtém os valores de  $C_{\text{interior}}$  e  $C_{\text{bordo}}$

$$C_{\text{interior}} = 1,25$$

$$C_{\text{bordo}} = 1,75$$

Logo:

$$\sigma_i = \frac{6500}{(25)^2} (1,25)$$

$$\sigma_i = 13 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_b = \frac{6500}{(25)^2} (1,75)$$

$$\sigma_b = 18,2 \text{ kg/cm}^2$$

Na esquina:

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a_1}{l} \right)^{1,2} \right]$$

$$a_1 = \sqrt{2}a = 33,84$$

$$\sigma_e = \frac{3(6500)}{(25)^2} \left[ 1 - \left( \frac{33,84}{107,72} \right)^{1,2} \right] \quad 147 \text{ e } 545$$

$$\sigma_e = 23,4 \text{ kg/cm}^2$$

✓ Tensão devida à fricção

$$\sigma_f = \frac{W.L.f}{200h}$$

$$\sigma_f = \frac{(24 \times 25 \text{ cm})(1,5)(12)}{(200)(25)}$$

$$\sigma_f = 2,16 \text{ kg/cm}^2$$

✓ Determinação da armadura longitudinal e transversal

Uma vez que trata-se de um dimensionamento realizado com base em consultas de manuais para a concretização dos cálculos os valores assumidos são valores tomados em conta com as literaturas .

Dados:

Espessura do pavimento (h): 25cm

Resistência característica do betão (fck): 30 Mpa (segundo a NBR 6118)

Tensão de escoamento do aço (fyk): 500 Mpa (segundo a NBR 7480)

Carga distribuída (q): 5000 N/m<sup>2</sup>

Largura do pavimento (L): 6m

- **Momento flector resistente (Ms)**

$$M_s = \frac{q * L^2}{8}$$

$$M_s = \frac{5000 * (6)^2}{8} = 22500 \text{ N.m}$$

- **Braço de Alavanca (z) [de acordo com NBR 6118]**

O braço de alavanca (z) é calculado como 0,9 vezes a altura útil (d). Considerando que (d) é a espessura do pavimento menos a camada de recobrimento (c).

$$d = h - c = 25 \text{ cm} - 3 \text{ cm} = 22 \text{ cm} / 0,22 \text{ m}$$

$$z = 0,9 * 0,22 = 0,198 \text{ m}$$

- **Área de aço necessária (As)**

$$A_s = \frac{M_s}{f_{yk} * z}$$

$$A_s = \frac{22500}{500 * 0,198} = 227,27 \text{ cm}^2$$

- **Determinação do número de barras**

Vamos usar as barras de 12,5 mm de diâmetro. A área de uma barra é calculada como:

$$A_s = \frac{\pi * (d/2)^2}{4} = \frac{\pi * (1,25)^2}{4} = 1,23 \text{ cm}^2$$

$$n = \frac{A_s}{A_s} = \frac{227,27}{1,23} \approx 185 \text{ barras } \varnothing 12,5 \text{ mm}$$

logo:  $A_{Str} \approx A_{Slong}$

nº de barras transversais assumindo um espaçamento de 30cm e um comprimento de 6m temos:

$$\text{nº de barras} = \frac{6}{0,30} \approx 20 \text{ barras } \varnothing 12,5 \text{ mm}$$

### 5.3. Dimensionamento das barras de transferência

As juntas transversais de retracção têm a função de controlar as fissuras de retracção do concreto, além de ter como mecanismo de transferência de carga de uma placa para a outra. A decisão de se adoptar ou não uma junta transversal de retracção com barras de transferência, depende do tráfego do projeto; magnitude das cargas e do tipo de fundação do pavimento.

Após estudos teóricos e pesquisas específicas do comportamento das barras de transferência sob a ação de cargas repetidas, de forma simplificada, foram fornecidos o diâmetro, comprimento e o espaçamento necessário de implantação das barras, em função da espessura da placa.

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

**Tabela 5.2. Diâmetro, comprimento e espaçamento de barras de transferência (barras- aço CA-25), fonte: DNIT(2005)**

Espessura das placas de concreto  $\rightarrow h = 20 \text{ cm}$

- ✓ Diâmetro 25 mm;
- ✓ Comprimento 46 cm;
- ✓ Espaçamento de 30 cm.

#### 5.4. Dimensionamento de barras de ligação

De acordo com o DNIT (2005) para as juntas longitudinais, é justificada a colocação de elementos de ligação, quando houver a necessidade de manter as faixas de possíveis movimentos laterais, assegurando a transferências de cargas.

Os elementos de ligação são calculados para resistir à força de atrito entre a junta considerada e a junta ou borda livre mais próxima dela.

$$A_s = \frac{b \cdot f \cdot \gamma_c \cdot h}{100 \cdot S}$$

Onde:

- $A_s$  = seção de barras de aço necessária, por metro de comprimento da junta considerada, em  $\text{cm}^2/\text{m}$ ;
- $b$  = distância entre a junta considerada e a junta ou borda livre mais próxima dela, em m;
- $f$  = coeficiente de atrito entre a placa e o subleito ou sub-base, que pode variar de 1,5 a 2,0, sendo geralmente tomado como 1,5;
- $\gamma_c$  = massa específica do concreto, igual a  $24.000 \text{ N/m}^2$ ;
- $h$  = espessura da placa, em m;
- $S$  = tensão admissível no aço, em geral  $2/3$  da tensão de escoamento, em Mpa.

$$b = 3,60 \text{ m}$$

$$f = 1,5;$$

$$\gamma_c = 24.000 \text{ N/m}^2;$$

$$h = 0,20 \text{ m};$$

$$S = 2/3 \times 500 \text{ MPa} = 333,33 \text{ MPa};$$

$$A_s = \frac{3,60 \times 1,5 \times 24.000 \times 0,20}{100 \times 333,33} \rightarrow A_s = 0,78 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Adotado  $\varnothing 12,5 \text{ mm c/ } 75 \text{ cm}$

Considerando uma tensão máxima de aderência aço-concreto de 2,5 MPa, o comprimento da barra de ligação, necessário para assegurar sua aderência é:

$$\ell = \frac{S \cdot d}{2 \cdot t_b} + 7,5$$

Onde:

- $\ell$  = comprimento de uma barra de ligação, em cm;
- $d$  = diâmetro da barra de ligação, em cm;
- $t_b$  = tensão de aderência entre o aço e o concreto, em geral tomada igual a 2,45 MPa;
- 7,5 = margem de segurança, prevendo-se uma possível descentralização da barra, em cm.

$$S = 2/3 \times 500 \text{ MPa} = 333,33 \text{ MPa};$$

$$d = 1,25 \text{ cm};$$

$$t_b = 2,45;$$

$$\ell = \frac{333,33 \times 1,25}{2 \times 2,45} + 7,5 \rightarrow \ell = 92 \text{ cm}$$

Apesar dos cálculos acima para a definição do comprimento da barra de ligação, é recomendado pelo DNIT (2005, p.169) “No projeto de barras de ligação, tem sido frequente o uso de barras de aço corrugado, com bitola de 12,5 mm e comprimento de 76,0 cm, a cada 76,0 cm”.

Portanto foram adotadas para as barras de ligações do projeto:

- ✓ Diâmetro 12,5 mm;
- ✓ Comprimento 76 cm;
- ✓ Espaçamento de 76 cm.

### 5.5. Análise estrutural pelo programa EverFe2.24

A formulação da modelação e a análise correspondente aos limites associados ao cálculo de uma estrutura de pavimento solicitada sob carregamento cíclico, é baseada

nos seguintes aspectos: geometria estrutural, propriedades dos materiais constituintes e, solicitação uniforme na direcção da passagem do carregamento. Neste trabalho foi utilizada a ferramenta computacional de cálculo denominada EverFe2.24, descrita no **capítulo 3**, com o objectivo de proceder análise das tensões/extensões, momentos flectores máximos e a deformação que ocorrem no pavimento em estudo.

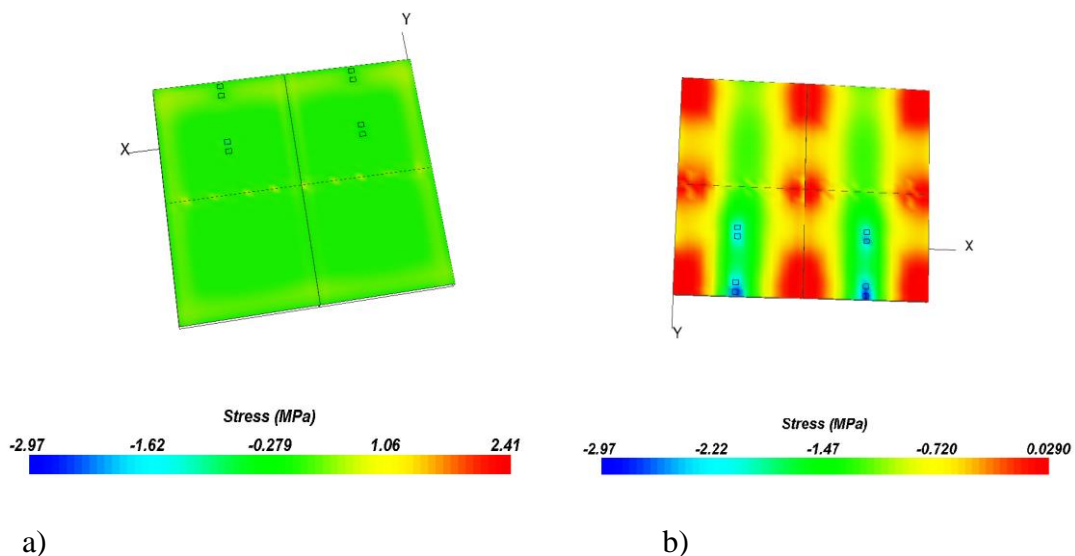
### Dados para avaliação do desempenho dos pavimentos

Neste estudo, foram assumidos os dados descritos no 4.4.2.1 para o pavimento, ou seja, a solução executada em obra com laje de 20 cm de espessura.

A geometria da laje foi composta por 4 placas com dimensões do caso real e a posição do carregamento foi no interior de uma das lajes ( $x= 4.30\text{m}$ ;  $y= 1.2\text{m}$ ).

### Simulação e resultados do desempenho do pavimento

Nas figuras que seguem estão apresentados os resultados das tensões obtidas na direcção  $xy$ , na face superior e na face inferior da laje de 20 cm.



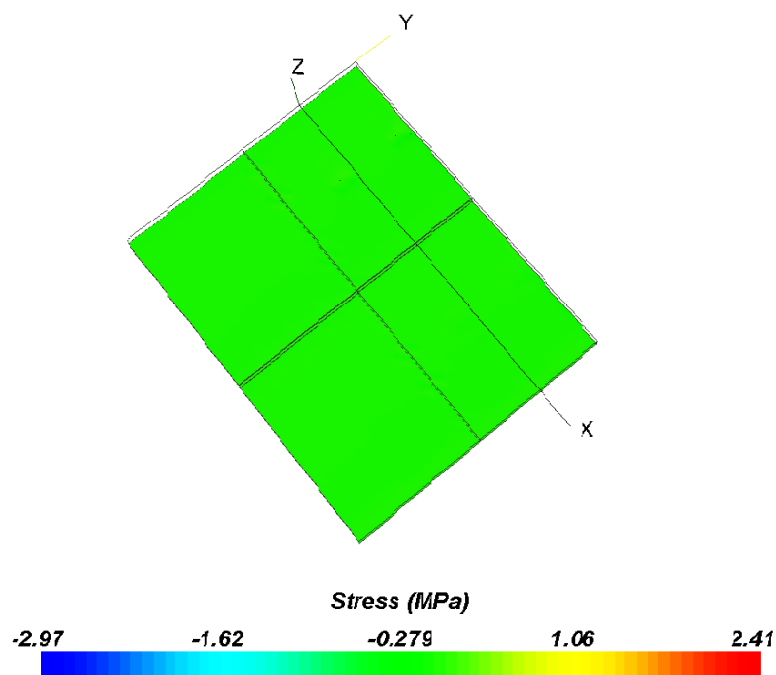
**Figura 5.4.1. Distribuição das tensões: a) Face inferior b) No topo da placa**

Pode-se observar que o momento flector, varia de acordo com as faces na espessura da laje, sendo muito baixo na superfície (valores negativos) e tendo os maiores valores na parte inferior (valores positivos). Analisando a face inferior, as tensões são mais elevadas no interior da placa, atingindo valores máximos na posição do carregamento, e

diminuem a nas bermas e juntas. Nota-se ainda que existe uma área de momento negativo (traccionando as fibras superiores) nos cantos de cada laje.

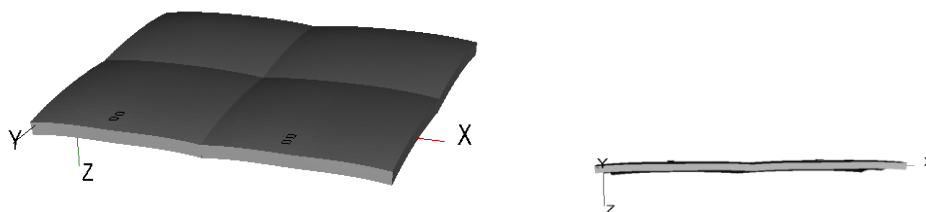
Os momentos flectores máximos e mínimos principais, que se desenvolvem na laje, são obtidos no interior da placa, na posição do carregamento, o máximo é de **2,41 Mpa**, e o mínimo é de **-2,97 Mpa**.

Pode-se observar na figura que segue, que as tensões transmitidas a fundação, ou seja, as tensões na face inferior da sub-base, desenvolvem-se mais nas zonas das juntas e são muito baixas devido a presença das camadas de betão que absorvem a maior parte delas.



**Figura 5.4.2. Distribuição da tensão da sub-base, face inferior**

A deformação das lajes é reduzida e ocorre essencialmente nos cantos e bermas livres das lajes, conforme ilustra a figura seguinte.



**Figura 5.4.3. Deformação das lajes(Fonte: EverFe 2.24, adaptado pelo autor)**

De acordo com os resultados do programa, as barras de transferência têm momento máximo de 29923,348N.mm e cisalhamento máximo 1055,83 N.

E como podemos constatar existem pequenas deformações nos cantos e nas bordas das lajes devido ao carregamento pelos veículos.

De acordo com os resultados apresentados nas folhas de cálculo o pavimento com espessura de 20 cm apresenta ser mais viável pois cumpre com alguns factores estipulados pelo método PCA/84, por sua vez apresenta os seguintes resultados: **consumo de fadiga de 0,0%** e uma **percentagem de desgaste de 61,9%**.

Embora a espessura de 20 cm seja aprovada pela folha de cálculo do método **PCA/ 84** o valor que será utilizado de acordo com os cálculos será o de 25 cm de espessura, pois resultados que o comprimento de 25 cm proporciona uma distribuição de carga mais uniforme e consistente.

<b>Espessura do pavimento</b>	25 cm
<b>Barras de ligação</b>	Ø 12,5 mm c/ 75 cm
<b>Barras de transferência</b>	Ø 25 mm c/ 46 cm

**Tabela 5.4. Apresentação dos resultados das espessuras e das barras**

As barras de ligação com diâmetro de 12,5 mm e 75 cm que foi adoptado de acordo com DNIT 2005, desempenha um papel crucial na manutenção da integridade estrutural.

O mesmo acontece quando trata-se das barras de transferência, pois de acordo com o manual do DNIT 2005 as barras de ligação vêm já estipuladas de acordo com as espessuras de pavimento obtidos ou adoptados de acordo com os respectivos cálculos.

## **CAPÍTULO VI–CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

### **6.1. Conclusão**

Tendo em conta os objectivos e hipóteses, após a pesquisa feita e estudos, conclui-se o seguinte:

- i. Os pavimentos rígidos, devido a sua alta consistência, constituem uma solução que oferece uma vida útil mais prolongada, de cerca de 40 anos;
- ii. Os pavimentos rígidos devido a sua alta resistência e vida útil prolongada, constituem uma solução ideal para a utilização em parques de estacionamento onde as cargas são variadas;
- iii. O dimensionamento de pavimento pelo método PCA foi muito útil na determinação da estrutura de pavimento que garanta uma longa vida útil;
- iv. A implementação de estratégias de manutenção permite preservar a vida útil dos pavimentos e reduzir custos a longo prazo, entretanto o método não é muito preciso por basear-se em ábacos e tabelas e não em métodos analíticos;
- v. O uso de materiais de alta resistência e a adopção de espessuras variadas em função do dimensionamento pelo método PCA, é garantia de vida útil do pavimento, de 40 anos para as cargas previstas.
- vi. O EverFE baseado no método dos elementos finitos foi uma ferramenta útil na análise estrutural do pavimento.

## **6.2. Recomendações**

Com base nos resultados do presente estudo ficou evidente que existe uma necessidade de adoptar boas práticas e uso de materiais com desempenho aceitável e responde razoavelmente aos aspectos de durabilidade e assim como a vida útil necessária de 40 anos para os pavimentos rígidos. Desta forma recomenda-se:

- i. Usar os programas computacionais na análise de esforços em pavimentos rígidos.
- ii. Adoptar materiais de pavimentação que consideram as condições geológicas locais e resistam aos desgastes intensos e variações climáticas;
- iii. Usar directrizes do método PCA nos dimensionamentos de pavimentos rígidos, ajustado para atender as especificidades de cada projecto, garantindo assim a eficiência e durabilidade.
- iv. Adoptar estratégias de manutenção preventiva que incluam o monitoramento contínuo dos pavimentos, em particular o desenvolvimento de deformações e desgastes superficiais, para prever as necessárias intervenções.
- v. Usar, nos estudos futuros, os métodos finitos na avaliação dos pavimentos rígidos.

## Referências Bibliográficas

AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Washington DC 20001, 1993.

BALBO, José Tadeu. Pavimentos de Concreto. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BRANCO, Fernando, PEREIRA, Paulo, SANTOS, Luís Picado. Pavimentos Rodoviários. 4. Ed. Coimbra. Edições Almedina, S.A., 2011.

CEPSA. Manual de Pavimentação. Terceira Edição. Lisboa, 2010

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de pavimentos rígidos - IPR-714. Rio de Janeiro, 2005.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de pavimentação - IPR-719. Rio de Janeiro, 2006.

NIKOLAIDES, Athanassios. Highway Engineering, Pavements, Materials and Control of Quality. S/Ed. E.U.A. CRC Press, 2015.

NBR 6118 – PROJECTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO Rio de Janeiro, 2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

NBR 7480 – BARRAS E FIOS DE AÇO DESTINADOS A ARMDURAS DE CONCRETO ARMADO. Rio de Janeiro, 1996.

**Oliveira, M. F. (2000).** *Manual de Pavimentação*. 3ª edição. Rio de Janeiro, Brasil: PETROBRAS.

PCA, Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavement. Portland Cement Association (PCA). Skotie-Illinois, 1984.

NJIT, New Jersey Institute Of Technology. Appendix C: Properties of Soils. <https://www.coursehero.com/file/17837187/APPC-Soil-Properties/>. (consultada a 17/05/2024).

PCA – PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Disponível em: <https://www.cement.org/infrastructure> consultado a: 17/05/2024.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Módulo 2 – Projecto e Dimensionamento dos Pavimentos. Consultado a 22/05/2024.

CARVALHO, Marcos Dutra de. Pisos industriais de concreto. Sao Paulo: ABCP, 2009.

**Documentação fornecida:**

- Material didático da disciplina Vias de Comunicação fornecido pelo Prof. Dr. Eng. José Diogo.
- Material didático e programa de cálculo EverFE fornecido pelo Prof. Dr. Eng. José Diogo.

## **Anexos**



Tabelas adaptadas para determinação de  $k_{global}$ . [Fonte: Henrique. Disponível em: <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/Tabelas%20PCA.pdf>].

Valor de suporte do subleito		Coeficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de sub-base iguais a (cm)			
CBR(%)	k(MPa/m)	10	15	20	30
2	16	19	22	27	33
3	24	27	31	37	45
4	30	34	38	44	54
5	34	38	42	49	59
6	38	42	46	53	65
7	41	45	50	56	69
8	44	48	53	60	72
9	47	52	56	63	76
10	49	54	58	65	79
11	51	56	60	67	81
12	53	58	62	69	84
13	54	59	63	70	85
14	56	61	65	72	87
15	57	62	66	73	88
16	59	64	68	75	91
17	60	65	69	76	92
18	61	66	70	77	93
19	62	67	71	78	94
20	63	68	72	79	96

1)

Valor de suporte do subleito		Coeficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de sub-base iguais a (cm)		
CBR(%)	k(MPa/m)	10	15	20
2	16	50	66	89
3	24	69	91	122
4	30	81	108	145
5	34	90	119	160
6	38	98	130	174
7	41	103	138	185
8	44	109	146	195
9	47	115	153	205
10	49	119	158	212
11	51	122	163	218
12	53	126	168	225
13	54	128	171	229
14	56	131	176	235
15	57	133	178	239
16	59	137	183	245
17	60	139	185	248
18	61	140	188	251
19	62	142	190	255
20	63	144	192	258

2)

Valor de suporte do subleito		Coeficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de sub-base iguais a (cm)		
CBR(%)	k(MPa/m)	10	15	20
2	16	36	54	69
3	24	50	72	91
4	30	60	84	107
5	34	66	92	117
6	38	73	99	126
7	41	77	105	133
8	44	82	110	140
9	47	86	115	146
10	49	89	119	151
11	51	92	122	155
12	53	95	125	158
13	54	96	127	162
14	56	99	130	166
15	57	101	132	168
16	59	103	135	172
17	60	105	137	174
18	61	106	139	176
19	62	108	140	178
20	63	109	141	180

3)

Valor de suporte do subleito		Coeficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de sub-base iguais a (cm)		
CBR(%)	k(MPa/m)	10	12,5	20
2	16	65	77	98
3	24	87	101	126
4	30	101	118	145
5	34	111	128	158
6	38	120	138	169
7	41	127	145	177
8	44	133	152	186
9	47	140	159	194
10	49	144	164	199
11	51	148	168	204
12	53	152	173	209
13	54	154	175	211
14	56	158	179	216
15	57	160	182	219
16	59	164	186	224
17	60	166	188	226
18	61	168	190	229
19	62	170	192	231
20	63	172	194	233

4)

Tabela II Aumento de  $k$  devido a presença de sub-base: 1) granular, 2) de solo-cimento, 3) solo melhorado com cimento e 4) betão rolado (Fonte: Henrique)

Tabelas de cálculo da tensão equivalente:

**Table 6a. Equivalent Stress — No Concrete Shoulder  
(Single Axle/Tandem Axle)**

Slab thickness, in.	<i>k</i> of subgrade-subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

Tabela III Cálculo da tensão equivalente, sem bermas de betão [Fonte: PCA, (1984)]

**Table 6b. Equivalent Stress — Concrete Shoulder  
(Single Axle/Tandem Axle)**

Slab thickness, in.	<i>k</i> of subgrade-subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	640/534	559/468	517/439	489/422	452/403	409/388	383/384
4.5	547/461	479/400	444/372	421/356	390/338	355/322	333/316
5	475/404	417/349	387/323	367/308	341/290	311/274	294/267
5.5	418/360	368/309	342/285	324/271	302/254	276/238	261/231
6	372/325	327/277	304/255	289/241	270/225	247/210	234/203
6.5	334/295	294/251	274/230	260/218	243/203	223/188	212/180
7	302/270	266/230	248/210	236/198	220/184	203/170	192/162
7.5	275/250	243/211	226/193	215/182	201/168	185/155	176/148
8	252/232	222/196	207/179	197/168	185/155	170/142	162/135
8.5	232/216	205/182	191/166	182/156	170/144	157/131	150/125
9	215/202	190/171	177/155	169/146	158/134	146/122	139/116
9.5	200/190	176/160	164/146	157/137	147/126	136/114	129/108
10	186/179	164/151	153/137	146/129	137/118	127/107	121/101
10.5	174/170	154/143	144/130	137/121	128/111	119/101	113/95
11	164/161	144/135	135/123	129/115	120/105	112/95	106/90
11.5	154/153	136/128	127/117	121/109	113/100	105/90	100/85
12	145/146	128/122	120/111	114/104	107/95	99/86	95/81
12.5	137/139	121/117	113/106	108/99	101/91	94/82	90/77
13	130/133	115/112	107/101	102/95	96/86	89/78	85/73
13.5	124/127	109/107	102/97	97/91	91/83	85/74	81/70
14	118/122	104/103	97/93	93/87	87/79	81/71	77/67

Tabela IV Cálculo da tensão equivalente, no caso de existência das bermas de betão

[Fonte: PCA, (1984)]

Ábaco do método do PCA para a determinação do número de repetições admissíveis de cada Eixo para a análise a fadiga:

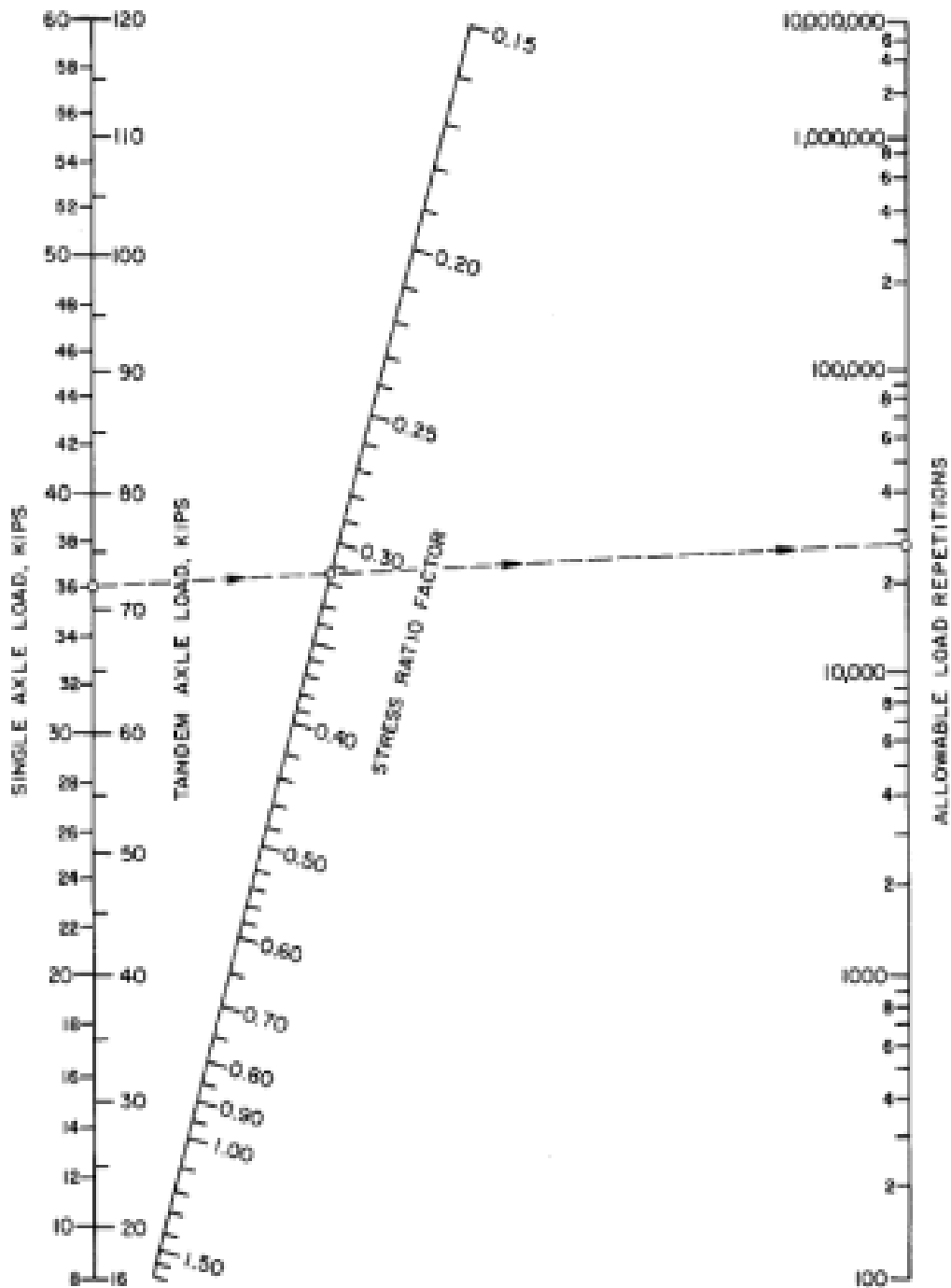


Fig. 3. Fatigue analysis—allowable load repetitions based on stress ratio factor (with and without concrete shoulder).

Figura 1 Ábaco para a determinação do número de repetições admissíveis de cada Eixo para a análise a fadiga [Fonte: PCA, (1984)]

Tabelas para cálculo de factores de erosão:

**Table 7a. Erosion Factors — Doweled Joints, No Concrete Shoulder (Single Axle/Tandem Axle)**

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

**Tabela V** Factores de erosão – juntas com barras de transferência de carga, sem berma de betão [Fonte: PCA, (1984)]

**Table 7b. Erosion Factors — Aggregate-Interlock Joints, No Concrete Shoulder (Single Axle/Tandem Axle)**

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.94/4.03	3.91/3.95	3.88/3.89	3.86/3.86	3.82/3.83	3.77/3.80
4.5	3.79/3.91	3.76/3.82	3.73/3.75	3.71/3.72	3.68/3.68	3.64/3.65
5	3.66/3.81	3.63/3.72	3.60/3.64	3.58/3.60	3.55/3.55	3.52/3.52
5.5	3.54/3.72	3.51/3.62	3.48/3.53	3.46/3.49	3.43/3.44	3.41/3.40
6	3.44/3.64	3.40/3.53	3.37/3.44	3.35/3.40	3.32/3.34	3.30/3.30
6.5	3.34/3.56	3.30/3.46	3.26/3.36	3.25/3.31	3.22/3.25	3.20/3.21
7	3.26/3.49	3.21/3.39	3.17/3.29	3.15/3.24	3.13/3.17	3.11/3.13
7.5	3.18/3.43	3.13/3.32	3.09/3.22	3.07/3.17	3.04/3.10	3.02/3.06
8	3.11/3.37	3.05/3.26	3.01/3.16	2.99/3.10	2.96/3.03	2.94/2.99
8.5	3.04/3.32	2.98/3.21	2.93/3.10	2.91/3.04	2.88/2.97	2.87/2.93
9	2.98/3.27	2.91/3.16	2.86/3.05	2.84/2.99	2.81/2.92	2.79/2.87
9.5	2.92/3.22	2.85/3.11	2.80/3.00	2.77/2.94	2.75/2.86	2.73/2.81
10	2.86/3.18	2.79/3.06	2.74/2.95	2.71/2.89	2.68/2.81	2.66/2.76
10.5	2.81/3.14	2.74/3.02	2.68/2.91	2.65/2.84	2.62/2.76	2.60/2.72
11	2.77/3.10	2.69/2.98	2.63/2.86	2.60/2.80	2.57/2.72	2.54/2.67
11.5	2.72/3.06	2.64/2.94	2.58/2.82	2.55/2.76	2.51/2.68	2.49/2.63
12	2.68/3.03	2.60/2.90	2.53/2.78	2.50/2.72	2.46/2.64	2.44/2.59
12.5	2.64/2.99	2.55/2.87	2.48/2.75	2.45/2.68	2.41/2.60	2.39/2.55
13	2.60/2.96	2.51/2.83	2.44/2.71	2.40/2.65	2.36/2.56	2.34/2.51
13.5	2.56/2.93	2.47/2.80	2.40/2.68	2.36/2.61	2.32/2.53	2.30/2.48
14	2.53/2.90	2.44/2.77	2.36/2.65	2.32/2.58	2.28/2.50	2.25/2.44

**Tabela VII** Factores de erosão – juntas com transferência de carga por entrosagem de agregados, sem berma de betão [Fonte: PCA, (1984)]

**Table 8a. Erosion Factors — Doweled Joints, Concrete Shoulder (Single Axle/Tandem Axle)**

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.28/3.30	3.24/3.20	3.21/3.13	3.19/3.10	3.15/3.09	3.12/3.08
4.5	3.13/3.19	3.09/3.08	3.06/3.00	3.04/2.96	3.01/2.93	2.98/2.91
5	3.01/3.09	2.97/2.98	2.93/2.89	2.90/2.84	2.87/2.79	2.85/2.77
5.5	2.90/3.01	2.85/2.89	2.81/2.79	2.79/2.74	2.76/2.68	2.73/2.65
6	2.79/2.93	2.75/2.82	2.70/2.71	2.68/2.65	2.65/2.58	2.62/2.54
6.5	2.70/2.86	2.65/2.75	2.61/2.63	2.58/2.57	2.55/2.50	2.52/2.45
7	2.61/2.79	2.56/2.68	2.52/2.56	2.49/2.50	2.46/2.42	2.43/2.38
7.5	2.53/2.73	2.48/2.62	2.44/2.50	2.41/2.44	2.38/2.36	2.35/2.31
8	2.46/2.68	2.41/2.56	2.36/2.44	2.33/2.38	2.30/2.30	2.27/2.24
8.5	2.39/2.62	2.34/2.51	2.29/2.39	2.26/2.32	2.22/2.24	2.20/2.18
9	2.32/2.57	2.27/2.46	2.22/2.34	2.19/2.27	2.16/2.19	2.13/2.13
9.5	2.26/2.52	2.21/2.41	2.16/2.29	2.13/2.22	2.09/2.14	2.07/2.08
10	2.20/2.47	2.15/2.36	2.10/2.25	2.07/2.18	2.03/2.09	2.01/2.03
10.5	2.15/2.43	2.09/2.32	2.04/2.20	2.01/2.14	1.97/2.05	1.95/1.99
11	2.10/2.39	2.04/2.28	1.99/2.16	1.95/2.09	1.92/2.01	1.89/1.95
11.5	2.05/2.35	1.99/2.24	1.93/2.12	1.90/2.05	1.87/1.97	1.84/1.91
12	2.00/2.31	1.94/2.20	1.88/2.09	1.85/2.02	1.82/1.93	1.79/1.87
12.5	1.95/2.27	1.89/2.16	1.84/2.05	1.81/1.98	1.77/1.89	1.74/1.84
13	1.91/2.23	1.85/2.13	1.79/2.01	1.76/1.95	1.72/1.86	1.70/1.80
13.5	1.86/2.20	1.81/2.09	1.75/1.98	1.72/1.91	1.68/1.83	1.65/1.77
14	1.82/2.17	1.76/2.06	1.71/1.95	1.67/1.88	1.64/1.80	1.61/1.74

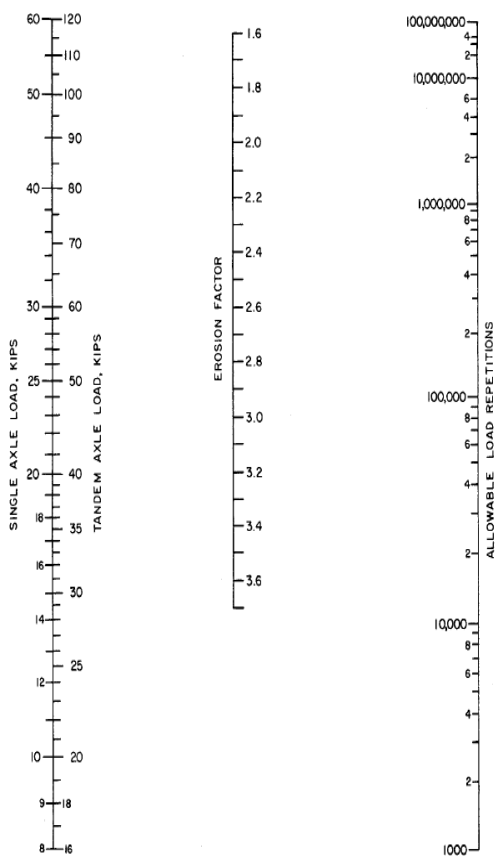
**Tabela VII** Factores de erosão – juntas com barras de transferência de carga, com berma de betão. [Fonte: PCA, (1984)]

**Table 8b. Erosion Factors — Aggregate-Interlock Joints, Concrete Shoulder (Single Axle/Tandem Axle)**

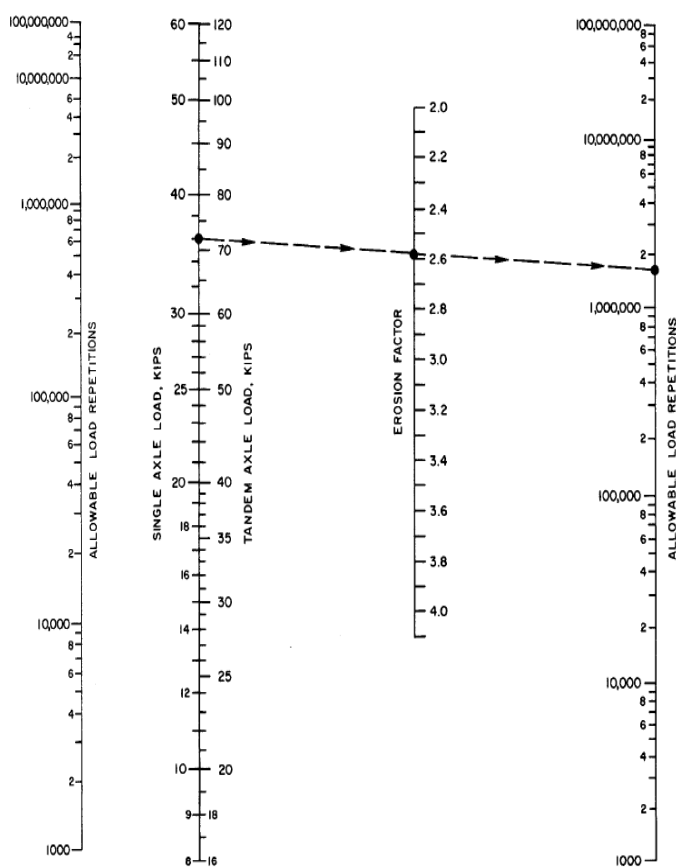
Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.46/3.49	3.42/3.39	3.38/3.32	3.36/3.29	3.32/3.26	3.28/3.24
4.5	3.32/3.39	3.28/3.28	3.24/3.19	3.22/3.16	3.19/3.12	3.15/3.09
5	3.20/3.30	3.16/3.18	3.12/3.09	3.10/3.05	3.07/3.00	3.04/2.97
5.5	3.10/3.22	3.05/3.10	3.01/3.00	2.99/2.95	2.96/2.90	2.93/2.86
6	3.00/3.15	2.95/3.02	2.90/2.92	2.88/2.87	2.86/2.81	2.83/2.77
6.5	2.91/3.08	2.86/2.96	2.81/2.85	2.79/2.79	2.76/2.73	2.74/2.68
7	2.83/3.02	2.77/2.90	2.73/2.78	2.70/2.72	2.68/2.66	2.65/2.61
7.5	2.76/2.97	2.70/2.84	2.65/2.72	2.62/2.66	2.60/2.59	2.57/2.54
8	2.69/2.92	2.63/2.79	2.57/2.67	2.55/2.61	2.52/2.53	2.50/2.48
8.5	2.63/2.88	2.56/2.74	2.51/2.62	2.48/2.55	2.45/2.48	2.43/2.43
9	2.57/2.83	2.50/2.70	2.44/2.57	2.42/2.51	2.39/2.43	2.36/2.38
9.5	2.51/2.79	2.44/2.65	2.38/2.53	2.36/2.46	2.33/2.38	2.30/2.33
10	2.46/2.75	2.39/2.61	2.33/2.49	2.30/2.42	2.27/2.34	2.24/2.28
10.5	2.41/2.72	2.33/2.58	2.27/2.45	2.24/2.38	2.21/2.30	2.19/2.24
11	2.36/2.68	2.28/2.54	2.22/2.41	2.19/2.34	2.16/2.26	2.14/2.20
11.5	2.32/2.65	2.24/2.51	2.17/2.38	2.14/2.31	2.11/2.22	2.09/2.16
12	2.28/2.62	2.19/2.48	2.13/2.34	2.10/2.27	2.06/2.19	2.04/2.13
12.5	2.24/2.59	2.15/2.45	2.09/2.31	2.05/2.24	2.02/2.15	1.99/2.10
13	2.20/2.56	2.11/2.42	2.04/2.28	2.01/2.21	1.98/2.12	1.95/2.06
13.5	2.16/2.53	2.08/2.39	2.00/2.25	1.97/2.18	1.93/2.09	1.91/2.03
14	2.13/2.51	2.04/2.36	1.97/2.23	1.93/2.15	1.89/2.06	1.87/2.00

**Tabela IX** Factores de erosão – juntas com transferência de carga por entrosagem de agregados, com berma de betão. [Fonte: PCA, (1984)]

Ábacos do método do PCA para a determinação do número de repetições admissíveis de cada Eixo para a análise à erosão (desgaste):



X) Fig. 6b. Erosion analysis—allowable load repetitions based on erosion factor (with concrete shoulder).



XI) Fig. 6a. Erosion analysis—allowable load repetitions based on erosion factor (without concrete shoulder).

**Tabela X** Ábaco para a determinação do número de repetições admissíveis de cada Eixo para a análise à erosão (desgaste), no caso da existência de bermas de betão. [Fonte: PCA, (1984)]

**Tabela XI** Ábaco para a determinação do número de repetições admissíveis de cada Eixo para a análise à erosão (desgaste), sem bermas de betão. [Fonte: PCA, (1984)]

Eixos tridem - tabelas de cálculo da tensão equivalente e factores de erosão para eixos tridem:

**Table C1. Equivalent Stress—Tridems  
(Without Concrete Shoulder/With Concrete Shoulder)**

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	510/431	459/390	437/377	429/369	419/362	414/360	413/359
4.5	436/365	390/326	369/313	349/305	339/297	331/290	329/291
5	387/317	338/281	325/266	320/259	309/259	272/244	269/242
5.5	347/279	299/246	286/231	253/223	240/214	233/208	230/206
6	315/249	269/216	257/204	223/196	209/187	198/180	193/178
6.5	289/226	239/196	214/183	201/175	189/168	173/159	169/158
7	267/204	219/178	196/166	183/158	167/149	154/142	149/138
7.5	247/187	200/162	181/151	168/143	153/136	139/127	133/124
8	230/172	189/149	168/138	156/131	141/123	126/116	120/112
8.5	215/159	177/138	156/128	145/121	131/113	116/106	109/102
9	200/147	164/126	146/119	136/112	122/105	107/98	101/94
9.5	187/137	157/120	140/111	129/105	116/99	101/91	93/87
10	174/127	148/112	132/104	122/98	108/91	93/84	87/81
10.5	163/119	140/105	125/97	115/92	102/86	89/79	82/75
11	153/111	133/99	119/92	110/87	98/81	85/74	78/71
11.5	143/104	125/93	112/86	103/82	92/76	80/70	74/67
12	133/97	119/88	106/82	100/76	89/72	77/69	70/63
12.5	123/91	110/83	100/76	93/74	82/69	70/63	63/60
13	114/86	107/79	96/74	91/70	81/66	70/60	64/57
13.5	105/80	101/75	90/70	87/67	78/62	67/57	61/54
14	97/75	95/71	85/67	83/63	75/60	65/54	59/51

**Tabela VIII XII Cálculo da tensão equivalente, sem e com bermas de betão. [Fonte: PCA, (1984)]**

**Table C2. Erosion Factors—Tridems—Doweled Joints  
(Without Concrete Shoulder/With Concrete Shoulder)**

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci						
	50	100	200	300	500	700	
4	3.89/3.33	3.82/3.20	3.75/3.13	3.70/3.10	3.61/3.05	3.53/3.00	
4.5	3.78/3.24	3.69/3.10	3.62/2.99	3.57/2.95	3.50/2.91	3.44/2.87	
5	3.68/3.16	3.56/3.01	3.50/2.89	3.46/2.83	3.40/2.79	3.34/2.75	
5.5	3.59/3.09	3.49/2.94	3.40/2.80	3.36/2.74	3.30/2.67	3.25/2.64	
6	3.51/3.03	3.40/2.87	3.31/2.73	3.26/2.66	3.21/2.58	3.16/2.54	
6.5	3.44/2.97	3.33/2.82	3.23/2.67	3.18/2.59	3.12/2.50	3.08/2.45	
7	3.37/2.92	3.26/2.76	3.16/2.61	3.10/2.53	3.04/2.43	3.00/2.37	
7.5	3.31/2.87	3.20/2.72	3.09/2.56	3.03/2.47	2.97/2.37	2.93/2.31	
8	3.26/2.83	3.14/2.67	3.03/2.51	2.97/2.42	2.90/2.32	2.86/2.25	
8.5	3.20/2.79	3.09/2.63	2.97/2.47	2.91/2.38	2.84/2.27	2.79/2.20	
9	3.15/2.75	3.04/2.59	2.92/2.43	2.86/2.34	2.78/2.23	2.73/2.15	
9.5	3.11/2.71	2.99/2.55	2.87/2.39	2.81/2.30	2.73/2.18	2.68/2.11	
10	3.06/2.67	2.94/2.51	2.83/2.35	2.76/2.26	2.68/2.15	2.63/2.07	
10.5	3.02/2.64	2.90/2.48	2.78/2.32	2.72/2.23	2.64/2.11	2.59/2.04	
11	2.98/2.60	2.86/2.45	2.74/2.29	2.68/2.20	2.59/2.08	2.54/2.00	
11.5	2.94/2.57	2.82/2.42	2.70/2.26	2.64/2.16	2.55/2.05	2.50/1.97	
12	2.91/2.54	2.79/2.39	2.67/2.23	2.60/2.13	2.51/2.02	2.46/1.94	
12.5	2.87/2.51	2.75/2.36	2.63/2.20	2.56/2.11	2.48/1.99	2.42/1.91	
13	2.84/2.48	2.72/2.33	2.60/2.17	2.53/2.08	2.44/1.96	2.39/1.88	
13.5	2.81/2.46	2.68/2.30	2.56/2.14	2.49/2.05	2.41/1.93	2.35/1.86	
14	2.78/2.43	2.65/2.28	2.53/2.12	2.46/2.03	2.38/1.91	2.32/1.83	

**Table C3. Erosion Factors—Tridems—Aggregate-Interlock Joints  
(Without Concrete Shoulder/With Concrete Shoulder)**

Slab thickness, in.	k of subgrade-subbase, pci						
	50	100	200	300	500	700	
4	4.08/3.50	3.97/3.38	3.88/3.30	3.82/3.25	3.74/3.21	3.67/3.16	
4.5	3.95/3.40	3.85/3.28	3.76/3.18	3.70/3.13	3.63/3.08	3.56/3.04	
5	3.85/3.32	3.75/3.19	3.66/3.08	3.60/3.03	3.52/2.97	3.45/2.93	
5.5	3.76/3.26	3.66/3.11	3.56/3.00	3.51/2.94	3.43/2.87	3.37/2.83	
6	3.68/3.20	3.58/3.05	3.48/2.92	3.42/2.86	3.35/2.79	3.29/2.74	
6.5	3.61/3.14	3.50/2.99	3.40/2.86	3.34/2.79	3.27/2.72	3.21/2.67	
7	3.54/3.09	3.43/2.94	3.33/2.80	3.27/2.73	3.20/2.65	3.14/2.60	
7.5	3.48/3.05	3.37/2.89	3.26/2.75	3.20/2.67	3.13/2.59	3.08/2.54	
8	3.42/3.01	3.31/2.84	3.20/2.70	3.14/2.62	3.07/2.54	3.01/2.48	
8.5	3.37/2.97	3.25/2.80	3.15/2.65	3.09/2.58	3.01/2.49	2.96/2.43	
9	3.32/2.94	3.20/2.77	3.09/2.61	3.03/2.53	2.95/2.44	2.90/2.38	
9.5	3.27/2.91	3.15/2.73	3.04/2.58	2.98/2.49	2.90/2.40	2.85/2.34	
10	3.22/2.88	3.11/2.70	3.00/2.54	2.93/2.46	2.85/2.36	2.80/2.29	
10.5	3.18/2.85	3.06/2.67	2.95/2.51	2.89/2.42	2.81/2.32	2.76/2.26	
11	3.14/2.83	3.02/2.65	2.91/2.48	2.84/2.39	2.77/2.29	2.71/2.22	
11.5	3.10/2.80	2.98/2.62	2.87/2.45	2.80/2.36	2.72/2.26	2.67/2.19	
12	3.07/2.78	2.95/2.59	2.83/2.43	2.76/2.33	2.68/2.23	2.63/2.16	
12.5	3.03/2.76	2.91/2.57	2.79/2.40	2.73/2.31	2.65/2.20	2.59/2.13	
13	3.00/2.74	2.88/2.55	2.76/2.38	2.69/2.28	2.61/2.17	2.56/2.10	
13.5	2.97/2.72	2.84/2.53	2.73/2.35	2.66/2.26	2.58/2.15	2.52/2.07	
14	2.94/2.70	2.81/2.51	2.69/2.33	2.63/2.24	2.54/2.12	2.49/2.05	

**Tabela XIII Factores de erosão para eixos tridem – juntas com barras de transferência de carga, sem e com berma de betão. [Fonte: PCA, (1984)]**

**Tabela XIV Factores de erosão para eixos tridem – juntas com transferência de carga por entrosagem de agregados, sem e com berma de betão. [Fonte: PCA, (1984)]**