

Matheus Chirolli

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO *ANDROID* PARA CÁLCULO DA ESPESSURA
DE PAVIMENTOS SIMPLES DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND PELO
MÉTODO PCA/1984**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao
Programa de graduação da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Civil

Orientadora: Prof^ª. Liseane Padilha Thives, Dr^ª.

Florianópolis

2018

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

Chirolli, Matheus
DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO ANDROID PARA
CÁLCULO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS SIMPLES DE
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND PELO MÉTODO PCA/1984 /
Matheus Chirolli ; orientadora, Lieseane Padilha
Thives, 2018.
72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Pavimentos de Concreto.
3. Aplicativo para dimensionamento. I. Thives,
Lieseane Padilha . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

MATHEUS CHIROLLI

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO *ANDROID* PARA CÁLCULO DA ESPESSURA DE
PAVIMENTOS SIMPLES DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND PELO MÉTODO
PCA/1984

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro civil e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 30 de novembro de 2018.

Prof^a. Lia Caetano Bastos, Dr^a.
Coordenadora do TCC

Banca Examinadora:



Prof^a. Liseane Padilha Thives, Dr^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng^a. Kátia Aline Bohn.

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer primeiramente aos meus pais Álvaro Luiz José Chirolli e Mariza Barpp Chirolli por sempre me apoiarem e sempre estarem ao meu lado quando precisei, com muita atenção e carinho. Agradecer a minha professora orientadora Dr^a Liseane Padilha Thives, que foi de extrema importância para a elaboração desse trabalho, sempre me auxiliando com muita didática e entusiasmo pelo assunto.

Agradecer, também, ao meu amigo de longa data Leonardo Soares que me auxiliou muito a desenvolver o aplicativo mostrado nesse trabalho, e meus amigos que me ajudaram durante toda a graduação, tanto nos momentos de estresse com provas e trabalhos tanto nos momentos de descontração: Pedro Sodré, Matheus Furtado Arceno, Francisco Dullius, Jean Patrick Wolff, Lucas Farias e Gabriel Hermes Schmitt.

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido. Não na vitória propriamente dita. ”

– Mahatma Gandhi

RESUMO

Os pavimentos rígidos constituídos de placas de concreto de cimento Portland são pouco utilizados no Brasil. Apesar do cimento Portland ser o material aglutinante mais usado nas construções civis brasileiras, apenas cerca de 4% dos pavimentos são feitos com ele. Mesmo os pavimentos rígidos apresentando algumas vantagens em relação aos pavimentos flexíveis, como custo de manutenção (aproximadamente dez vezes menor), serem construídos sobre sub-base pouco resistente, não ser suscetível à variação climática, seu emprego não é uma tradição em nosso país. Observa-se que, o custo inicial de implantação, a necessidade de mão-de-obra qualificada e o dimensionamento moroso e trabalhoso se constituem como os principais motivos do pouco uso. O dimensionamento é realizado por meio de ábacos desenvolvidos na década de 1980, com controle à fadiga e à erosão. Esse trabalho visa facilitar o dimensionamento de pavimentos simples de concreto de cimento Portland, por meio do desenvolvimento de um aplicativo de celulares do tipo *Android* com *interface* intuitiva e resultados objetivos. O Aplicativo contempla o método adotado no Brasil pelo e desenvolvido pela *Portland Cement Association* de 1984 (PCA/84). Foram introduzidas as equações utilizadas no dimensionamento, representadas pelos ábacos e junto com os tipos de eixos (simples, tandem duplo e tandem triplo) foram calculados os números de repetições admissíveis. O aplicativo foi desenvolvido com a linguagem Java com o uso do programa *Android Studio*. De modo a validar os resultados obtidos pelo aplicativo, foi realizado um estudo comparativo para uma estrutura de pavimento simples de concreto de cimento Portland, entre os valores calculados manualmente a partir do método da PCA/84 e dos valores obtidos por meio do aplicativo. Como resultado obteve-se a mesma espessura para o pavimento, com uma diferença de 11,92% no consumo da fadiga e 21,83% no consumo da erosão. O uso do aplicativo pode auxiliar em projetos preliminares, dando uma noção da espessura necessária para o pavimento considerando o tráfego previsto quando varia-se os parâmetros e também pode ser uma ferramenta útil para mostrar as variações na espessura e como os dados de entrada influenciam na mesma, principalmente para alunos da graduação.

Palavras Chave: Pavimentos de Concreto. Aplicativo. Cimento Portland

ABSTRACT

Rigid pavements built from Portland cement slabs aren't very used in Brazil. Besides the Portland cement be the most used in civil constructions, only about 4% of the pavements are done with it. Even with rigid pavements presenting vantages when compared to flexible pavements, such as, low maintenance cost (about ten times less), been built on sub-base less resistant, insusceptible to climate variations, it use is not a tradition in our country. It is observed that the initial cost of implementation, the need for skilled labor and the slow and laborious design method are the main reasons for the low usage. The sizing is performed by means of abacuses developed in the 1980s, with fatigue and erosion control. This work aims to facilitate the sizing of Portland cement concrete pavements by developing an Android-type mobile application with an intuitive *interface* and objective results. The Application contemplates the method adopted in Brazil developed by the Portland Cement Association of 1984 (PCA / 84). The equations used in the sizing, represented by the abacuses among with the axes types (single, double tandem and triple tandem) were possible to calculate the number of permissible repetitions. The application was developed with the Java language using the Android Studio program. In order to validate the results obtained by the application, a comparative study was carried out for a simple Portland cement concrete pavement structure, between the values calculated manually from the PCA / 84 method and the values obtained through the application. As a result, the same thickness was obtained for the pavement, with a difference of 11.92% in fatigue consumption and 21.83% in erosion consumption. The use of the application can assist in preliminary projects, giving a notion of the thickness required for the pavement considering the predicted traffic when the parameters are varied and can also be a useful tool to show the variations in the thickness and how the input data influence in the especially for undergraduate students.

Keywords: Concrete Pavement. Application. Portland Cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição de tensões em pavimentos rígidos e flexíveis.....	18
Figura 2 - Estrutura de pavimentos.....	19
Figura 3 - Esquema de um pavimento simples com barras de transferência	21
Figura 4 - Pavimento de concreto continuamente armado.....	22
Figura 5 - Pavimento dividido	22
Figura 6 - Fissuras transversais.....	23
Figura 7 - Fissuras de canto	23
Figura 8 - Buracos	24
Figura 9 - Barra de transferência	27
Figura 10 - Eixo simples de roda simples.....	29
Figura 11 - Eixo simples de roda dupla	29
Figura 12 - Eixo Tandem Duplo	30
Figura 13 - Eixo Tandem Triplo	30
Figura 14 - Eixo duplo especial	31
Figura 15 - Eixo duplo não em tandem	31
Figura 16 - Aumento de k devido a presença de uma sub-base granular.....	36
Figura 17 - Tensão equivalente para pavimentos sem acostamento de concreto (eixo simples/eixo duplo)	37
Figura 18 - Análise de fadiga: número admissível de repetições de carga em função do fator de fadiga (com e sem acostamento de concreto)	38
Figura 19 - Análise de erosão: número admissível de repetições de carga em função do fator de erosão (sem acostamento de concreto)	39
Figura 29 - <i>Interface</i> PCAWIN	40
Figura 30 - <i>Interface</i> SDU.Pave.R.....	41
Figura 31 - <i>Interface</i> Belgo Pavimento.....	41
Figura 32 - <i>Interface</i> principal do <i>software Pavement Designer</i>	42
Figura 33 - Inserção de dados para cálculo de pavimento simples de concreto no <i>software Pavement Design</i>	42
Figura 34 - Fluxograma de dimensionamento da PCA/84.....	43
Figura 35 - Fluxograma de análise a fadiga do algoritmo	44
Figura 36 - Fluxograma de análise a erosão do algoritmo.....	44
Figura 20 - Tensão equivalente (com acostamento) - Eixo Simples/Tandem Duplo	54
Figura 21 - Tensão equivalente Eixo Tandem Triplo - Com acostamento/Sem acostamento	54
Figura 22 - Fatores de erosão (juntas transversais com barras de transferência e com acostamento) - Eixo Simples/Tandem Duplo	55
Figura 23 - Ábaco de fadiga - Eixo Simples.....	56
Figura 24 - Ábaco de fadiga - Eixo Tandem Duplo.....	56
Figura 25 - Ábaco de fadiga - Eixo Tandem Triplo.....	57
Figura 26 - Ábaco de erosão - Eixo Simples	58
Figura 27 - Ábaco de erosão - Eixo Tandem Duplo	58
Figura 28 - Ábaco de erosão - Eixo Tandem Triplo	59
Figura 37 - Página inicial do ConcrePav	64
Figura 38 - Tela de inserção de dados do tráfego	65
Figura 39 - Tela de resultados	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tráfego no ano 1	51
Quadro 2 - Número total de repetições	52
Quadro 3 - Relação entre CBR e k.....	53
Quadro 4 - Aumento de k pelo uso de sub-base granular de 15 cm.....	53
Quadro 5 - Análises eixo simples	59
Quadro 6 - Análises eixos tandem duplos.....	60
Quadro 7 - Análises eixos tandem duplos.....	60
Quadro 8 - Resumo de resultados para placa com espessura de 24 cm	61
Quadro 9 - Comparação do método PCA com as fórmulas obtidas para análise a fadiga	62
Quadro 10 - Comparação do método PCA com as fórmulas obtidas para análise a fadiga	63
Quadro 11 - Comparação entre o aplicativo ConcrePav e o método PCA/84	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais componentes das camadas de um pavimento rígido	19
Tabela 2 - Fatores de segurança sugestivos para cada tipo de tráfego	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO – *Association of State Highway Officials*

AASHTO - *American Association of State Highways and Transportation Officials*

AC – Acostamento de Concreto

ACPA – *American Concrete Pavement Association*

BT – Barra de Transferência

CBR – *California Bearing Ratio*

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

PCA – *Portland Cement Association*

PCS – Pavimento de Concreto Simples

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.2.1	Objetivo geral.....	13
1.2.2	Objetivos específicos.....	13
1.3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	TIPOS DE PAVIMENTOS	17
2.2	APLICAÇÕES DE PAVIMENTOS RÍGIDOS	19
2.3	VANTAGENS DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS	20
2.4	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	20
2.4.1	Tipos de placas de concreto de pavimento rígido	20
2.4.2	Patologias dos revestimentos rígidos.....	22
2.4.3	Resistência à Tração na Flexão	24
2.4.4	Fadiga	24
2.4.5	Erosão	26
2.4.6	Califórnia Bearing Ratio	26
2.4.7	Juntas Transversais.....	26
2.4.8	Barras de Transferência	27
2.4.9	Transmissões de Carga	27
2.4.10	Fator de Segurança.....	28
2.4.11	Tráfego	28
2.4.12	Tipos de Eixos	29
2.5	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	31
2.5.1	Método da AASHTO	31
2.5.2	Método da <i>Portland Cement Association de 1966</i>	32
2.5.3	Método da <i>Portland Cement Association de 1984</i>	32
2.6	<i>Softwares</i> de dimensionamento	40
3	MÉTODO E MATERIAIS	43
3.1	Método.....	43
3.2	Materiais	45
4	RESULTADOS	51
4.1	Exemplo de Dimensionamento pelo método PCA 84	51
4.2	Validação das Equações	61
4.3	Aplicativo ConcrePav	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Desde 1892, quando o primeiro pavimento de concreto foi implantado nos Estados Unidos da América, a tecnologia evoluiu para atender às demandas e necessidades atuais e futuras. Os avanços são o resultado de contribuições de pesquisadores, estudiosos e organizações (indústria, setor público e academia), de modo a fornecer as melhores opções para atender a construção, reabilitação e preservação.

Isto porque, todo e qualquer investimento está diretamente relacionado a uma demanda, em qualquer área de atuação visa, principalmente, a necessidade de um cliente, no caso, o usuário. Desta forma, a preocupação de fornecer um produto que atenda com qualidade necessária todas as suas exigências é imprescindível.

Neste cenário, o pavimento de concreto evoluiu em especial no tocante aos métodos de dimensionamento e aos tipos. Quanto ao tipo, atualmente, tem-se os pavimentos de concreto simples (com e sem barras de transferência), pavimentos de concreto armados sem função estrutural, pavimentos de concreto armado e em concreto protendido.

Embora no Brasil este tipo de pavimento ocupe uma pequena parcela (em torno de 4%) da pavimentação das rodovias do país, seu crescimento é uma realidade em um futuro próximo. Em geral, no país, o mais comum é o pavimento de concreto simples.

Quando bem projetados, os pavimentos de concreto de cimento Portland apresentam elevada vida útil (são projetados para 20 anos) e alto desempenho. Isto resulta em projetos e eficazes, práticas de construção competentes e ações de manutenção oportunas. Infelizmente, os elementos críticos de uma ou mais dessas atividades são, às vezes, ignorados ou negligenciados, resultando em níveis reduzidos de desempenho e redução da vida útil dos serviços.

Relativamente ao dimensionamento, observou-se que o método utilizado é trabalhoso e moroso. Isto porque o método é baseado em tabelas e ábacos, o que atualmente, com o advento de computadores, necessita ser modernizado. Na literatura existem alguns *softwares* (PCAWIN, SDU.Pave.R, Belgo) para o dimensionamento de pavimentos rígidos, porém, em sua maioria, não são distribuídos gratuitamente e não são amigáveis do ponto de vista de uso, além de apresentarem algumas diferenças em relação ao preconizado nas normativas brasileiras.

Neste contexto, este trabalho objetiva o desenvolvimento de aplicativo *Android* para cálculo da espessura de pavimentos rígidos de concreto simples, de acordo com o estabelecido pelo método da *Portland Cement Association* (PCA) de 1984.

1.1 JUSTIFICATIVA

Na atual situação do mercado, qualquer empresa que queira se manter competitiva deve buscar eliminar todos os desperdícios (conceito de produção enxuta) existentes no seu sistema. Desta forma, o cálculo errôneo de um pavimento pode gerar um custo muito mais elevado que o necessário se for superdimensionado, ou pode não atender as exigências da rodovia se subdimensionado.

Os pavimentos de concreto de cimento Portland ou pavimentos rígidos apresentam um ótimo desempenho em locais com alto tráfego de veículos pesados, onde pode haver derramamento de óleos e derivados do petróleo, em pátios de portos, corredores de ônibus e rodovias com elevada quantidade de curvas em terreno montanhoso. Comparativamente aos pavimentos flexíveis, apresentam uma vida útil duas vezes superior, uma vez que são dimensionados para um período de projeto de vinte anos. Porém, para o melhor uso do pavimento este deve ser dimensionado corretamente. A aplicação correta do método de dimensionamento, visa contribuir para a minimização de defeitos precoces e na confiabilidade dos cálculos, o que é de fundamental importância.

Os motivos para o desenvolvimento deste trabalho foram: contribuir a difusão da aplicação de pavimentos de concreto e facilitar a aplicação do método utilizado no Brasil para o dimensionamento. Além disso, o uso de programas computacionais simples resulta em redução de custos que anteriormente seriam destinados ao reparo das obras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um aplicativo para celulares com sistema *Android* para o cálculo da espessura do revestimento de pavimentos rígidos de concreto de cimento Portland simples.

1.2.2 Objetivos específicos

De modo a alcançar o objetivo geral, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma maneira mais rápida e fácil para o cálculo de revestimentos de pavimentos de concreto de cimento Portland simples;
- Contribuir na redução de possíveis erros provenientes de falhas humanas durante a fase de dimensionamento do pavimento;
- Minimizar as possíveis patologias encontradas em revestimentos rígidos por causa de sub-dimensionamento;

- Colaborar para a disseminação no país do uso deste tipo de pavimento por meio de um aplicativo, para que torne o uso atrativo;
- Servir de exemplo para que possam ser desenvolvidos outros programas para os demais tipos de pavimentos de concreto.

1.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A partir de um *software* computacional denominado *Android Studio* foi criado uma *interface* para o aplicativo, onde será possível a introdução dos dados iniciais para o dimensionamento do revestimento, como: a resistência do concreto utilizado à tração, o índice de resistência (*California Bearing Ratio* – CBR ou Índice de Suporte Califórnia – ISC) do solo onde será executado o pavimento. Ainda, qual o tipo de sub-base escolhida e sua respectiva espessura, a presença ou não de barras de transferência e o uso ou não de acostamento de concreto, além dos dados de tráfego e o crescimento do tráfego previsto para a região.

No mesmo *software* será feito o algoritmo que calculará a espessura do pavimento. O cálculo se baseou em equações básicas do método apresentadas por Lee e Carpenter (2001) no artigo “*PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design*”. As equações foram obtidas a partir da regressão dos dados apresentados pelas tabelas e ábacos da *Portland Cement Association* para obter o número de repetições admissíveis, a partir do tipo de eixo dos veículos, das cargas, da espessura adotada do pavimento e do tipo e espessura de sub-base escolhida. O método para o cálculo do pavimento se baseia no controle a fadiga e a erosão para um determinado tráfego e vida de projeto.

Por fim, o aplicativo desenvolvido apresenta uma tela de resultados onde com a presença de um esquema com a respectiva espessura do pavimento calculado, bem como com a espessura e o tipo de sub-base utilizado para o dimensionamento.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente documento é composto por cinco capítulos, como apresentado a seguir.

O primeiro capítulo, Introdução, apresenta uma breve introdução ao tema, a justificativa, os objetivos e um breve resumo do procedimento metodológico.

O Capítulo 2, referente à Revisão Bibliográfica, trata de assuntos necessários para uma melhor compreensão do trabalho elaborado e que serviram de base para elaboração do método de trabalho. Neste Capítulo são explicados os conceitos fundamentais, definições importantes,

diferenças entre os tipos de revestimento e os métodos utilizados para o dimensionamento de pavimentos rígidos de concreto simples.

No Capítulo 3, Materiais e Método, está apresentado o procedimento para a criação do aplicativo para celulares com sistema operacional *Android* para o dimensionamento do revestimento de concreto simples a partir do método da *Portland Cement Association* de 1984.

No Capítulo 4, Resultados, o programa desenvolvido é apresentado e será discutido se o aplicativo criado calcula de maneira correta e possíveis melhoras no algoritmo.

O Capítulo 5, denominado Considerações Finais e Recomendações, aborda os resultados alcançados em relação aos objetivos propostos, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as Referências que serviram de base para elaboração deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

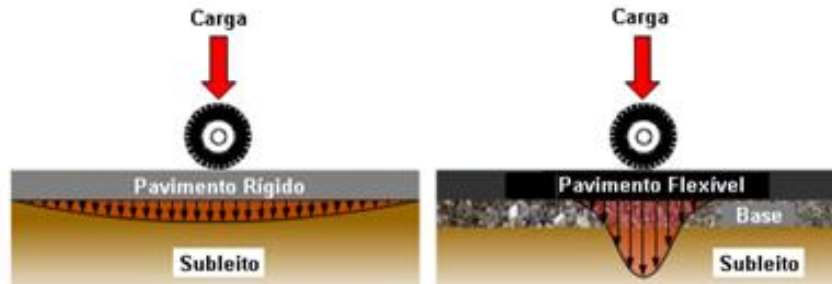
Um pavimento é a estrutura que é construída sobre um terreno de fundação (subleito), que deve resistir à ação das cargas de roda dos veículos que trafegam na rodovia e às ações do tempo (higrométrica e variação de temperatura). O pavimento é composto por várias camadas, com finalidades específicas. Em geral, essa estrutura é composta pelas seguintes camadas: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento (SILVA, 2008).

Senço (1997) define pavimento como uma estrutura sobre a terraplenagem e destinada técnica e economicamente a: resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento; resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los e melhorar as condições de rolamento quanto a segurança e ao conforto. Sendo um sistema de várias camadas de espessuras que se assenta sobre um semi-espaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito.

Historicamente os pavimentos têm sido divididos em dois tipos principais, sendo os flexíveis, rígidos e uma mescla entre os dois, que são os semi-rígidos. Os pavimentos flexíveis consistem de uma camada relativamente pequena superfície construída sobre camadas de base e sub-base, e estão dispostas sobre uma camada de subleito compactado. Por outro lado, pavimentos rígidos têm o revestimento em concreto de cimento Portland e podem ou não ter uma camada de sub-base entre o revestimento e o subleito (YODER e WITCZAK, 1975).

A principal diferença entre esses dois tipos de pavimentos, reside na maneira em que as cargas são distribuídas sobre o subleito. Os pavimentos rígidos, devido sua rigidez e elevado módulo de elasticidade, tende a distribuir a carga sobre uma área relativamente grande do solo, desta forma, uma grande porção da capacidade da estrutura é suportada pela placa de concreto. O principal fator a ser considerado em pavimentos rígidos é a resistência do concreto. Por essa razão, pequenas variações na resistência da sub-base têm pequena influência na capacidade estrutural do pavimento. (YODER e WITCZAK, 1975). A Figura 1 mostra a distribuição de tensões em pavimentos rígidos e flexíveis.

Figura 1- Distribuição de tensões em pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: ARAÚJO (2016)

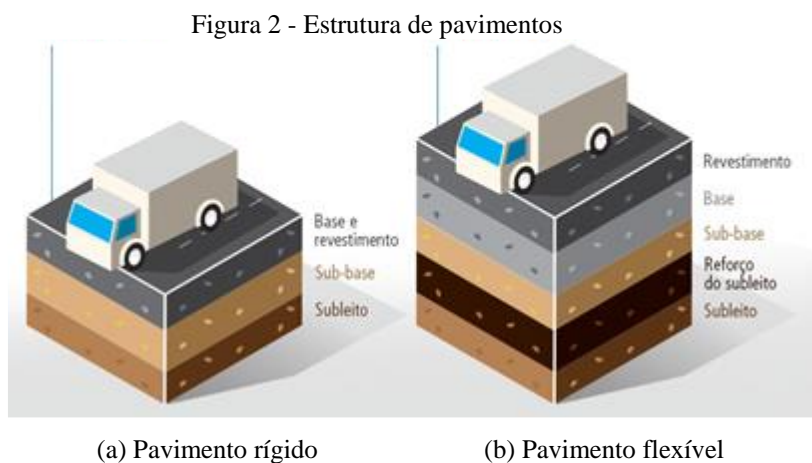
Em geral, as camadas de um pavimento são assim definidas (SENÇO, 1997; DNIT, 2004):

- Subleito - terreno de fundação do pavimento, se a terraplanagem é recente, o subleito deverá apresentar características geométricas definitivas. Apenas a camada mais próxima da superfície (60 cm) é considerada subleito, já que, à medida que se aprofunda do maciço, às pressões exercidas são reduzidas a ponto de serem consideradas desprezíveis;
- Sub-base – é uma camada com as funções de: evitar os efeitos das mudanças excessivas dos solos do subleito, uniformizar e tornar razoavelmente constante o suporte disponível ao longo da faixa do pavimento e eliminar o bombeamento de finos plásticos quando há a presença de cargas pesadas e água em excesso. A atual prática no projeto de pavimentos rígidos é o uso de uma sub-base entre a camada de revestimento e o subleito;
- Base - é a camada destinada a resistir aos esforços verticais que provêm do tráfego e distribuí-los. O pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base pode ou não ser complementada por uma sub-base e pelo reforço do subleito;
- Revestimento - é a camada, impermeável o tanto quanto possível que recebe diretamente a ação do tráfego e destinada a aumentar a qualidade da superfície de rolamento quando às condições de segurança e conforto, além de resistir ao desgaste, aumentando a durabilidade da estrutura.

Sendo o revestimento a principal camada do pavimento, a adoção da espessura não pode servir como medida que venha a reduzir sua resistência, já que representa uma parte do pavimento constituída de melhor material para garantir a eficiência no seu comportamento. A presença das camadas de reforço do subleito, de sub-base, e base depende do tipo de pavimento e do dimensionamento estrutural (DNIT, 2004).

Os pavimentos flexíveis podem não apresentar as camadas de reforço do subleito e sub-base. Por outro lado, os pavimentos rígidos não apresentam a camada de base. A Figura 2 ilustra

os principais tipos de pavimentos e suas camadas. Este trabalho tem foco no estudo de pavimentos rígidos. Assim, a esse tipo de pavimento a revisão de literatura está direcionada.



Fonte: VOTORANTIM (2016)

Baptista (1976) define pavimentos rígidos como aqueles em que o ligante é constituído de cimento, e sua espessura é função da resistência á flexão das placas. As placas de concreto desempenham a função de base e revestimento ao mesmo tempo. A Tabela 1 mostra os tipos de materiais, em geral, utilizados em camadas de pavimentos rígidos.

Tabela 1 - Materiais componentes das camadas de um pavimento rígido

Camadas	Materiais
Revestimento	Placas de concreto de cimento Portland, armadas ou não, com barras de ligação ou não, com armadura distribuída, em concreto protendido.
Sub-base	Material Granular, solo-cimento, solo melhorado com cimento, concreto rolado.
Reforço do subleito	Solo com capacidade de suporte superior ao do subleito, bica corrida.

Fonte: DNIT (2006)

2.2 APLICAÇÕES DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

A competitividade do pavimento de concreto, de modo geral, se da em rodovias com grande volume de tráfego, vias utilizadas por veículos pesados e locais sujeitos a um derramamento de óleos e combustíveis de forma constante (LOTURCO, 2005).

O Brasil foi um dos primeiros países a utilizar pavimentos de concreto no início do século XX. Seu uso foi intenso até a década de 1970, entretanto, devido a problemas de conjuntura financeira e econômica seu uso foi diminuindo (VOTORANTIM, 2016).

Na década de 1990, pavimentos de concreto voltaram a ser utilizados já que garantem economia e durabilidade ás gestões públicas. Nos últimos anos, foram adotadas técnicas

modernas de execução do pavimento, garantindo excelência no conforto de rolamento, como é visto em outros países (VOTORANTIM, 2016).

Pavimentos rígidos estão presentes nos principais corredores de ônibus de São Paulo, Porto Alegre, Curitiba e Belo Horizonte, também faz parte da história da orla e das avenidas da praia de Boa Viagem, no Recife, está na Linha Verde, de Curitiba e está presente em grandes obras como o Rodoanel Mario Covas, em São Paulo e a BR101-NE (VOTORANTIM, 2016).

2.3 VANTAGENS DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

Segundo Tinni (2013) algumas vantagens dos pavimentos de concreto quando comparado com os pavimentos flexíveis são: maior durabilidade; custo de manutenção aproximadamente 10 vezes menor; podem ser construídos sobre sub-base pouco resistente; manutenção baixa gerando menos congestionamento e interrupção de tráfego quando necessária a manutenção; não suscetível á altas ou baixas temperaturas, não é afetado pelo clima, inerte quando a derramamentos e fogo; alta durabilidade a abrasão; economia de combustível de pelo menos 1,1%, menos necessidade de iluminação das rodovias (até 30%).

2.4 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Yoder e Witczak (1975) afirmam que o ramo de projeto de pavimentos é dinâmico nos seus conceitos e continuamente mudando no passo que novos dados se tornam disponíveis. Há vários métodos de projeto disponíveis, já que opiniões sobre a adequação dos processos variam de lugar para lugar. Em particular materiais disponíveis para construção de pavimentos têm uma grande influência no projeto. Existem, entretanto, princípios do projeto que são comuns a todos os problemas. O projeto de pavimentos em aeroportos e estradas envolve um estudo do solo e dos materiais de pavimentação, seus comportamentos quando submetidos a cargas, e o projeto de um pavimento para resistir esse carregamento sobre todas as condições climáticas.

Senço (1997) complementa que o dimensionamento de um pavimento consiste na determinação das camadas, sendo que essas camadas suficientes para resistir, transmitir e distribuir as pressões resultantes do tráfego ao subleito, sem que o conjunto sofra deformações apreciáveis, desgaste superficial excessivo ou ruptura.

2.4.1 Tipos de placas de concreto de pavimento rígido

Os revestimentos dos pavimentos rígidos podem se apresentar como: *Whitetopping*, concreto simples, concreto simples com juntas e barras de transferência de esforços, concreto

armado com juntas e barras de transferência de esforços, continuamente armados e de concreto protendido.

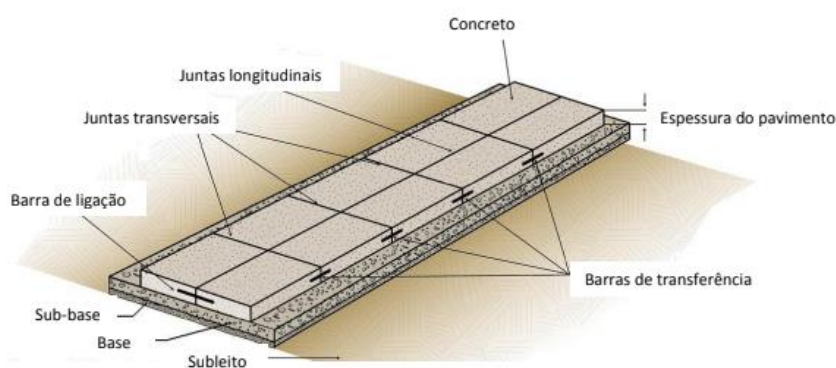
Os pavimentos do tipo *Whitetopping* se caracterizam por apresentarem uma camada rígida de reforço para reabilitação de pavimentos asfálticos, executadas com o uso de cimento do tipo Portland. O pavimento antigo, além de ter sanado suas deficiências, tem o desempenho de um pavimento rígido novo, com suas vantagens associadas a esse tipo de revestimento (DNIT, 2004).

Suh *et. al.* (2008) definem o pavimento *Whitetopping* como sendo um sistema de pavimentação de concreto de cimento Portland colocado em cima de uma mistura de um pavimento de concreto asfáltico aquecido.

Pavimentos de concreto simples são aqueles que não apresentam nenhuma armadura na sua estrutura, tampouco barras de transferência de carga. A transferência de carga é feita pela interligação dos agregados presentes no concreto, que acontece abaixo da do corte realizado para formação das placas. Para o adequado funcionamento desse tipo de revestimento é necessário que haja placas de tamanhos inferiores as demais (aproximadamente 4,6 metros). Essa categoria de pavimento encontra-se em desuso devido à melhor eficiência dos outros tipos de pavimentos rígidos (BRITO e GRAEFF, 2009).

Pavimentos de concreto simples com barras de transferência é um tipo de pavimento que não possuem armaduras nas placas e a transferência de esforços é feitas através de barras de aço. A Figura 3 mostra os principais componentes desse tipo de pavimento (BRITO e GRAEFF, 2009).

Figura 3 - Esquema de um pavimento simples com barras de transferência



Fonte: BRITO E GAEFF (2009)

Pavimentos de concreto armado são aqueles que possuem armadura para suportar as tensões provadas pelo tráfego, usualmente disposta na parte inferior da placa e outra armadura responsável por combater os esforços de empenamento e retração, disposta na parte superior da

placa (DNIT, 2004). A Figura 4 apresenta a disposição da armadura de um pavimento continuamente armado.

Figura 4 - Pavimento de concreto continuamente armado



Fonte: BRITO E GAEFF (2009)

Os pavimentos de concreto protendido possuem uma armadura de concreto com pretensão. De forma geral, exigem mão-de-obra especializada e de alta qualificação, por essa razão são pouquíssimos utilizados (BRITO e GRAEFF, 2009).

2.4.2 Patologias dos revestimentos rígidos

Segundo o Manual de recuperação de pavimentos rígidos (DNIT, 2010) as patologias que estão vinculadas ao subdimensionamento da espessura de um pavimento rígido são:

- a) Placa dividida: consiste na divisão de uma placa em quatro ou mais partes, decorrente de fissuras que ocorrem nessas placas nos diversos sentidos como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Pavimento dividido



Fonte: DNIT (2010)

- b) Fissuras transversais: fissuras com o sentido transversal da placa e são provocadas pela retração hidráulica ou pela perda de água como ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Fissuras transversais



Fonte: DNIT (2010)

- c) Fissuras de canto: a causa dessa fissura se deve a retração plástica, estas fissuras tendem a apresentar uma grande abertura, podendo ultrapassar 0,5 mm como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Fissuras de canto



Fonte: DNIT (2010)

- d) Buracos: reentrâncias côncavas observadas na superfície da placa oriundo da progressão de outros defeitos.

Figura 8 - Buracos



Fonte: DNIT (2010)

2.4.3 Resistência à Tração na Flexão

Balbo (2009) afirma que as medidas de resistência à tração são indispensáveis para as placas de concreto não armado, inclusive aquelas que eventualmente possam possuir armadura de topo para controle da retração. Nesses sistemas o concreto é responsável pelo combate aos esforços de tração impostos ou cargas dinâmicas e estáticas de veículos e cargas ambientais.

O valor da resistência característica a tração na flexão ($f_{ct,f}$) é geralmente estabelecido na fase de dimensionamento da estrutura do pavimento, sendo necessária a dosagem da mistura em fase preliminar à obra. A resistência a tração na flexão é parâmetro essencial para estudos de resistência a fadiga do concreto, bem como para seu dimensionamento. No Brasil, as medidas de resistência a tração na flexão são obtidas através do ensaio de dois cutelos, impondo-se no vão central do corpo de prova um momento fletor constante, por convenção os corpos de provas são moldados nas dimensões $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}^3$. (BALBO, 2009). Pode-se também fazer uma aproximação do resultado do valor da resistência à tração na flexão adotando 10% do valor da resistência a compressão do concreto.

2.4.4 Fadiga

A passagem de um veículo pesado não necessariamente implica na ruptura ou danos em um pavimento. A repetição de passagens de veículos pode levar, a partir de um certo número, àquele dano ou rompimento por fadiga (SENÇO, 1997).

Balbo (2009) assevera que a modelagem de concretos à fadiga passou a ser considerado na década de 1930, nos pavimentos de concreto em placas. Entretanto, devido a inúmeras limitações dos conceitos atuais e dos meios de modelagem desse fenômeno para a engenharia, é importante uma reflexão mais elaborada sobre a resistência à fadiga e os modelos experimentais e empíricos existentes para sua consideração no dimensionamento de pavimentos de concreto. O autor ainda faz outras considerações são feitas a seguir em relação à fadiga de um PCS.

A ruptura por fadiga acontece devido a um processo de microfissuração progressiva da estrutura de um material, que degrada aos poucos sua microestrutura amorfa ou cristalina, chegando no ponto da fratura da peça estrutural, sendo evidenciada por uma ou mais superfícies de ruptura. Esse fenômeno ocorre em condições de tensões ou deformações com valores inferiores à tensão ou deformação de ruptura.

Para o dimensionamento estrutural de um pavimento de concreto simples (PCS), a confrontação entre as resistências do concreto e as tensões solicitantes é acrescida a relação entre a ocorrência de uma superfície de fratura do material e o número de ciclos de carga impostos, na maioria dos critérios de projeto. É adotado um tratamento da degradação do pavimento sob uma matriz estrutural, e as tensões solicitantes são aquelas de tração na flexão.

Muitos aspectos contribuem para o comportamento à fadiga no concreto, dentre eles, destacam-se a própria heterogeneidade do material, magnitude e frequência dos carregamentos, efeitos ambientais como umidade e temperatura, e tempo de relaxação entre cargas consecutivas (BALBO, 2009).

O método de dimensionamento de pavimentos de concreto, da PCA de 1984 considera as Equações 1, 2 e 3 para o número de repetições admissíveis, considerando a tensão aplicada no concreto e a resistência a tração do mesmo.

Para $\frac{\sigma_{eq}}{S_c} \geq 0,55$ utiliza-se a Equação 1:

$$\log N_f = 11,737 - 12,077 * \left(\frac{\sigma_{eq}}{S_c} \right) \quad (1)$$

Para $0,45 < \frac{\sigma_{eq}}{S_c} < 0,55$ utiliza-se a Equação 2:

$$N_f = \left(\frac{4,2577}{\frac{\sigma_{eq}}{S_c} - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (2)$$

Para $\frac{\sigma_{eq}}{S_c} < 0,45$ utiliza-se a Equação 3:

$$N_f = \text{Ilimitado} \quad (3)$$

Onde: σ_{eq} é a tensão equivalente em psi

S_c é a resistência do concreto na flexão em psi

N_f é o número de repetições admissíveis para fadiga

2.4.5 Erosão

Erosão é a perda de material do topo da camada imediatamente inferior a placa de concreto, devido a ação da água e da passagem de cargas pesadas, especialmente as de eixos múltiplos, ocorrendo também nas laterais do pavimento e não apenas nas juntas transversais. (PITTA, 1998)

As consequências da erosão se manifestam na forma de deformações verticais críticas, especialmente nas bordas e nos cantos longitudinais livres das placas e provocam degraus nas juntas transversais, podendo dar-se ambas pelo efeito de um bombeamento, contato entre a placa e a fundação ou formações de vazios sob a placa e perda de suporte (PITTA, 1998).

2.4.6 Califórnia Bearing Ratio

O índice de Suporte Califórnia (CBR – *California Bearing Ratio*) é uma das características mais aceitas para se avaliar o comportamento de um solo, tanto para componente das camadas de um pavimento ou para a fundação de um pavimento. O CBR pode ser definido como sendo a relação percentual entre a pressão necessária para que se penetre, de maneira padronizada, um pistão numa amostra de solo convenientemente preparada e a pressão para fazer penetrar o mesmo pistão, na mesma profundidade, numa amostra padronizada de pedra britada, ou outro material equivalente, com uma pressão de 1000 psi para a penetração de 0,1 polegadas ou 1500 psi para 0,2 polegadas (SENÇO, 1997). Este índice é utilizado para avaliar a capacidade de suporte do solo de fundação nos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, rígidos e semirrígidos.

2.4.7 Juntas Transversais

O principal motivo para a serragem das juntas igualmente espaçadas é o controle da retração hidráulica na massa fresca de concreto, de grande volume e área, exposta às condições ambientais mais desfavoráveis possíveis (ventos, sol, chuva), quando comparado com as condições de cura de estruturas de concreto convencional. Desta forma, tal corte induz a fissuração por retração hidráulica da massa fresca de concreto de cimento Portland exatamente nessa junta, podemos dizer “enfraquecida”. Tais conformações delimitam as placas de concreto,

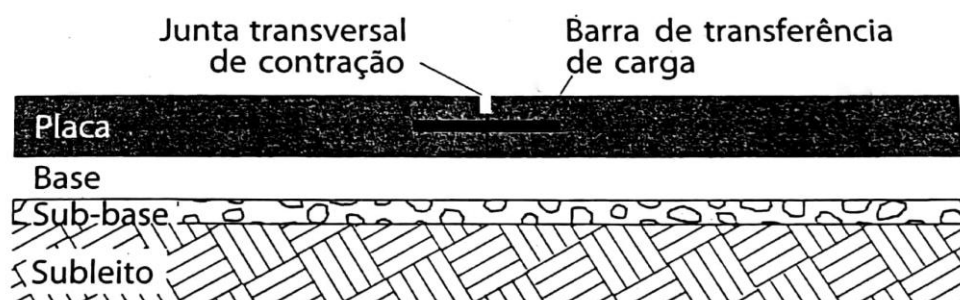
e a estrutura do pavimento estará condicionada a essas condições geométricas para apresentar suas reações às cargas aplicadas pelo tráfego. (BALBO, 2009)

2.4.8 Barras de Transferência

O aço utilizado nos PCS é para a colocação das chamadas barras de transferência de carga, posicionado exatamente nas juntas transversais, de tal maneira que as cargas aplicadas sobre a carga, nas proximidades da junta transversal, têm seus efeitos diminuídos, que deslocam parte dos esforços para a placa subsequente. (BALBO, 2009)

As barras de transferência de carga (BT) recebem esse nome pela ação que exercem nas juntas transversais (ou longitudinais) quando á a aproximação das cargas dos veículos. Além disso, as barras de transferência criam uma ancoragem entre as placas que atuam em favor do combate solidário de efeitos de empenamento das placas de concreto. A figura X mostra um corte mostrando a barra de transferência (BALBO, 2009).

Figura 9 - Barra de transferência



Fonte: Balbo (2009)

A ausência de BT é um fator importantíssimo do ponto de vista do fundamento do cálculo estrutural do PCS, no não uso de BT a junta serrada deverá fazer ponte de distribuição de esforços entre placas com interfaceamento de agregados na face vertical fissurada (BALBO, 2009).

2.4.9 Transmissões de Carga

As cargas que atuam no pavimento são transmitidas através das rodas pneumáticas dos veículos. A área de contato entre o pavimento e os pneus tem uma forma que se aproxima a

uma elipse, e a pressão aplicada, devido a relativa rigidez dos pneus, tem uma distribuição quase parabólica, com a máxima pressão exercida no centro da área carregada (SENÇO, 1997).

2.4.10 Fator de Segurança

Fatores de segurança relacionados à carga dos eixos foram definidos com base em estudos e análises de resultados das observações das pistas experimentais de BATES em 1924, MARYLAND em 1952 e AASHO (atual AASHTO) em 1962, além de milhares de quilômetros de estradas em serviço (DNIT, 2004).

Tabela 2 - Fatores de segurança sugestivos para cada tipo de tráfego

Tipo de Pavimento	FSC
Estradas rurais, ruas residenciais e vias em geral, submetida a tráfego leve de caminhões.	1,0
Rodovias e vias urbanas, submetidas a tráfego de caminhões pesados.	1,1
Autoestradas, rodovias com mais de duas faixas por pista, ou em qualquer projeto para tráfego ininterrupto ou de grande volume de caminhões pesados.	1,2
Pavimentos que necessitam de um desempenho acima do normal.	Até 1,5

Fonte: DNIT (2004)

2.4.11 Tráfego

Define-se volume de tráfego como sendo o número de veículos que passam por uma determinada faixa ou por uma seção de uma via, durante uma unidade de tempo. Usualmente é expresso em veículos por dia ou veículos por hora (DNIT, 2006).

No método da PCA/84 para pavimentos rígidos, o tráfego é considerado em função dos efeitos das cargas por eixo na intensidade das tensões de tração na flexão e, desta forma, nas relações entre o módulo de ruptura do concreto e as tensões (SENÇO, 1997).

Para o cálculo do tráfego total durante o período de projeto, é preciso determinar uma taxa de crescimento, geralmente anual, tendo como base o crescimento histórico, podendo ou não ser corrigido por outros fatores. É possível, ainda, considerando uma capacidade prática para as faixas de tráfego da via, calcular a capacidade prática para toda a via tendo em termos o volume médio diário e extrapolar esse valor para um ano e, com a taxa de crescimento, para todo o tempo de projeto (SENÇO, 1997).

O conhecimento da natureza dos veículos em circulação é importante para o dimensionamento do pavimento das vias em fase de projeto, determinação da capacidade e

níveis de serviço, definição dos veículos tipo a serem considerados na determinação das características geométricas, bem como no estabelecimento e classificação adequada da composição do tráfego (DNIT, 2006).

2.4.12 Tipos de Eixos

Os eixos são classificados da forma que segue (AKISHINO, 2015):

- a) Eixo simples: conjunto de duas ou mais rodas, cujos centros podem ser incluídos entre dois planos transversais distantes de 100 cm ou estão em um plano transversal vertical, que se estendem por toda a largura do veículo. Podem ser de dois tipos:

De rodas simples: 2 rodas, uma em cada extremidade, a Figura 10 ilustra um eixo de rodas simples.

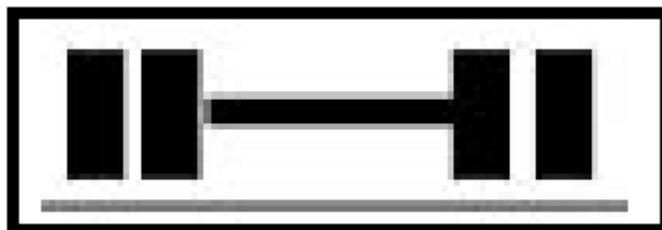
Figura 10 - Eixo simples de roda simples



Fonte: AKISHINO (2015)

De rodas duplas: 4 rodas, 2 em cada extremidade, a Figura 11 mostra um eixo simples de roda dupla.

Figura 11 - Eixo simples de roda dupla



Fonte: AKISHINO (2015)

- b) Eixos Tandem: dois ou mais eixos consecutivos, cujos centros estão distantes entre 100 e 200cm, e ligados a um dispositivo de suspensão que distribui a carga igualmente entre os eixos. O conjunto desses eixos constitui um Eixo Tandem. Podem ser:

Tandem Duplo: 2 eixos com 2 rodas em cada extremidade, a Figura 12 demonstra um Eixo Tandem Duplo.

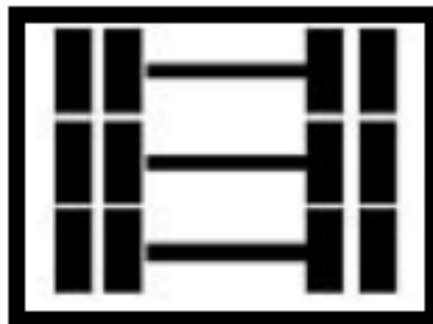
Figura 12 - Eixo Tandem Duplo



Fonte: AKISHINO (2015)

Tandem Triplo: 3 eixos, com 2 rodas em cada extremidade, a Figura 13 demonstra um Eixo Tandem Triplo.

Figura 13 - Eixo Tandem Triplo

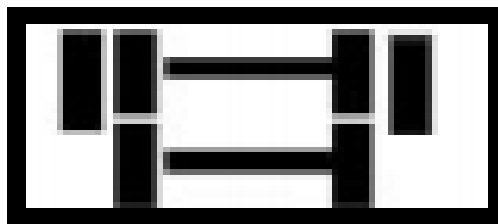


Fonte: AKISHINO (2015)

- c) Demais eixos:

Eixo duplo especial: conjunto de 2 eixos, sendo um com roda simples e um com roda dupla (típico dos TRIBUS), a Figura 14 ilustra um eixo duplo especial.

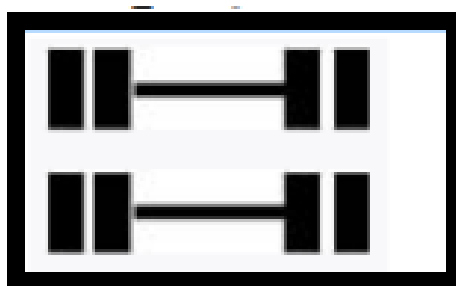
Figura 14 - Eixo duplo especial



Fonte: AKISHINO (2015)

Eixo duplo não em tandem: 2 eixos, com 2 rodas em cada extremidade, porém o espaçamento entre eixos é maior que 2 metros, a Figura 15 mostra um eixo duplo não em tandem.

Figura 15 - Eixo duplo não em tandem



Fonte: AKISHINO (2015)

2.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

2.5.1 Método da AASHTO

O método da *American Association of State Highway Officials* (AASHO) foi desenvolvido na década de 1990. Trata-se de um método simples, com base no uso de ábacos. Os ábacos foram montados a partir dos resultados da pista de teste da *AASHO Road Test*, aplicado a pavimentos rígidos.

Os resultados obtidos nos levantamentos de qualidade e deterioração dos pavimentos, ao longo de dois anos, permitiram que se fosse equacionado o problema de maneira que, sendo admitido um estado de qualidade inicial e um estado final para um determinado período de projeto, fosse possível verificar as espessuras e qualidade das camadas do pavimento (SENÇO, 1997). Atualmente, este órgão é denominado de *American Association of State Highways and Transportation Officials* (AASHTO).

2.5.2 Método da *Portland Cement Association de 1966*

Na década de 1960, a *Portland Cement Association* (PCA) apresentou um método de projeto para pavimentos de concreto simples (PCS) que se tornou bastante utilizado no Brasil. A questão básica de um critério melhorado era a consideração de eixos simples de rodas duplas e eixos tandem duplo do tráfego rodoviário, além da incorporação de um novo critério de fadiga, de uma natureza experimental, desenvolvido naquela época. A PCA deixou de utilizar os chamados “fatores de impacto”, reconhecendo que as cargas dinâmicas tinham menor poder de dano que as cargas estáticas. Entretanto o método não considerava ainda as barras de transferência no modelo analítico, projetando a tensão crítica próxima ao centro da borda transversal, sendo que com barras de transferência (BT), esta ocorreria próxima da borda longitudinal (BALBO, 2009).

O método propõe ábacos para o cálculo de tensões que foram desenvolvidos após manipulação computacional. Na época dois tipos de eixos rodoviários foram considerados: eixos tandem duplos (dois eixos simples de rodagem dupla) e eixos simples (de rodagem dupla) e o valor de 28.000 MPa foi estabelecido para o módulo de elasticidade do concreto (BALBO, 2009).

O dimensionamento é realizado se admitindo que o fenômeno de fadiga é linear, sendo calculado o consumo de resistência à fadiga de cada carga por tipo de eixo, ditado pela relação entre o número de repetições de cargas prevista para aquela carga e tipo de eixo, e o número de repetições admissíveis a fadiga. Nesse procedimento de cálculo todo o tráfego solicitante entra no cômputo de tensões e de fadiga do concreto, e a espessura do pavimento deve ser tal que todos os veículos previstos no horizonte de projeto sejam acolhidos (BALBO, 2009).

2.5.3 Método da *Portland Cement Association de 1984*

O método da *Portland Cement Association* de 1966 foi aperfeiçoado e em 1984 um novo método foi publicado, denominado de PCA/84. Esse método introduziu conhecimentos e processos obtidos nos dois últimos decênios nas áreas de cálculo de tensões, construção e gerência desse tipo de pavimento, projeto geométrico, acrescentando novos enfoques e modificando profundamente o método adotado desde 1966 (DNIT, 2004).

O dimensionamento das placas de concreto de um pavimento rígido é baseado no consumo de resistência à fadiga, porém na versão de 1984 da PCA é baseado também no nos danos causado por erosão, de modo que essas duas condições atinjam um valor máximo de 100%, ou um valor próximo. Existem tabelas próprias, para cargas por eixo, já com um fator

de segurança de carga de 1,2, para casos de pavimentos com juntas com barras de transferência ou não e a presença de acostamento de concreto ou não (SENÇO, 1997).

O método de dimensionamento da PCA/84 surge com o reconhecimento de algumas deficiências de métodos anteriores, como estabelecido por ela mesma em 1966: a prática do uso de BT não era considerada estruturalmente, o emprego de acostamento pavimentado de concreto que contribui muito para um melhor desempenho dos pavimentos também não era considerado e há outro modo de ruptura, além daquele por fadiga: a contaminação e a erosão do subleito (BALBO, 2009).

A PCA/84 passou então a realizar estudos para o cômputo dos efeitos de cargas sobre placas de concreto, considerando a presença de BT, suas dimensões finitas, e a existência ou não de acostamentos pavimentados de concreto, dando um verdadeiro salto de qualidade quando comparado com o modelo por ela mesmo proposto em 1966. No desenvolvimento desses modelos o módulo de elasticidade ficou restrito em 28.000 MPa (BALBO, 2009).

A modelagem de tensões para as cargas críticas de borda longitudinal foi realizada de acordo com as considerações anteriores, tabulando-se os valores de tensões para vários tipos de carga. Balbo (2009) complementa que:

“Ressalta-se que a PCA optou por fornecer tabelas e ábacos sem formular - não se sabe por que – modelos de regressão (BALBO, 2009).”

A sequência de cálculo do dimensionamento, passa pelas seguintes oito etapas:

1- Definição dos parâmetros de dimensionamento

- a. Tráfego previsto para cada nível de carga por eixo de acordo com o período de projeto;
- b. Coeficiente de recalque, no topo da sub-base;
- c. Fator de segurança de carga;
- d. Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura do concreto;
- e. Tipo de acostamento e adoção ou não de barras de transferência.

2- Espessura tentativa

Adota-se uma espessura para a placa de concreto e preenchimento da planilha de cálculo própria.

3- Determinação das tensões equivalentes

Determinam-se as tensões, nas suas próprias planilhas levando em conta os parâmetros adotados no projeto.

4- Determinação dos Fatores de Erosão

De acordo com os parâmetros, determinam-se nas tabelas respectivas os Fatores de Erosão.

5- Determinação dos Fatores de Fadiga

Para a determinação dos Fatores de Fadiga, as tensões equivalentes são divididas pela resistência característica do concreto à tração na flexão.

6- Determinação das Repetições Admissíveis de Carga

a. Fator de Erosão

Com o fator de erosão e as cargas por eixo simples e tandem duplo, são determinadas as Repetições Admissíveis de Carga com a ajuda de ábacos.

Observação: Eixos Tandem Triplos são considerados como se fossem três eixos Tandem Simples.

b. Fator de Fadiga

Com o fator de fadiga e as cargas correspondentes a cada eixo, são determinadas as Repetições Admissíveis

7- Cálculo do Consumo de Resistência à Fadiga e Danos por Erosão

Dividem-se as repetições Previstas pelas respectivas Repetições Admissíveis, tanto para a análise à fadiga, quanto para erosão, determinando-se as porcentagens de Consumo de Resistência à Fadiga e o Dano por Erosão.

8- Cálculos Finais

Somam-se os valores dos Consumos de Resistência à Fadiga e Danos por Erosão, verifica-se o requisito de que nenhuma das somas ultrapassem o valor de 100%.

Caso a espessura tentada não seja suficiente, deve-se adotar uma espessura maior e repetir o cálculo.

Se as somas das porcentagens de consumo à resistência à fadiga e de danos por erosão apresentarem valores próximos ou iguais a zero, as condições são satisfeitas, entretanto a placa estará superdimensionada. Nesse caso, devem-se

adotar espessuras menores obedecendo ao limite de 100% nas somas das porcentagens (SENÇO, 1997).

Segundo o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2004) o método se baseia em quatro pontos:

- Observação metódica de pavimentos em serviço;
- Pistas experimentais, especialmente da AASHTO, além de estudos levantados por diversas entidades;
- Ensaio de laboratório e em modelos, sobre influência e comportamento de juntas, sub-bases e acostamentos no desempenho de pavimentos de concreto;
- Estudos teóricos clássicos sobre o comportamento de placas de concreto e, modernas análises computacionais utilizando-se de elementos finitos.

O dimensionamento é realizado com o uso de ábacos, planilhas e tabelas. A Figura 16 ilustra o aumento do coeficiente de recalque do solo devido a presença de uma sub-base granular, a Figura 17 mostra a tensão equivalente para eixos simples/duplos para um pavimento sem acostamento de concreto a partir da espessura do revestimento e do coeficiente de recalque, e as Figuras 18 e 19 apresentam ábacos para encontrar os valores de repetições admissíveis para análise a fadiga e a erosão, respectivamente.

Figura 16 - Aumento de k devido a presença de uma sub-base granular

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

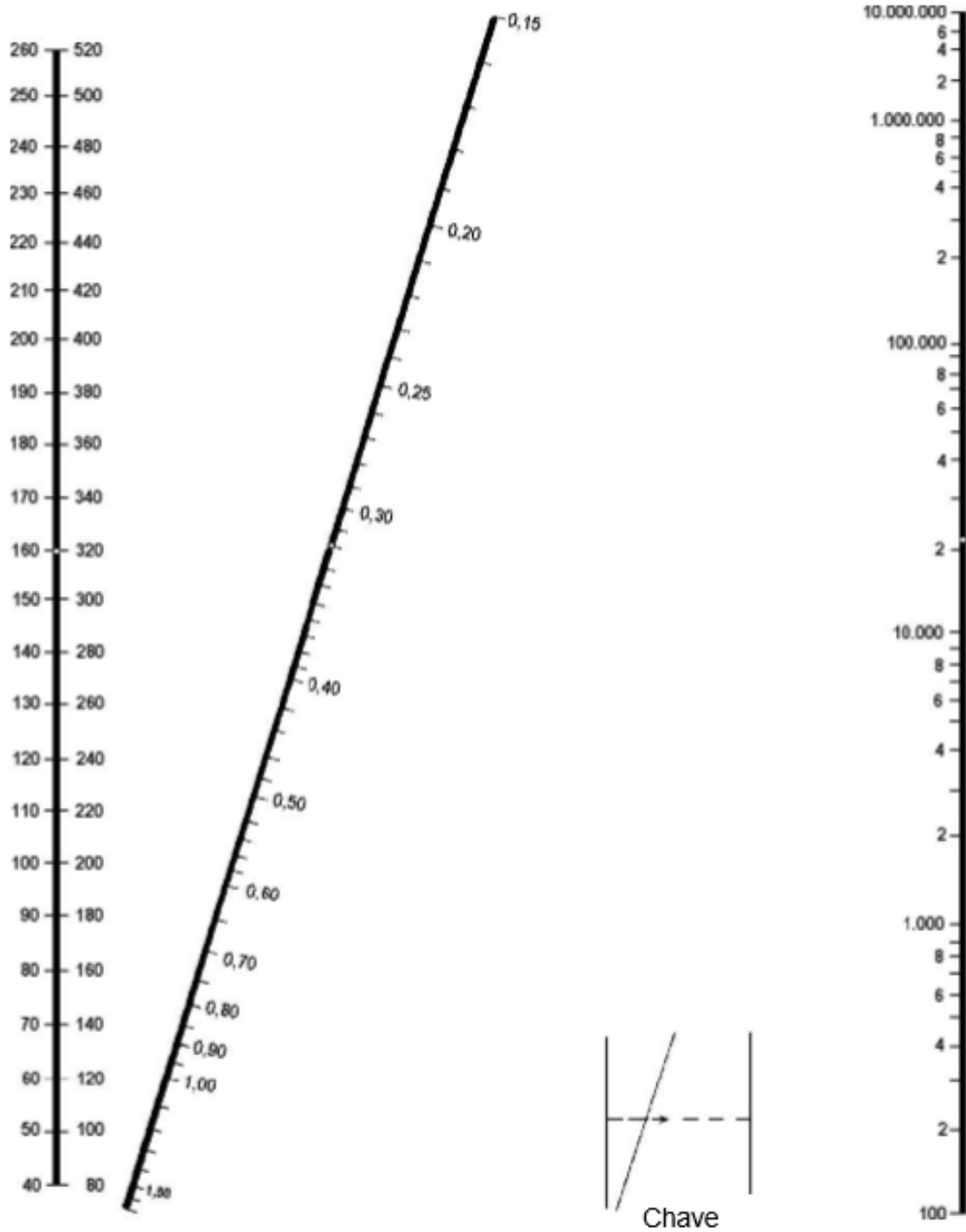
Fonte: SENÇO (1997)

Figura 17 - Tensão equivalente para pavimentos sem acostamento de concreto (eixo simples/eixo duplo)

Espessura da placa (cm)	k do sistema subleito-sub-base (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
10	5,42/4,39	4,75/3,83	4,38/3,59	4,13/3,44	3,66/3,22	3,45/3,15
11	4,74/3,88	4,16/3,35	3,85/3,12	3,63/2,97	3,23/2,76	3,06/2,68
12	4,19/3,47	3,69/2,98	3,41/2,75	3,23/2,62	2,88/2,40	2,73/2,33
13	3,75/3,14	3,30/2,68	3,06/2,46	2,89/2,33	2,59/2,13	2,46/2,05
14	3,37/2,87	2,97/2,43	2,76/2,23	2,61/2,10	2,34/1,90	2,23/1,83
15	3,06/2,64	2,70/2,23	2,51/2,04	2,37/1,92	2,13/1,72	2,03/1,65
16	2,79/2,45	2,47/2,06	2,29/1,87	2,17/1,76	1,95/1,57	1,86/1,50
17	2,56/2,28	2,26/1,91	2,10/1,74	1,99/1,63	1,80/1,45	1,71/1,38
18	2,37/2,14	2,09/1,79	1,94/1,62	1,84/1,51	1,66/1,34	1,58/1,27
19	2,19/2,01	1,94/1,67	1,80/1,51	1,71/1,41	1,54/1,25	1,47/1,18
20	2,04/1,90	1,80/1,58	1,67/1,42	1,59/1,33	1,43/1,17	1,37/1,11
21	1,91/1,79	1,68/1,49	1,56/1,34	1,48/1,25	1,34/1,10	1,28/1,04
22	1,79/1,70	1,57/1,41	1,46/1,27	1,39/1,18	1,26/1,03	1,20/0,98
23	1,68/1,62	1,48/1,34	1,38/1,21	1,31/1,12	1,18/0,98	1,13/0,92
24	1,58/1,55	1,39/1,28	1,30/1,15	1,23/1,06	1,11/0,93	1,06/0,87
25	1,49/1,48	1,32/1,22	1,22/1,09	1,16/1,01	1,05/0,88	1,00/0,83
26	1,41/1,41	1,25/1,17	1,16/1,05	1,10/0,97	0,99/0,84	0,95/0,79
27	1,34/1,36	1,18/1,12	1,10/1,00	1,04/0,93	0,94/0,80	0,90/0,75
28	1,28/1,30	1,12/1,07	1,04/0,96	0,99/0,89	0,89/0,77	0,86/0,72
29	1,22/1,25	1,07/1,03	0,99/0,92	0,94/0,85	0,85/0,74	0,81/0,69
30	1,16/1,21	1,02/0,99	0,95/0,89	0,90/0,82	0,81/0,71	0,78/0,66
31	1,11/1,16	0,97/0,96	0,90/0,86	0,86/0,79	0,77/0,68	0,74/0,64
32	1,06/1,12	0,93/0,92	0,86/0,83	0,82/0,76	0,74/0,66	0,71/0,62
33	1,02/1,09	0,89/0,89	0,83/0,80	0,78/0,74	0,71/0,63	0,68/0,59
34	0,98/1,05	0,85/0,86	0,79/0,77	0,75/0,71	0,68/0,61	0,65/0,57
35	0,94/1,02	0,82/0,84	0,76/0,75	0,72/0,69	0,65/0,59	0,62/0,55

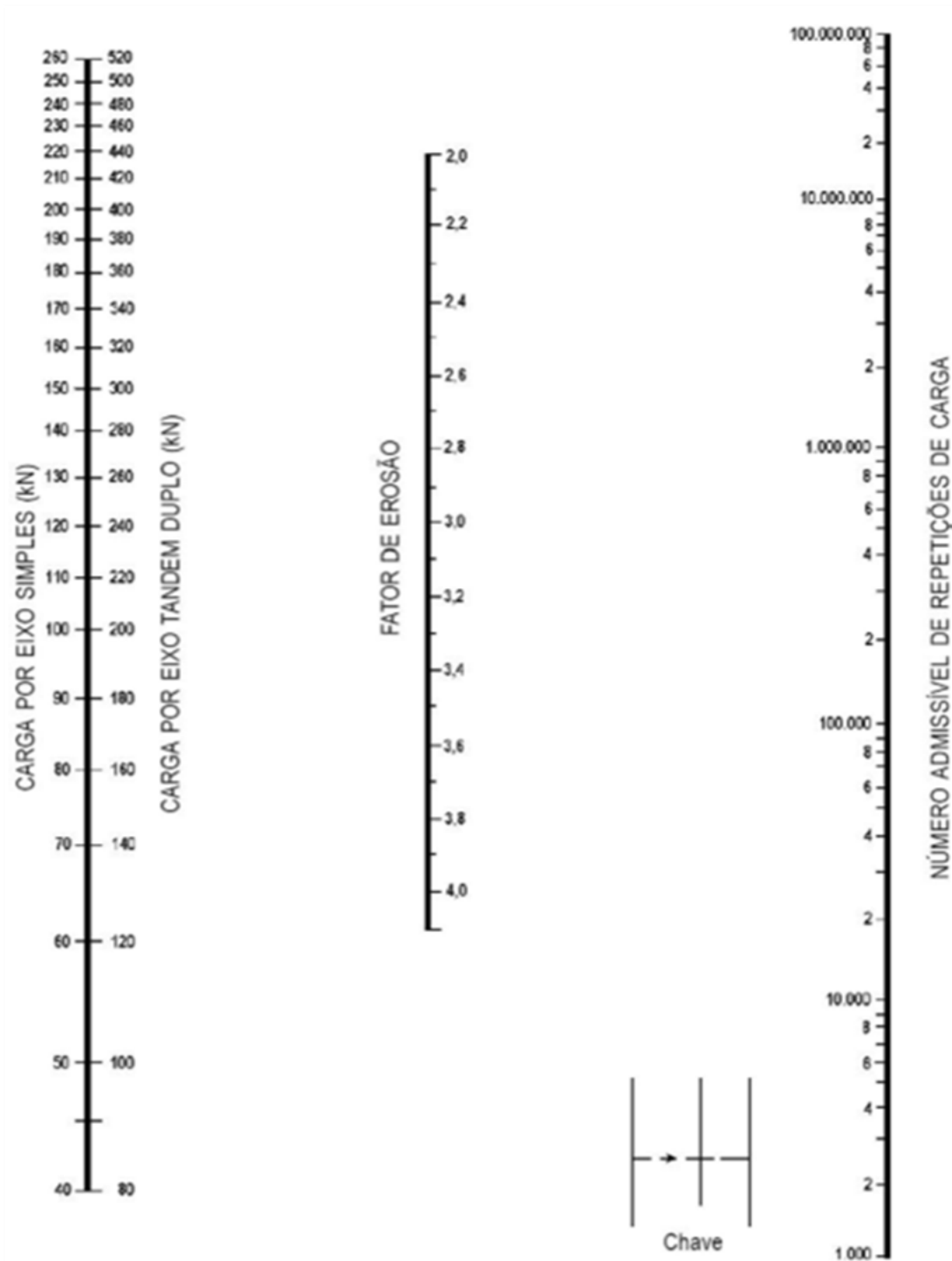
Fonte: SENÇO (1997)

Figura 18 - Análise de fadiga: número admissível de repetições de carga em função do fator de fadiga (com e sem acostamento de concreto)



Fonte: SENÇO (1997)

Figura 19 - Análise de erosão: número admissível de repetições de carga em função do fator de erosão (sem acostamento de concreto)



Fonte: SENÇO (1997)

2.6 Softwares de dimensionamento

Ying-Haur Lee e Samuel H. Carpenter (2001) desenvolverem um *software* para *Windows*, chamado de PCAWIN para verificar se a espessura de um pavimento de concreto está de acordo com o método da PCA/84. Eles se utilizaram de fórmulas apresentadas em artigos não publicados para calcular o número de repetições admissíveis para os dois critérios de dimensionamento: fadiga e erosão. O volume de tráfego foi calculado a partir de um valor médio diário de tráfego de caminhões inserido no programa e uma distribuição estatística para obter os números do tráfego para os veículos de diferentes cargas. A Figura 29 ilustra a *interface* do programa.

Figura 20 - Interface PCAWIN

The image shows a screenshot of the PCAWIN software interface, divided into two main sections: 'Pavement Data' and 'Traffic Data'. The 'Pavement Data' section includes input fields for 'Trial Thickness, h (in)' (9.5), 'Subgrade Modulus, K (psi/in)' (130), and 'Modulus of Rupture, Sc (psi)' (650). It also features radio buttons for 'Concrete Shoulder' (Yes/No) and 'Doweled Joints' (Yes/No). The 'Traffic Data' section includes input fields for 'Average Daily Truck Traffic, ADTT' (3680), 'Design Period, Years' (20), and 'Load Safety Factor, LSF' (1.2). Both sections have 'OK' and 'Cancel' buttons.

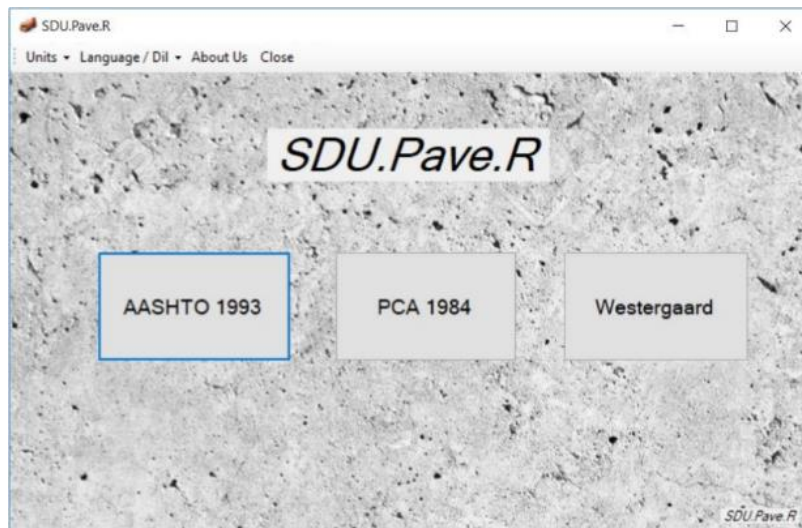
Pavement Data	
Trial Thickness, h (in)	9.5
Subgrade Modulus, K (psi/in)	130
Modulus of Rupture, Sc (psi)	650
Concrete Shoulder	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No
Doweled Joints	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
	OK
	Cancel
Traffic Data	
Average Daily Truck Traffic, ADTT	3680
Design Period, Years	20
Load Safety Factor, LSF	1.2
	OK
	Cancel

Fonte: LEE E CARPENTER (2001)

AYDIN KICI E MESUT TIĞDEMİR (2017) também desenvolveram um *software* para o dimensionamento de pavimentos rígidos de concreto simples, entretanto, no programa desenvolvido por eles é possível escolher qual método de análise será feito, entre o método da AASHTO de 1993, o método da PCA de 1984 ou pelas equações desenvolvidas por

Westergaard. A Figura 30 mostra a *interface* para a escolha do método utilizado para o cálculo da espessura do pavimento rígido.

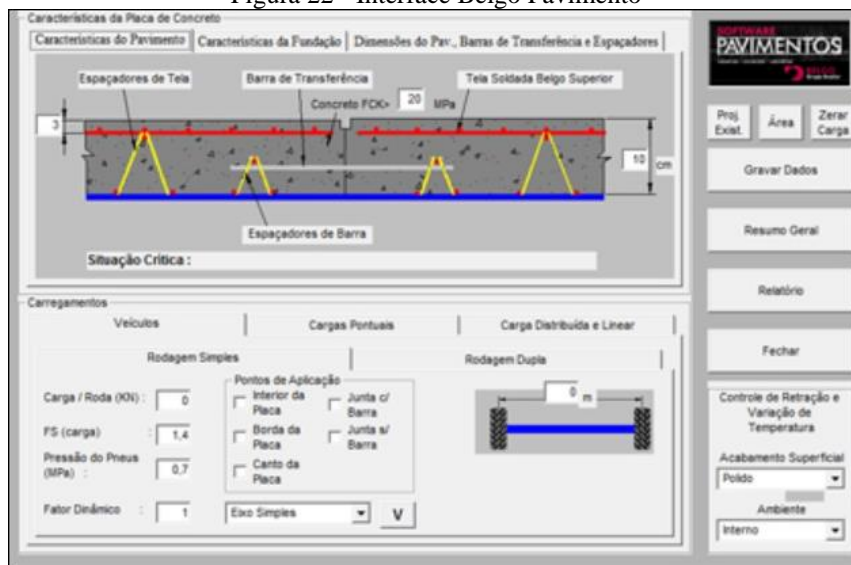
Figura 21 - Interface SDU.Pave.R



Fonte: KICI E TIĞDEMİR (2017)

Há ainda, um programa brasileiro, chamado Belgo Pavimento, desenvolvido pela empresa Arcelor Mittal, sendo uma ferramenta para o dimensionamento de pavimentos de concreto armado distribuída pela empresa Belgo. O programa é gratuito, porém é necessário um registro para obter uma senha para o uso. A Figura 31 ilustra a *interface* do programa.

Figura 22 - Interface Belgo Pavimento



Fonte: Trelisoft Consultoria e Sistemas Ltda. (2016)

Além desses *softwares*, há um programa desenvolvido pela ACPA (*American Concrete Pavement Association*) em parceria com a NRMCA (*National Ready Mixed Concrete Association*) e a PCA (*Portland Cement Association*), que é utilizado para dimensionar pavimentos de concreto, para diferentes usos e finalidades. O programa é gratuito, de acesso imediato, com armazenamento na “nuvem” e com atualizações e melhorias automáticas. Pode-se acessar o programa através do seguinte endereço eletrônico: <https://www.pavementdesigner.org/>. O *site* guia o usuário a três estágios básicos para o dimensionamento do pavimento. Primeiro o usuário seleciona o tipo de projeto (estacionamento, rodovia ou modalidade intermodal). O sistema guia o usuário através dos detalhes do projeto e o dimensionamento da estrutura (ACPA, 2018)

Figura 23 - Interface principal do software *Pavement Designer*



Fonte: ACPA (2018)

Figura 24 - Inserção de dados para cálculo de pavimento simples de concreto no software *Pavement Design*

Single		Tandem		Tridem	
AXLE LOAD (kips)	AXLES/1000 TRUCKS	AXLE LOAD (kips)	AXLES/1000 TRUCKS	AXLE LOAD (kips)	AXLES/1000 TRUCKS
24	0.07	24	0.07	24	0.07
24	1.6	24	1.6	24	1.6
22	2.6	22	2.6	22	2.6
20	6.63	20	6.63	20	6.63
18	16.61	18	16.61	18	16.61
16	23.88	16	23.88	16	23.88
14	47.76	14	47.76	14	47.76
12	116.76	12	116.76	12	116.76
10	142.7	10	142.7	10	142.7
8	233.6	8	233.6	8	233.6

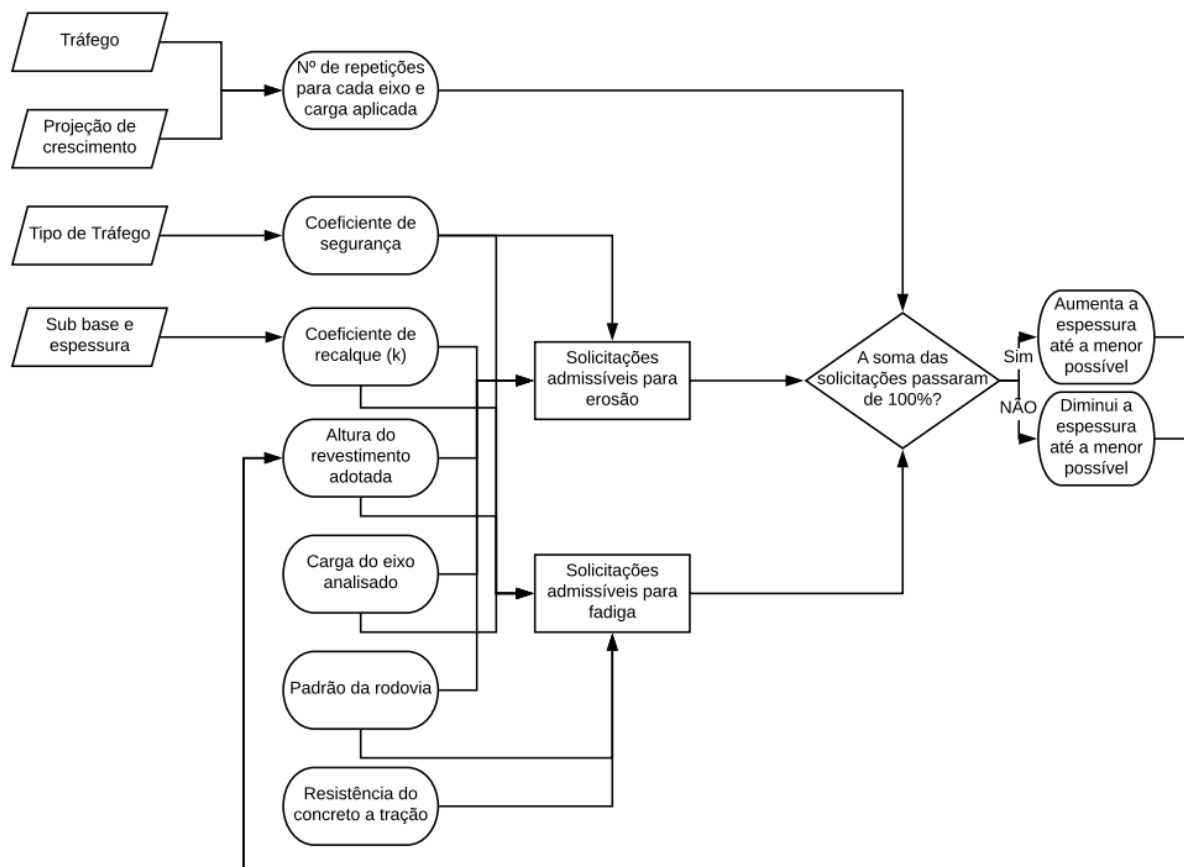
Fonte: ACPA (2018)

3 MÉTODO E MATERIAIS

3.1 Método

A primeira etapa é apresentada no fluxograma da Figura 25, com base no método de dimensionamento da PCA/84 para pavimentos simples de concreto de cimento Portland.

Figura 25 - Fluxograma de dimensionamento da PCA/84



A segunda etapa foi o desenvolvimento do algoritmo para o aplicativo como mostrado na Figura 25 para a análise à fadiga e na Figura 27 para a análise à erosão.

Figura 26 - Fluxograma de análise a fadiga do algoritmo

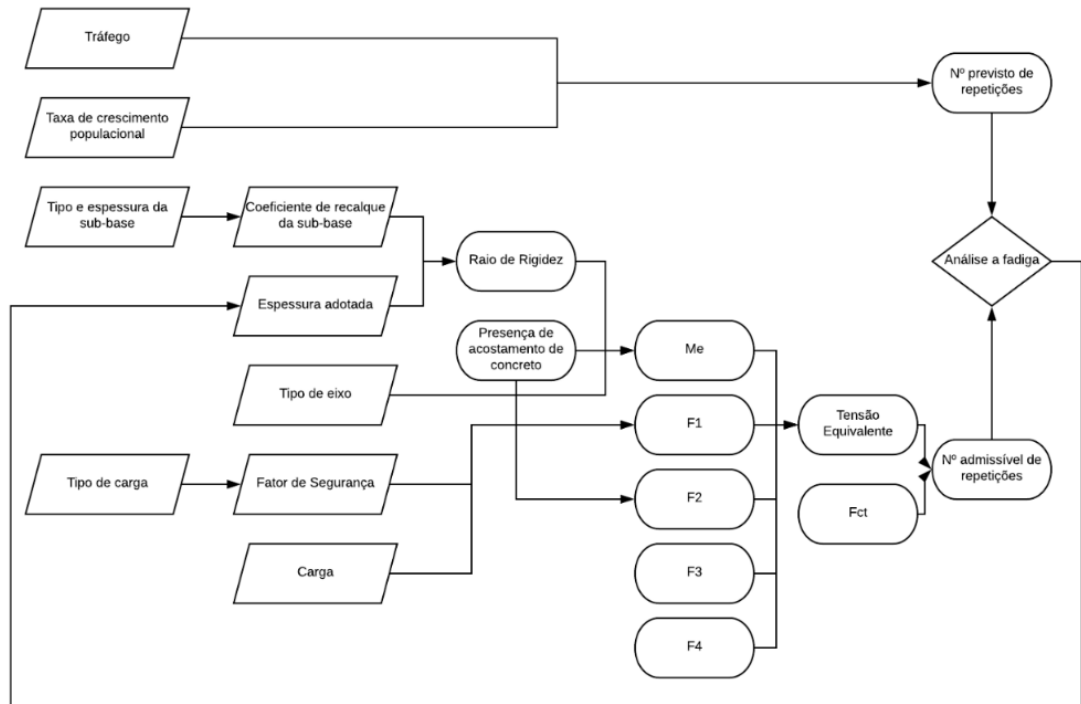
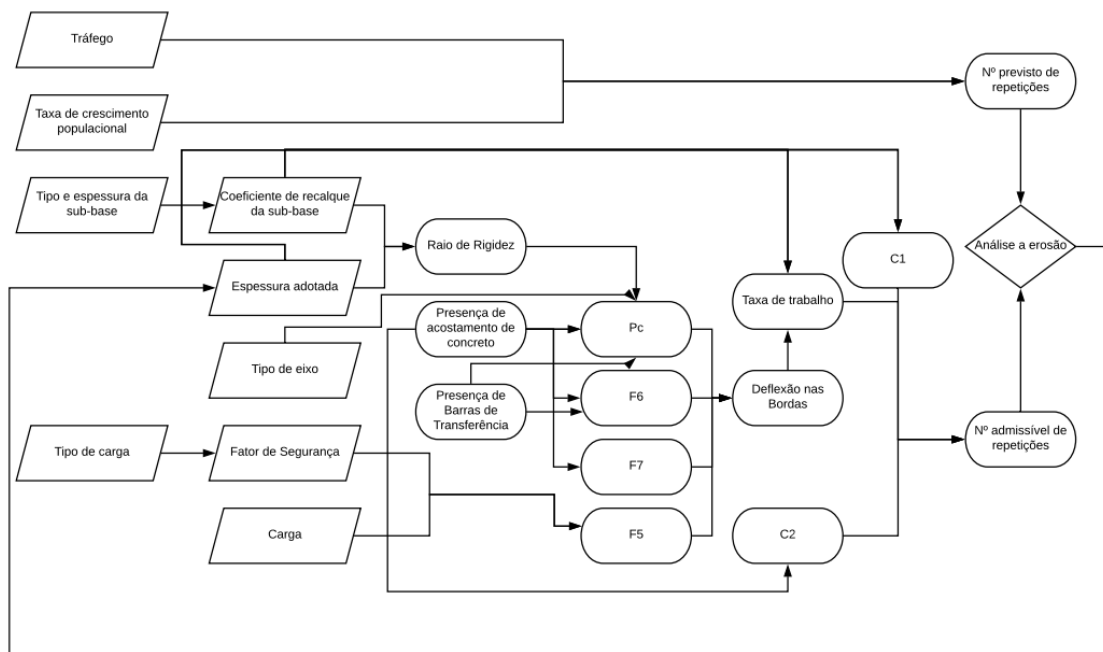


Figura 27 - Fluxograma de análise a erosão do algoritmo



Com o uso do programa *Android Studio* foi criado uma *interface* intuitiva para que sejam colocados os dados necessários para o dimensionamento da espessura do pavimento rígido. Os dados são: valor da resistência à tração na flexão (F_{ct}) do concreto, tipo de sub-base a ser utilizada, capacidade de suporte (CBR) do subleito, tipo de transmissão de carga entre placas (com barras de transferência (BT) ou intertravamento de agregados), presença ou não de

acostamento de concreto (AC), previsão de crescimento do tráfego e o tráfego estimado da rodovia.

A partir dos dados do tráfego e do crescimento do tráfego o algoritmo criado, também no programa *Android Studio*, calcula-se o número de repetições previsto para cada carga e tipo de eixo nos 20 anos de vida útil do revestimento.

3.2 Materiais

O dimensionamento do pavimento segundo a o método da PCA/84 foi realizado a partir do uso de tabelas, gráficos e ábacos apresentados no item 2.5.3.

Para o dimensionamento do pavimento no algoritmo foi utilizado fórmulas apresentadas por Lee e Carpenter no artigo “*PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design*” para o cálculo de solicitações admissíveis, uma vez que não seria possível a inserção de todas as tabelas e ábacos apresentados pelo método PCA/84 para o dimensionamento do pavimento. Isto se justifica, uma vez que além de muito difícil e trabalhoso, os ábacos são copiados e apresentam distorções, podendo gerar erros.

O roteiro de cálculo é mostrado na sequência.

Na primeira tentativa de cálculo é adotada uma espessura inicial para determinar se ela atende aos requisitos e pode ser diminuída ou se não atende e deve ser aumentada.

Análise a fadiga:

- a) Calcula-se a tensão equivalente aplicada na placa de concreto por meio da Equação 4:

$$\sigma_{eq} = \frac{6 * M_e}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (4)$$

Onde M_e depende do tipo de eixo e da presença ou não de acostamento de concreto.

Para eixo simples sem acostamento de concreto utiliza-se a Equação 5:

$$M_e = -1600 + 2525 * \log(l) + 24.42 * l + 0,204 * l^2 \quad (5)$$

Para eixo tandem sem acostamento de concreto utiliza-se a Equação 6:

$$M_e = 3029 - 2966,8 * \log(l) + 133,69 * l - 0,0632 * l^2 \quad (6)$$

Para eixo simples com acostamento de concreto utiliza-se a Equação 7:

$$M_e = (-970,4 + 1202,6 * \log(l) + 53,587 * l) * (0,8742 + 0,01088 * k^{0,447}) \quad (7)$$

Para eixo tandem com acostamento de concreto utiliza-se a Equação 8:

$$M_e = (2005,4 - 1780,9 * \log(l) + 99,008 * l) * (0,8742 + 0,01088 * k^{0,447}) \quad (8)$$

Onde l é o raio de rigidez relativa da sub-base dado pela Equação 9:

$$l = \left(\frac{E * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * k} \right)^{0,25} \quad (9)$$

Onde: E é o módulo de elasticidade do concreto, adotado 4 Mpsi.

μ é o coeficiente de Poisson do concreto, adotado 0,15.

h é a espessura do revestimento em polegadas (*inches*).

k é o coeficiente de recalque da sub-base em pci.

O fator f_1 é um fator de ajuste para o efeito de cargas dos eixos e áreas de contato dado pela Equação 10 para eixos simples e pela Equação 11 para eixos tandem:

$$f_1 = \left(\frac{24}{CES} \right)^{0,06} * \frac{CES}{18} \quad (10)$$

$$f_1 = \left(\frac{48}{CET} \right)^{0,06} * \frac{CET}{36} \quad (11)$$

Onde CES é a carga do eixo simples e CET é a carga do eixo tandem.

O fator f_2 é um fator de ajuste para placas sem acostamento de concreto e é dado pela Equação 12 para pavimentos sem acostamento de concreto e pela Equação 13 para pavimentos com acostamento de concreto:

$$f_2 = 0,892 + \frac{h}{85,71} - \frac{h^2}{3000} \quad (12)$$

$$f_2=1 \quad (13)$$

O fator f_3 é um fator de ajuste para o efeito da posição dos caminhões nas tensões de borda, a PCA adota uma interferência de 6%, então $f_3 = 0,894$

O fator f_4 é um fator de ajuste para o aumento de resistência do concreto a partir do 28º dia, $f_4 = 0,953$

- b) Com o valor da tensão equivalente calculado é possível calcular o número de repetições admissíveis (N_f) que se baseia na relação entre a tensão equivalente e a resistência a tração do concreto (S_c) pelas Equações 1, 2 e 3 mostradas no item 2.4.4.
- c) Para cada carga e tipo de eixo é calculado número de repetições admissíveis, com esse valor, é utilizada a lei de Miner. De acordo com a Lei de Miner, o somatório das relações entre o número de repetições previstas e o número de repetições admissíveis para cada carga e tipo de eixo não deve passar de 100%. Caso o somatório passe de 100% é adotado um valor maior de espessura e é recalculado até que se obtenha o menor valor possível para a análise à fadiga.

Análise a erosão:

- a) Calcula-se a deflexão nas bordas (δ_{eq}) pela Equação 14:

$$\delta_{eq} = \frac{p_c}{k} * f_5 * f_6 * f_7 \quad (14)$$

Onde p_c depende do tipo de eixo e pela presença ou não de barras de transferência e acostamento de concreto.

Para eixo simples, sem barras de transferência e sem acostamento de concreto utiliza-se a Equação 15.

$$p_c = 1,571 + \frac{46,127}{l} + \frac{4372,7}{l^2} - \frac{22886}{l^3} \quad (15)$$

Para eixo tandem, sem barras de transferência e sem acostamento de concreto utiliza-se a Equação 16.

$$p_c = 1,847 + \frac{213,68}{l} - \frac{1260,8}{l^2} + \frac{22989}{l^3} \quad (16)$$

Para eixo simples, sem barras de transferência e com acostamento de concreto utiliza-se a Equação 17.

$$p_c = 0,5847 + \frac{65,108}{l} + \frac{1130,9}{l^2} - \frac{5245,8}{l^3} \quad (17)$$

Para eixo tandem, sem barras de transferência e com acostamento de concreto utiliza-se a Equação 18.

$$p_c = 1,47 + \frac{102,2}{l} - \frac{1072}{l^2} + \frac{14451}{l^3} \quad (18)$$

Para eixo simples, com barras de transferência e sem acostamento de concreto utiliza-se a Equação 19.

$$p_c = -0,3019 + \frac{128,85}{l} + \frac{1105,8}{l^2} + \frac{3269,1}{l^3} \quad (19)$$

Para eixo tandem, com barras de transferência e sem acostamento de concreto utiliza-se a Equação 20.

$$p_c = 1,258 + \frac{97,491}{l} + \frac{1484,1}{l^2} - \frac{180}{l^3} \quad (20)$$

Para eixo simples, com barras de transferência e com acostamento de concreto utiliza-se a Equação 21.

$$p_c = 0,018 + \frac{72,99}{l} + \frac{323,1}{l^2} + \frac{1620}{l^3} \quad (21)$$

Para eixo tandem, com barras de transferência e com acostamento de concreto utiliza-se a Equação 22.

$$p_c = 0,0345 + \frac{146,25}{l} - \frac{2385,6}{l^2} + \frac{23848}{l^3} \quad (22)$$

O fator f_5 é um fator de ajuste para o efeito de cargas dos eixos e áreas de contato dado pela Equação 23 para eixos simples e pela Equação 24 para eixos tandem:

$$f_5 = \frac{CES}{18} \quad (23)$$

$$f_5 = \frac{CES}{36} \quad (24)$$

O fator f_6 é um fator de ajuste para placas sem barras de transferência e sem acostamento de concreto dado pela Equação 25 para placas sem barras de transferência e sem acostamento de concreto, para placas sem barras de transferência e com acostamento de concreto utiliza-se a Equação 26 e para placas com barras de transferência a Equação 27:

$$f_6 = 0,95 \quad (25)$$

$$f_6 = 1,001 - \left(0,26363 - \frac{k}{3034,5}\right)^2 \quad (26)$$

$$f_6 = 1 \quad (27)$$

O fator f_3 é um fator de ajuste para o efeito da posição dos caminhões nas tensões de borda e é dado pela Equação 28 para placas sem acostamento de concreto e pela Equação 29 para placas com acostamento de concreto:

$$f_7 = 0,896 \quad (28)$$

$$f_7 = 1 \quad (29)$$

- b) Com a deflexão nas bordas é possível calcular a taxa de trabalho, que tem como conceito de que por uma unidade de área uma placa mais fina com sua menor deflexão terá receberá uma punção mais rápida que uma placa mais grossa. A taxa de trabalho é dada pela Equação 30:

$$P = 268,7 * \frac{k^{1,27} * \delta_{eq}^2}{h} \quad (30)$$

- c) Para o cálculo de número admissível de repetições para a análise a erosão utilizam-se a Equação 31 para $C_1 * P > 9$ e a Equação 32 para $C_1 * P \leq 9$.

$$\log N_e = 14,524 - 6,777 * (C_1 * P - 9)^{0,103} - \log C_2 \quad (31)$$

$$N_e = \textit{ilimitado} \quad (32)$$

Onde C_1 é um valor de ajuste para sub-bases estabilizadas dado pela Equação 33 e C_2 é um valor de ajuste para pavimentos sem acostamento de concreto dado pela Equação 34 para pavimentos sem acostamento de concreto e pela Equação 35 para pavimentos com acostamento de concreto.

$$C_1 = 1 - \left(\frac{k}{2000} * \frac{4}{h} \right)^2 \quad (33)$$

$$C_2 = 0,06 \quad (34)$$

$$C_2 = 0,94 \quad (35)$$

Com os valores de números de repetições previstas e admissíveis é possível determinar se a espessura adotada inicialmente atende os requisitos do método, ou seja, a soma das porcentagens dos valores do número de repetições previstas divididos pelo número de repetições admissíveis não deve ultrapassar 100%. Caso a espessura não atenda, é necessário aumentar a espessura e realizar a verificação novamente, caso a espessura atenda aos requisitos, ela é diminuída e novamente testada até que se obtenha o menor valor possível de espessura.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados do trabalho, no qual foi realizado um dimensionamento hipotético de um pavimento simples de concreto de cimento Portland de acordo com a metodologia comum, ou seja, por meio de ábacos e valores tabelados. Posteriormente está apresentada a forma de uso do aplicativo desenvolvido. Foi feito um comparativo entre os dois resultados. Ao aplicativo foi dado o nome de ConcrePav.

A partir de um tráfego e pavimento hipotéticos foi dimensionado um pavimento pelo método PCA/84 utilizando-se dos ábacos e tabelas apresentadas, e em seguida, é apresentado os resultados do aplicativo.

4.1 Exemplo de Dimensionamento pelo método PCA 84

Os dados do tráfego no ano 1 para o exemplo são mostrados no Quadro 1:

Quadro 1 - Tráfego no ano 1

ANO 1			
Carga por eixo (t)	Eixo Simples	Eixo TD	Eixo TT
< 6	150.000		
7	11.000		
8	49.000		
9	10.000		
10	14.600		
11	21.100		
12	23.200		
13	11.100	130.000	
14	14.600	11.000	
15	2.100	26.000	
16		13.500	
17		6.500	
18		27.200	
19		4.300	
20		29.200	
21		9.100	
22		4.400	17.000
23		3.100	25.500
24			24.100
25			28.200
26			0
27			4.800
28			29.400
29			22.600
30			6.200

A taxa de crescimento adotada foi de 3,5%, e o primeiro ano de uso da rodovia será no terceiro ano. Esta taxa de crescimento é comum no uso de dimensionamento de pavimentos adotado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Assim, tem-se o número total de repetições nos 20 anos de vida útil da rodovia mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Número total de repetições

Número total de repetições			
Carga por eixo (t)	Eixo Simples	Eixo TD	Eixo TT
< 6	4.544.085		
7	333.233		
8	1.484.401		
9	302.939		
10	442.291		
11	639.201		
12	702.819		
13	336.262	3.938.207	
14	442.291	333.233	
15	63.617	787.641	
16		408.968	
17		196.910	
18		823.994	
19		130.264	
20		884.582	
21		275.675	
22		133.293	514.996
23		93.911	772.495
24			730.083
25			854.288
26			0
27			145.411
28			890.641
29			684.642
30			187.822

O CBR adotado para o subleito foi de 5,5% e adotou-se o uso de uma sub-base granular de 15 cm de espessura. Com esses dados é possível determinar o valor do coeficiente de recalque da fundação. O método da PCA/84 propõe uma correlação entre o valor do coeficiente de recalque com o CBR de projeto como mostra o Quadro 3.

Quadro 3 - Relação entre CBR e k

CBR (%)	k (MPa/m)
4	30
5	34
6	38
8	44
10	49

Porém, com a presença de uma camada de sub-base granular, tem-se um aumento do valor de k conforme o Quadro 4 demonstra:

Quadro 4 - Aumento de k pelo uso de sub-base granular de 15 cm

CBR (%)	k (MPa/m)	$k_{BG_{15}}$
4	30	38
5	34	42
6	38	46
8	44	53
10	49	58

Realizada a interpolação linear (CBR = 5,5) tem-se que $k_{subleito} = 36MPa/m$ e $k_{BG} = 44 MPa/m$.

O tráfego adotado foi um tráfego com alto volume de caminhões, desta maneira o fator de segurança adotado foi de 1,2 (Tabela 2). Para a resistência a tração no ensaio de flexão, delimitou-se $f_{ctM,k} = 4,5 MPa$. Foi considerado, também que a rodovia possuirá acostamento de concreto e a transmissão de carga entre as placas será feita por meio de barras de transferência.

Fator de fadiga:

Para a primeira tentativa foi adotado uma espessura de 25 cm. Realizando a interpolação linear entres os valores de k 40 e 60 mostrados na Figura 28, para a espessura delimitada encontramos a tensão equivalente para o eixo simples e dividimos pela resistência no concreto a tração na flexão, para encontrar o fator de fadiga, obtendo 1,07 MPa.

Figura 28 - Tensão equivalente (com acostamento) - Eixo Simples/Tandem Duplo

Espessura da placa (cm)	k do sistema subleito-sub-base (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
10	4,18/3,48	3,65/3,10	3,37/2,94	3,19/2,85	2,85/2,74	2,72/2,72
11	3,68/3,07	3,23/2,71	2,99/2,56	2,83/2,47	2,55/2,35	2,43/2,32
12	3,28/2,75	2,88/2,41	2,67/2,26	2,54/2,17	2,29/2,05	2,19/2,02
13	2,95/2,49	2,60/2,17	2,41/2,02	2,29/1,94	2,07/1,82	1,99/1,78
14	2,68/2,27	2,36/1,97	2,19/1,83	2,08/1,75	1,89/1,63	1,81/1,59
15	2,44/2,08	2,15/1,80	2,00/1,67	1,90/1,59	1,73/1,48	1,66/1,44
16	2,24/1,93	1,97/1,66	1,84/1,53	1,75/1,46	1,59/1,35	1,53/1,31
17	2,06/1,79	1,82/1,54	1,70/1,42	1,62/1,35	1,48/1,24	1,42/1,20
18	1,91/1,67	1,69/1,43	1,57/1,32	1,50/1,25	1,37/1,15	1,32/1,11
19	1,77/1,57	1,57/1,34	1,46/1,23	1,40/1,17	1,28/1,07	1,23/1,03
20	1,65/1,48	1,46/1,26	1,37/1,16	1,30/1,10	1,19/1,00	1,15/0,96
21	1,55/1,40	1,37/1,19	1,28/1,09	1,22/1,03	1,12/0,93	1,08/0,90
22	1,45/1,32	1,29/1,12	1,20/1,03	1,15/0,97	1,05/0,88	1,01/0,85
23	1,37/1,26	1,21/1,07	1,13/0,98	1,08/0,92	0,99/0,83	0,96/0,80
24	1,29/1,20	1,15/1,01	1,07/0,93	1,02/0,87	0,94/0,79	0,90/0,76
25	1,22/1,14	1,08/0,97	1,01/0,88	0,97/0,83	0,89/0,75	0,86/0,72

Fonte: SENÇO (1997)

Para determinar o fator de fadiga para o eixo simples, basta dividir a sua tensão equivalente pelo valor de $f_{ctM,k}$. Assim, obtém-se que o fator de fadiga para o eixo simples é igual a 0,237. Analogamente para o eixo duplo, obtém-se que o fator de fadiga para o ETD é igual a 0,212. Por fim, para o eixo de tandem triplo, utilizam-se os dados da Figura 21:

Figura 29 - Tensão equivalente Eixo Tandem Triplo - Com acostamento/Sem acostamento

Espessura da placa (cm)	k do sistema subleito-sub-base (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
10	3,36/2,87	3,10/2,67	3,02/2,60	2,98/2,57	2,94/2,56	2,93/2,57
11	2,92/2,50	2,64/2,29	2,55/2,22	2,50/2,18	2,45/2,16	2,44/2,16
12	2,60/2,20	2,30/2,00	2,20/1,93	2,14/1,89	2,08/1,85	2,07/1,85
13	2,35/1,97	2,04/1,78	1,93/1,70	1,87/1,66	1,80/1,61	1,78/1,61
14	2,15/1,78	1,83/1,59	1,72/1,52	1,65/1,48	1,58/1,43	1,55/1,42
15	1,99/1,62	1,67/1,44	1,55/1,37	1,48/1,33	1,40/1,27	1,37/1,26
16	1,85/1,49	1,54/1,32	1,41/1,24	1,34/1,20	1,25/1,15	1,23/1,13
17	1,73/1,38	1,43/1,21	1,30/1,14	1,23/1,10	1,14/1,04	1,11/1,03
18	1,62/1,28	1,34/1,12	1,21/1,05	1,14/1,01	1,04/0,96	1,01/0,94
19	1,53/1,19	1,26/1,04	1,13/0,98	1,06/0,94	0,96/0,88	0,92/0,86
20	1,45/1,12	1,19/0,98	1,07/0,91	0,99/0,87	0,89/0,82	0,85/0,80
21	1,37/1,05	1,13/0,92	1,01/0,85	0,93/0,81	0,83/0,76	0,79/0,74
22	1,30/0,99	1,07/0,86	0,95/0,80	0,88/0,76	0,78/0,71	0,74/0,69
23	1,24/0,93	1,02/0,81	0,91/0,76	0,84/0,72	0,73/0,67	0,70/0,65
24	1,18/0,88	0,97/0,77	0,87/0,71	0,80/0,68	0,69/0,63	0,66/0,61
25	1,13/0,84	0,93/0,73	0,83/0,68	0,76/0,64	0,66/0,59	0,62/0,57

Fonte: SENÇO (1997)

Assim, realizando-se a interpolação linear determina-se que o fator de fadiga é igual a 0,160.

Fator de erosão:

Determina-se o fator de erosão através dos dados da Figura 30.

Figura 30 - Fatores de erosão (juntas transversais com barras de transferência e com acostamento) - Eixo Simples/Tandem Duplo

Espessura da placa(cm)	k do sistema subleito-sub-base (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
10	3,27/3,25	3,24/3,17	3,22/3,14	3,21/3,12	3,17/3,11	3,15/3,11
11	3,16/3,16	3,12/3,07	3,10/3,03	3,09/3,00	3,05/2,98	3,03/2,97
12	3,05/3,08	3,01/2,98	2,99/2,93	2,98/2,90	2,94/2,86	2,92/2,84
13	2,96/3,01	2,92/2,90	2,89/2,85	2,88/2,81	2,84/2,76	2,82/2,74
14	2,87/2,94	2,82/2,83	2,80/2,77	2,78/2,74	2,75/2,67	2,73/2,65
15	2,79/2,88	2,74/2,77	2,72/2,71	2,70/2,67	2,67/2,60	2,5/2,57
16	2,71/2,82	2,66/2,71	2,64/2,65	2,62/2,60	2,59/2,53	2,57/2,50
17	2,64/2,77	2,59/2,65	2,57/2,59	2,55/2,55	2,51/2,46	2,49/2,43
18	2,57/2,72	2,52/2,60	2,50/2,54	2,48/2,49	2,44/2,41	2,42/2,37
19	2,51/2,67	2,46/2,56	2,43/2,49	2,41/2,44	2,38/2,35	2,36/2,32
20	2,45/2,63	2,40/2,51	2,37/2,44	2,35/2,40	2,31/2,31	2,30/2,27
21	2,39/2,58	2,34/2,47	2,31/2,40	2,29/2,35	2,26/2,26	2,24/2,22
22	2,34/2,54	2,29/2,43	2,26/2,36	2,24/2,31	2,20/2,22	2,18/2,18
23	2,29/2,50	2,23/2,39	2,21/2,32	2,19/2,27	2,15/2,18	2,13/2,13
24	2,24/2,46	2,18/2,35	2,16/2,28	2,13/2,23	2,10/2,14	2,08/2,10
25	2,19/2,43	2,14/2,31	2,11/2,24	2,09/2,20	2,05/2,10	2,03/2,06

Fonte: SENÇO (1997)

Da mesma forma da metodologia de cálculo do fator de fadiga, para o fator de erosão, foi realizada a interpolação linear entre os valores de 40 e 60, obtendo-se assim que o fator de erosão para o eixo simples é igual a 2,13. O procedimento é análogo para o eixo tandem duplo, o qual resulta em um fator de erosão igual a 2,30. Para o eixo tandem triplo, são utilizadas outras tabelas semelhantes para determinação dos valores da tensão equivalente e fator de erosão.

Análises

Uma vez determinado os coeficientes, frente às solicitações presentes na projeção de tráfego acumulado, são realizadas as análises de fadiga e erosão no ábaco proposto pelo método. Inicia-se pelos valores determinados para a fadiga e posteriormente, obtêm-se os números admissíveis para cada carga correspondente. A Figura 31 ilustra o procedimento para eixos simples, a Figura 32 para eixos duplos e a Figura 33 para eixos triplos, respectivamente.

Figura 31 - Ábaco de fadiga - Eixo Simples

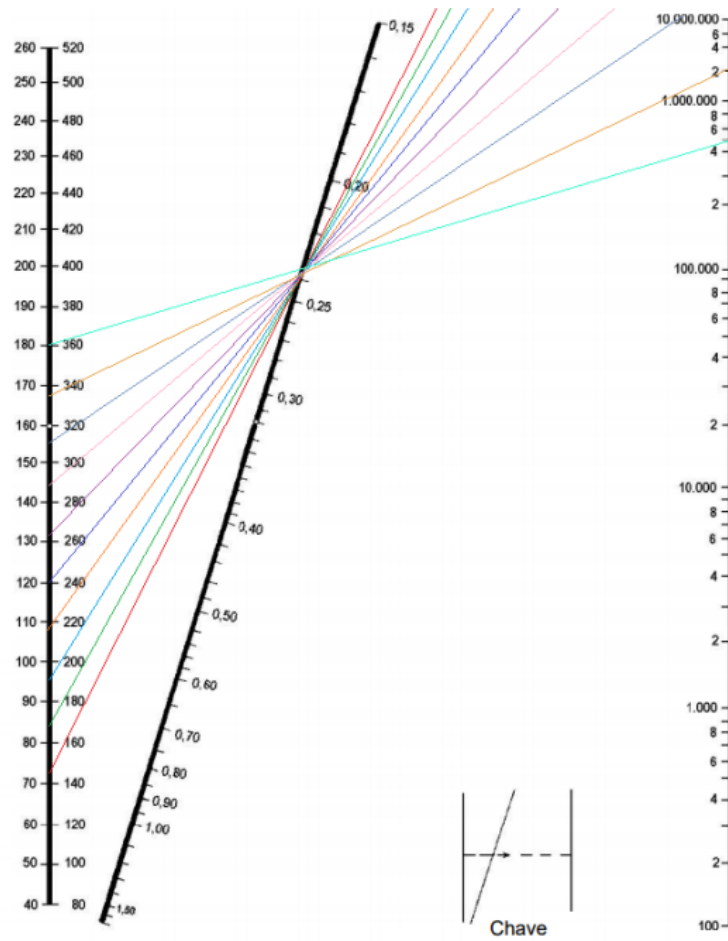


Figura 32 - Ábaco de fadiga - Eixo Tandem Duplo

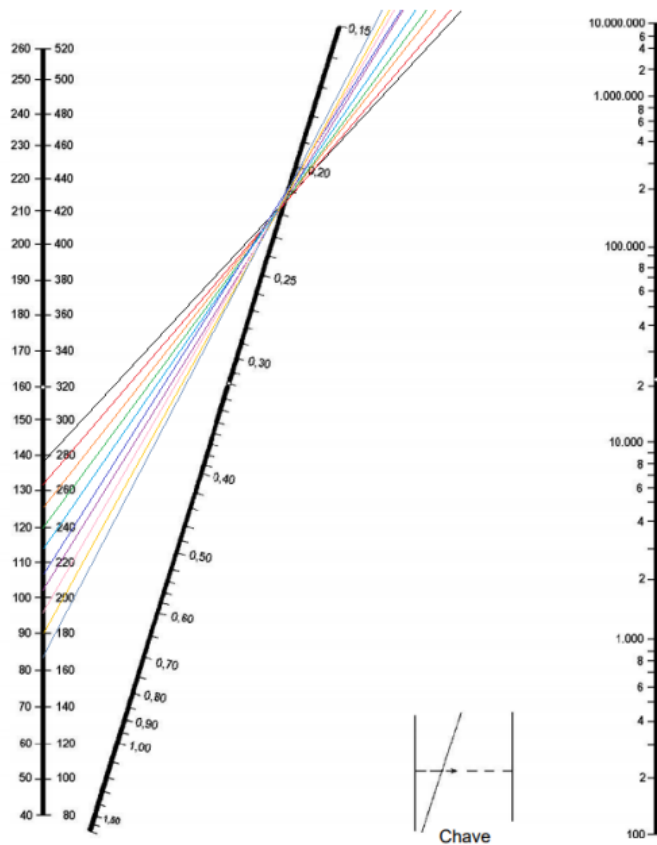
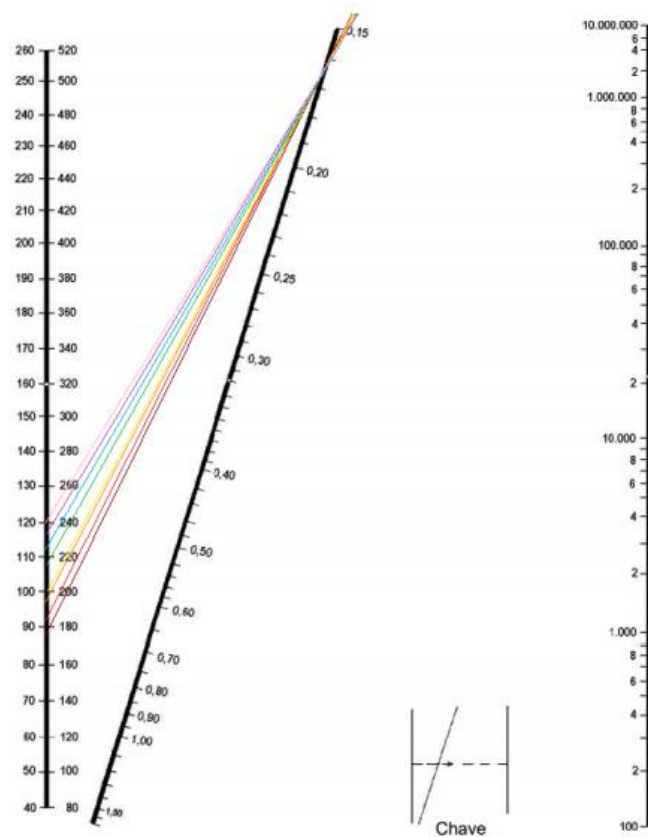


Figura 33 - Ábaco de fadiga - Eixo Tandem Triplo



De forma semelhante, para a análise dos valores de erosão, têm-se os valores de repetições admissíveis para eixos simples, apresentados na Figura 34, eixos tandem duplos na Figura 35 e eixos tandem triplos na Figura 36.

Figura 34 - Ábaco de erosão - Eixo Simples

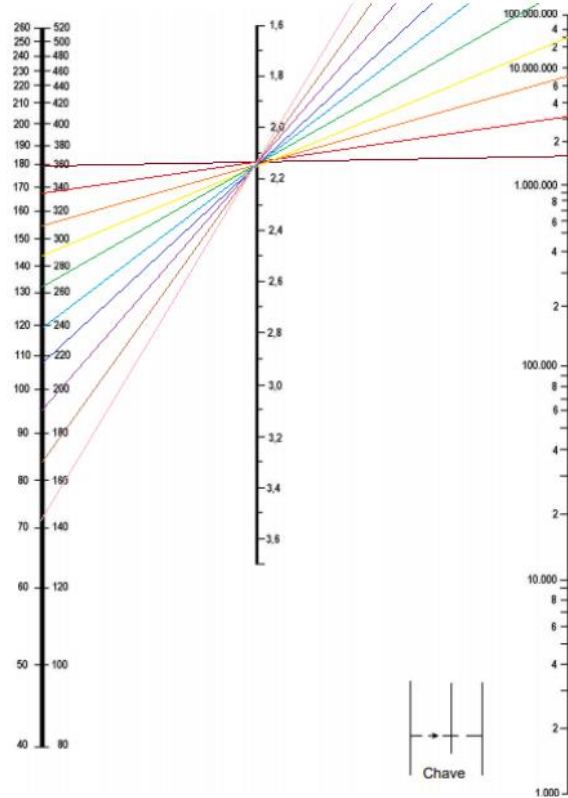


Figura 35 - Ábaco de erosão - Eixo Tandem Duplo

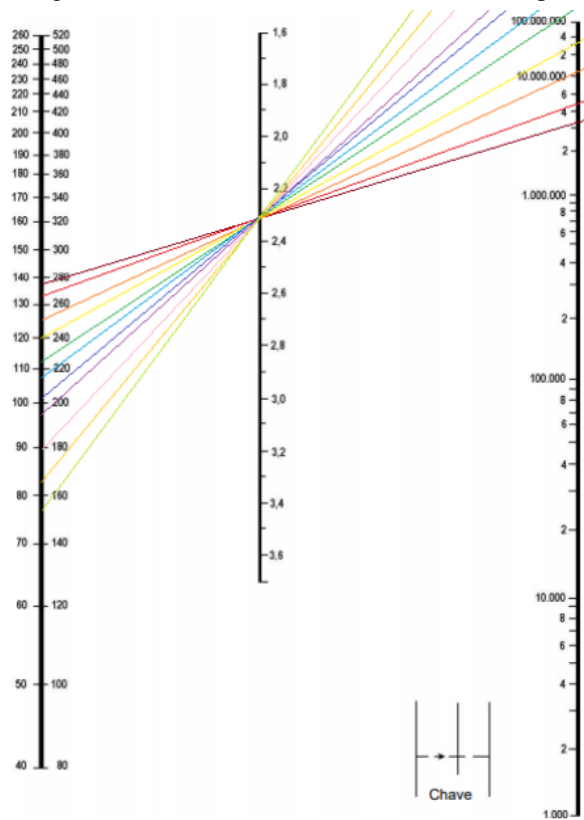
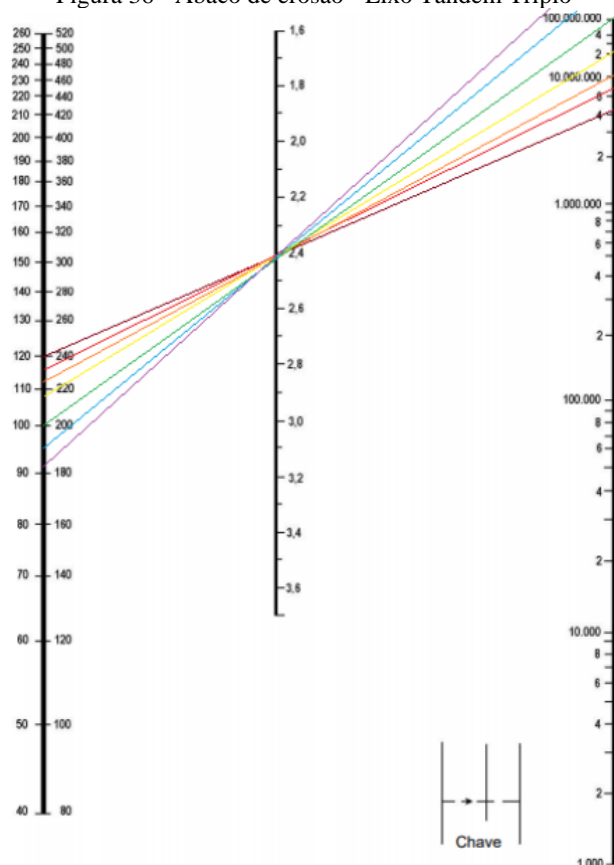


Figura 36 - Ábaco de erosão - Eixo Tandem Triplo



A partir dos valores obtidos, foram realizadas as associações mostradas nos Quadros 5, 6 e 7. O Quadro 5 mostra as análises dos eixos simples, o Quadro 6 demonstra as análises dos eixos tandem duplos e o Quadro 7 as análises dos eixos tandem triplos.

Quadro 5 - Análises eixo simples

Carga por eixo		FADIGA	0,237	Análise de fadiga		Análise de erosão	
		EROSÃO	2,13				
tf	kN	Carga x FSC	Solicitações	Solicitações Admissíveis	Consumo por fadiga	Solicitações Admissíveis	Consumo por erosão
< 6	60	72	4544085	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
7	70	84	333233	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
8	80	96	1484401	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
9	90	108	302939	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
10	100	120	442291	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
11	110	132	639201	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
12	120	144	702819	ilimitado	0,00%	30.000.000	2,34%
13	130	156	336262	ilimitado	0,00%	8.000.000	4,20%
14	140	168	442291	2.000.000	22,11%	3.000.000	14,74%
15	150	180	63617	500.000	12,72%	1.700.000	3,74%
				TOTAL	34,84%	TOTAL	25,03%

Quadro 6 - Análises eixos tandem duplos

Carga por eixo		FADIGA	0,212	Análise de fadiga		Análise de erosão	
		EROSÃO	2,30				
tf	kN	Carga x FSC	Solicitações	Solicitações Admissíveis	Consumo por fadiga	Solicitações Admissíveis	Consumo por erosão
13	130	156	3938207	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
14	140	168	333233	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
15	150	180	787641	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
16	160	192	408968	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
17	170	204	196910	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
18	180	216	823994	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
19	190	228	130264	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
20	200	240	884582	ilimitado	0,00%	60.000.000	1,47%
21	210	252	275675	ilimitado	0,00%	20.000.000	1,38%
22	220	264	133293	ilimitado	0,00%	7.000.000	1,90%
23	230	276	93911	ilimitado	0,00%	5.000.000	1,88%
				TOTAL	0,00%	TOTAL	6,64%

Quadro 7 - Análises eixos tandem triplos

Carga por eixo		FADIGA	0,160	Análise de fadiga		Análise de erosão	
		EROSÃO	2,42				
tf	kN	Carga x FSC	Solicitações	Solicitações Admissíveis	Consumo por fadiga	Solicitações Admissíveis	Consumo por erosão
22	220	88	484487	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
23	230	92	726730	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
24	240	96	686831	ilimitado	0,00%	ilimitado	0,00%
25	250	100	803678	ilimitado	0,00%	100.000.000	0,80%
27	270	108	136796	ilimitado	0,00%	20.000.000	0,68%
28	280	112	837877	ilimitado	0,00%	10.000.000	8,38%
29	290	116	644083	ilimitado	0,00%	7.000.000	9,20%
30	300	120	176695	ilimitado	0,00%	4.000.000	4,42%
				TOTAL	0,00%	TOTAL	23,48%

Para a análise do eixo triplo é dividido a carga multiplicada pelo fator de segurança por 3 e utiliza-se dos ábacos para obtenção das repetições admissíveis para eixo simples.

Assim, obteve-se que o consumo total à fadiga total foi de 34,84% e o consumo total à erosão de 55,15%. Considerando que ainda há “consumos” a serem utilizados, foi realizada uma segunda verificação. Neste caso, utilizou-se para a placa, uma espessura de 24 cm. Os cálculos foram realizados de maneira análoga. Os resultados são mostrados no Quadro 8.

Quadro 8 - Resumo de resultados para placa com espessura de 24 cm

Tensão Equivalente	
Eixo Simples	1,13
Eixo Tandem Duplo	0,99
Eixo Tandem Triplo	0,76
Fator de Fadiga	
Eixo Simples	0,252
Eixo Tandem Duplo	0,221
Eixo Tandem Triplo	0,168
Fator de Erosão	
Eixo Simples	2,18
Eixo Tandem Duplo	2,34
Eixo Tandem Triplo	2,63
FADIGA TOTAL	134,29%
EROSÃO TOTAL	362,86%

A partir dos resultados do Quadro 8, observou-se que o valor limite de 100% foi excedido , tanto para o consumo à fadiga, quanto para o consumo à erosão, o que mostra que a espessura de 24 cm de placa não é possível. Como resultado, a espessura de placa adotada é de 25 cm.

4.2 Validação das Equações

Os Quadros 9 e 10 mostram os valores obtidos de repetições admissíveis utilizando-se do método padrão apresentado pela PCA/84 em comparação com os valores obtidos para as equações do método apresentado por Lee e Carpenter. O procedimento realizado considerou o pavimento sem acostamento de concreto, com barras de transferência, 9,5 *inches* (aproximadamente 24 centímetros) de espessura, um fator de segurança de 1,2; módulo da sub-base de 130 pci (35,1 MPa/m) e o módulo de ruptura do concreto de 650 psi (45 MPa).

Quadro 9 - Comparação do método PCA com as fórmulas obtidas para análise a fadiga

Resistência a fadiga			
PCA		Equações	
Eixo simples			
Carga (kips)	Repetições Admissíveis	Carga (kips)	Repetições Admissíveis
30	27000	30	26353
28	77000	28	75901
26	230000	26	232627
24	1200000	24	1205097
22	Ilimitado	22	39972004
20	Ilimitado	20	Ilimitado
18	Ilimitado	18	Ilimitado
16	Ilimitado	16	Ilimitado
14	Ilimitado	14	Ilimitado
12	Ilimitado	12	Ilimitado
Eixos Tandem			
52	1100000	52	1164903
48	Ilimitado	48	23513514
44	Ilimitado	44	Ilimitado
40	Ilimitado	40	Ilimitado
36	Ilimitado	36	Ilimitado
32	Ilimitado	32	Ilimitado
28	Ilimitado	28	Ilimitado
24	Ilimitado	24	Ilimitado
20	Ilimitado	20	Ilimitado
16	Ilimitado	16	Ilimitado

Quadro 10 - Comparação do método PCA com as fórmulas obtidas para análise a fadiga

Resistência a erosão			
PCA		Equações	
Eixo simples			
Carga (kips)	Repetições Admissíveis	Carga (kips)	Repetições Admissíveis
30	1500000	30	1454607
28	2200000	28	2206842
26	3500000	26	3506784
24	5900000	24	5929708
22	11000000	22	10958174
20	23000000	20	23291130
18	64000000	18	64211588
16	Ilimitado	16	Ilimitado
14	Ilimitado	14	Ilimitado
12	Ilimitado	12	Ilimitado
Eixos Tandem			
52	920000	52	921227
48	1500000	48	1476168
44	2500000	44	2503721
40	4600000	40	4592541
36	9500000	36	9467633
32	24000000	32	23787906
28	92000000	28	91832816
24	Ilimitado	24	Ilimitado
20	Ilimitado	20	Ilimitado
16	Ilimitado	16	Ilimitado

A partir dos resultados mostrados nos Quadros 9 e 10, pôde-se concluir que os valores obtidos em ambas estão próximos, desta forma não há problema na utilização das fórmulas para a obtenção dos valores de repetições admissíveis.

4.3 Aplicativo ConcrePav

A Figura 37 mostra a tela inicial do aplicativo desenvolvido, onde os dados de resistência a tração na flexão do concreto, o Índice de Suporte Califórnia (CBR) do solo, a projeção de crescimento do tráfego, o tipo de sub-base e espessura adotado, o coeficiente de segurança, a presença ou não de barras de transferência e acostamento de concreto são inseridos.

Figura 37 - Página inicial do ConcrePav

ConcrePav

DADOS **TRÁFEGO**

Fct do concreto CBR (%)

Projeção de crescimento (%)

Tipo de sub-base : Espessura (cm)

Granular 10

Solo-cimento 15

Solo melhorado 20

Concreto rolado 30

Tipo de carga :

[Clique aqui para selecionar](#)

Transferência de carga:

Barras de transferência

Entrosagem de agregados

Presença de acostamento de concreto:

Com acostamento Sem acostamento

CALCULAR

A Figura 38 ilustra a tela onde é inserido o valor do volume de tráfego previsto para o primeiro ano de uso da rodovia, para eixos simples, tandem duplos e tandem triplos.

Figura 38 - Tela de inserção de dados do tráfego

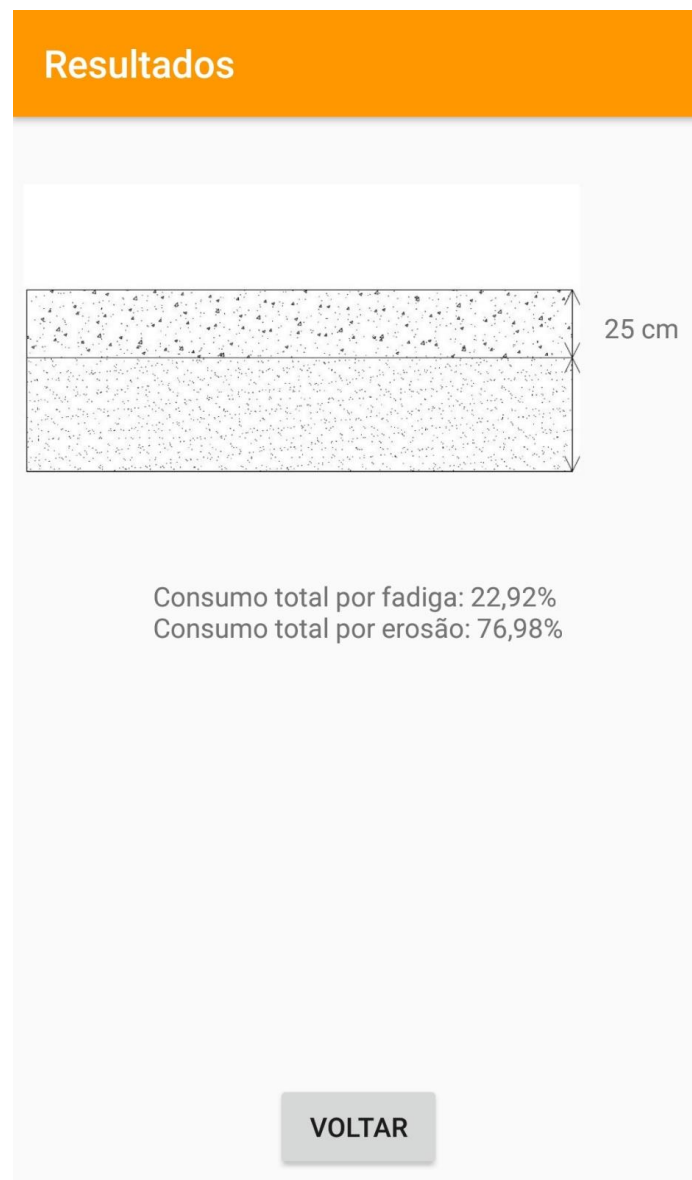
ConcrePav

DADOS
TRÁFEGO

EIXO SIMPLES	EIXO TD	EIXO TT
Carga por eixo (t)	Repetições	
< 6	0	
7	0	
8	0	
9	0	
10	0	
11	0	
12	0	

A Figura 39 ilustra a tela de resultados, onde é mostrada a espessura necessária do revestimento de concreto simples, o consumo total por fadiga e o consumo por erosão, obtendo o mesmo resultado da espessura do pavimento de concreto simples pelo cálculo da PCA/84. No entanto, o resultado do consumo total à fadiga e à erosão, obtidos, não foi similar (34,84% para fadiga e 55,15% para erosão no método da PCA/84 e 22,92% para fadiga e 76,98% para erosão no aplicativo). A diferença entre eles foi de 11,92% e de 21,83% respectivamente. Esta divergência pode ser explicada, uma vez que ocorrem aproximações inerentes em ambos os métodos; nos cálculos, os ábacos do método PCA/84 não são originais (são cópias) e possuem distorções que geram erros; as tabelas do método PCA/84 são por vezes diferentes em literaturas consultadas, sem que se possa ter a confiança da fonte que as originou; o uso do aplicativo pode necessitar de refinamento da interface.

Figura 39 - Tela de resultados



Com o aplicativo ConcrePav foi possível calcular a espessura necessária para pavimentos simples de concreto de maneira muito mais rápida e eficiente, quando comparado com o método apresentado pela PCA de 1984. É possível ainda variar os dados de entrada como a espessura e o tipo da sub-base e obter o dimensionamento do PCS de maneira intuitiva, podendo, desta maneira, obter os parâmetros que levam ao menor custo do pavimento, haja visto que uma qualquer variação no concreto, espessura e tipo da sub-base e/ou presença de barras de transferência ou acostamento de concreto pode levar a uma grande variação no custo da obra, já que uma rodovia geralmente apresenta grandes dimensões lineares. O Quadro 11 mostra um comparativo entre o aplicativo ConcrePav e o método PCA/84.

Ainda, quanto ao método da PCA/84 pode-se afirmar que o mesmo apresenta alguns problemas, uma vez que diferentes literaturas trazem tabelas com valores ligeiramente diferentes e os ábacos acabam por perder sua validade devido as repetidas cópias e transcrição do sistema de medidas. Este trabalho foi uma primeira tentativa de melhorar o cálculo e deixá-lo mais veloz, o aplicativo ainda pode ser aperfeiçoado, com equações mais exatas, obtendo-se resultados mais precisos, com uma *interface* melhorada, etc.

Quadro 11 - Comparação entre o aplicativo ConcrePav e o método PCA/84

Métodos	ConcrePav	PCA/84
Processo	Automatizado	Iterativo, necessita de várias tentativas
Meio de obtenção dos resultados	Equações	Tabelas e ábacos
Velocidade de obtenção dos resultados	Rápida	Demorada
Possibilidade de comparação de resultados imediatamente	Sim	Não

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

5.1. Considerações Finais

O método de dimensionamento de pavimentos de concreto simples utilizado no Brasil foi desenvolvido ainda na década de 1980, com o uso de tabelas e ábacos. O método apresenta algumas dificuldades e falhas, pois além de serem um processo iterativo, diferentes literaturas trazem tabelas com valores distintos e os ábacos possuem variações devido à mudança do sistema de medidas utilizadas e acabaram por perder sua validade devido à quantidade de cópias realizadas.

O objetivo do trabalho foi desenvolver uma maneira mais simples, didática e atrativa para o dimensionamento dos pavimentos simples de concreto. Visou-se reduzir possíveis erros e falhas quando do uso de ábacos e tabelas. O refinamento do aplicativo poderá conduzir um dimensionamento adequado, o que diminuirá potenciais patologias dos pavimentos rígidos decorrentes de um inadequado dimensionamento. Além disto, a facilidade de uso é grande, uma vez que é feito através de um aplicativo para celulares com sistema operacional *Android*.

O aplicativo foi desenvolvido com o uso do programa *Android Studio* utilizando-se da linguagem de programação Java. Devido à dificuldade de inserir as tabelas e ábacos no algoritmo do aplicativo para o dimensionamento do pavimento, foi buscado na literatura equações que descrevem os dados obtidos por meio dos ábacos e tabelas e foram encontradas em artigos internacionais. Com as equações foi possível fazer o dimensionamento da espessura necessária para o pavimento de uma maneira mais direta, com o auxílio de fatores de correção.

Os engenheiros devem não apenas saber utilizar de *softwares* e aplicativos para cálculos e dimensionamentos, é evidente que a tecnologia vem ajudando cada vez o ramo da engenharia, entretanto não podemos ficar reféns da mesma. É importante que os profissionais conheçam as teorias e os métodos por traz desses programas computacionais para que possíveis erros não passem despercebidos.

Com o uso da tecnologia e linguagem de programação foi desenvolvido o aplicativo *ConcrePav* possibilitando o dimensionamento de pavimentos simples de concreto com o uso de celulares. Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que o aplicativo apresentou resultados semelhantes aos obtidos através do método da *Portland Cement Association* de 1984 de uma maneira mais rápida e atual.

O aplicativo desenvolvido, se utilizado corretamente, minimiza possíveis patologias em revestimentos rígidos devido o sub-dimensionamento, torna o uso desse tipo de pavimento mais atrativo e serve de exemplo para o desenvolvimento de outros aplicativos semelhantes para outros tipos de revestimentos.

5.2. Recomendações para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros é recomendado o desenvolvimento de aplicativos semelhante para o dimensionamento de outros tipos de revestimento rígido, como o estruturalmente armado e o *whitetopping* e também para pavimentos flexíveis. Pode-se também desenvolver os aplicativos se utilizando de linguagens de programação diferentes bem como para outros sistemas operacionais de celular como o IOS. Finalmente, sugere-se o refinamento do aplicativo desenvolvido.

REFERÊNCIAS

AKISHINO, Pedro. **Apostila do Curso de Graduação em Engenharia Civil: Introdução à Engenharia de Tráfego**. Universidade Federal do Paraná, 2015.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **Tag Achieves: pavement design**. 2018. Disponível em: <http://www.acpa.org/tag/pavement-design/>. Acesso em: 10 set. 2018.

ARAÚJO, Marcelo Almeida; et. al. **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, ANO 1. VOL. 10, Pp. 187-196. Novembro de 2016 – ISSN.2448-0959

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. 472 p.

BATISTA, Ciro de Freitas Nogueira. **Pavimentação**. Porto Alegre, Globo; Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material escolar, 1976.

BRITO E GAEFF. **Métodos de dimensionamento de Pavimentos – Metodologias e seus impactos nos Projeto de Pavimentos Novos e Restaurações**. Prime Engenharia e Consultoria LTDA. 2009. Disponível em: <http://www.triunfoconcepa.com.br/upload/anexo/57c54874ca4d4ac5.pdf>. Acesso em: 15 set. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT 061/2004 **PRO. Pavimento rígido – Defeitos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2004. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT 062/2004 **PRO. Pavimento rígido – Avaliação objetiva – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004. 29 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT **Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro, 2006. 384 p. (IPR. Publi., 723).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT **Manual de Recuperação de Pavimentos Rígidos**. Rio de Janeiro, 2010. 140 p. (IPR. Publi., 737).

KICI E TIĞDEMİR. **A User Friendly Software for Rigid Pavement Design**, International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS) Vol.9, Issue 4 (2017)1-16

LEE E CARPENTER. **PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design**, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 4, No. 4, pp. 293-300 (2001)

LOTURCO, Bruno. **Pavimento rígido**. Revista Técnica ed. 102; 2005. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/102/artigo286026-1.aspx>. Acesso em: 10 set. 2018.

MAPA DA OBRA. Votorantim Cimentos, **Pavimentos rígidos: solução para corredores de ônibus**, 2016. Disponível em: <http://www.mapadaobra.com.br/inovacao/pavimento-rigido-para-corredores-de-onibus>. Acesso em: 10 set. 2018.

PITTA et. al. **Materiais para pavimentos de concreto simples**. 5.ed. São Paulo, ABCP, 1999.

PITTA, Márcio Rocha. **Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84**. 3.ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Vol. 2, 1 ed., São Paulo: Pini, 1997. 688 p.

SILVA, Paulo Fernando A. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 2 eds. São Paulo: Pini, 2008.

Suh, C., Kim, D., e Won, M. C. (2008). **Development of the Thickness Design for Concrete Pavement Overlays over Existing Asphalt Pavement Structures**. Centro de Pesquisa de Transportes, The University of Texas at Austin Austin, TX.

YODER e WITCZAK. **Principles of Pavemet Design**. 1975