

UNIEVANGÉLICA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ANÁPOLIS

DANILLO DA FONSECA REIS

**METODOLOGIAS PARA DIMENSIONAMENTO
DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE RODOVIAS**

ANÁPOLIS-GO, 2013

DANILLO DA FONSECA REIS

**METODOLOGIAS PARA DIMENSIONAMENTO
DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE RODOVIAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora do Centro Universitário de Anápolis, como requisito obrigatório para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Dr. Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos.

ANÁPOLIS-GO, 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

REIS, DANILLO DA FONSECA.

Metodologias para Dimensionamento de Pavimentos Rígidos de Rodovias [Goiás] 2013
xi, 99P, 297 mm (Unievangélica, Bacharel, Engenharia Civil, 2013).

TCC - Unievangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Pavimentos rígidos

2. Pavimentos rodoviários

3. Dimensionamento de pavimentos

4. Pavimento de concreto

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REIS, D. F. Metodologias para Dimensionamento de Pavimentos Rígidos de Rodovias. TCC, Publicação ENC. PF-001A/13, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 99p. 2013.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Danilo da Fonseca Reis

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:
Metodologias para Dimensionamento de Pavimentos Rígidos de Rodovias.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2013

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

Danillo da Fonseca Reis

Endereço Permanente

75 120 260 - Anápolis/GO - Brasil

DANILLO DA FONSECA REIS

METODOLOGIAS PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE RODOVIAS

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

APROVADO POR:

BENJAMIM JORGE RODRIGUES DOS SANTOS, Doutor (Unievangélica)
(ORIENTADOR)

ISA LORENA SILVA BARBOSA, Mestre (Unievangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)

JULLIANA SIMAS RIBEIRO, Mestre (Unievangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 10 de DEZEMBRO de 2013.

Dedico este trabalho ao meu pai, Ronaldo Borges dos Reis (in memoriam), minha mãe e irmão, aos meus familiares, aos meus amigos, que contribuíram com todos seus esforços para a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas bênçãos que me concedeu, por ter me guiado nesse caminho cheio de barreiras, mais mesmo assim não me deixou desistir, me dando força e confiança nas minhas decisões, para que eu pudesse chegar até, terminando mais uma fase da minha vida, iluminando meu caminho. Segundo, agradeço ao meu pai (in memoriam), que me deu forças e acreditou em mim, me protegeu e se sacrificou para que eu pudesse chegar aqui, sei que ele está me protegendo e olhando por mim seja onde estiver. Agradeço a minha mãe que nos momentos mais difíceis de nossas esteve forte por ela e por nós, por ter feito tudo que podia para que pudesse realizar meus sonhos. Agradeço aos amigos mais próximos que me acompanharam nesta longa caminhada, e que me deram atenção e companhia enquanto eu longe de meus familiares. Agradeço a todas as pessoas que me ajudaram no desenvolvimento e conclusão deste trabalho, e em especial ao Prof. Dr. Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos, docente do Centro Universitário de Anápolis, pelo empenho, dedicação e auxílio durante todo o processo deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho sobre pavimentos de concreto veremos a origem das estradas e vias que eram utilizadas para vencer distâncias e no auxílio o transporte de materiais e mercadorias. Com o tempo elas se evoluíram, melhoraram e se fixaram de forma fundamental na sociedade. Com isso se fez necessário a criação de novos métodos de pavimentação que atendam a necessidade como o pavimento asfáltico e o pavimento rígido. Os pavimentos rígidos são divididos em vários tipos e com características próprias. Eles são divididos em pavimento simples, armados, armadura contínua, protendido, pré-moldado, *whitetopping* e *whitetopping* ultradelgado. Cada um deles com características para situações específicas podendo ser usados para diversos fins como em rodovias que possuam um tráfego pesado e que se exijam grandes esforços à tração na flexão. O *whitetopping* por exemplo é um processo utilizado para recuperação de pavimentos asfálticos que estão degradados e esse processo é uma solução bastante viável para esse tipo de problema. Os pavimentos de concreto tem várias normas e órgãos responsáveis por sua execução como a ABCP (brasileira) e ACPA (americana) que estudam e desenvolvem estudos sobre o pavimento rígido. Os pavimentos de concreto simples possui a *Portland Cement Association*, um órgão responsável pela criação de processos de dimensionamento de espessuras que atendam as suas solicitações. Possui a PCA de 1966 e a atualização da mesma de 1984. Neste trabalho veremos o desenvolvimento de estudos, de aplicações e do comparativo entre esses métodos mostrando que mudou e o que melhorou.

Palavras-chave: Pavimentos rígidos, concreto, cimento e resistência

ABSTRACT

In this project about concrete pavements we will see the origin of the roads and paths were used to overcome distance and aid the transportation of materials and goods. Over time they evolved, improved and fixed in a fundamental way in society. Thus the creation of new methods of paving that meet the need as the asphalt pavement and rigid pavement was necessary. The rigid pavements are divided into several types and own characteristics. They are divided into simple, armed precast pavement, continuous reinforcement, prestressed, whitetopping and ultra thin whitetopping. Each features for specific situations can be used for various purposes such as in roads that have heavy traffic and require major efforts to traction in flexion. The whitetopping for example is a process used for recovery of asphalt pavements that are degraded and this process is a very viable solution to this problem. The concrete pavement has several standards and bodies responsible for its implementation as ABCP (Brazilian) and ACPA (American) studying and developing studies on rigid pavement. The plain concrete pavements has the Portland Cement Association, an organ responsible for creating processes sizing thicknesses that meet their requests . PCA has the 1966 and update the same in 1984. In this project we will see the development of studies, applications and comparative entres showing these methods has changed and what has improved.

Keywords: Rigid pavements, concrete, cement and resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Linha do tempo das civilizações precursoras da pavimentação	8
Figura 2.2 - Estrada usada por trenós destinados ao transporte de cargas	9
Figura 2.3 - Via Ápia em Roma	9
Figura 2.4 - Linha do tempo das principais associações relacionadas à pavimentação	10
Figura 2.5 - Estrada Caminho do Mar no século 20	11
Figura 2.6 - Perfilógrafo tipo Califórnia.....	11
Figura 2.7 - Texturizadora de pavimento de concreto.....	12
Figura 2.8 - III Perimetral - Porto Alegre/RS.....	12
Figura 2.9 - Aeroporto	13
Figura 2.10 - Rodovia Imigrantes SP	13
Figura 2.11 - BR - 290 <i>Free Way</i> em Porto Alegre (RS).....	13
Figura 2.12 - Seção transversal típica de pavimento flexível.....	14
Figura 2.13 - Pavimento semirrígido com camada asfáltica e com base estabilizada quimicamente (cal, cimento)	16
Figura 2.14 - Via pavimentada de concreto de cimento <i>Portland</i> (CCP).....	16
Figura 2.15 - Distribuição da tensão vertical em um pavimento rígido	17
Figura 2.16 - Pavimentadora Tipo SP 1200	20
Figura 2.17 - Distribuição de cargas no pavimento flexível.....	20
Figura 2.18 - Distribuição de cargas no pavimento rígido	21
Figura 2.19 - Estrutura básica de um pavimento de concreto simples com BT	23
Figura 2.20 - Eficiência das barras de transferência.....	24
Figura 2.21 - Estrutura de pavimento de CCP com lona de polietileno	25
Figura 2.22 - Lançamento de concreto a ser compactado com rolo	26
Figura 2.23 - Concreto compactado com Rolo.....	27

Figura 2.24 - Concreto compactado com Rolo.....	28
Figura 2.25 - Placas Pré-moldadas	31
Figura 2.26 - Aplicação da Técnica <i>Whitetopping</i> sobre o pavimento flexível	31
Figura 2.27 - Rodovia BR - 290 <i>Free Way</i> - Porto Alegre/RS.....	33
Figura 2.28 - Aplicação do <i>inlay</i>	35
Figura 2.29 - Sistemas de moldagem sobreposta (A) e encaixada (B).....	36
Figura 3.1 - Relação entre Índice de Suporte Califórnia (CBR) e coeficiente de recalque (k) do subleito	41
Figura 3.2 - Posições de carga e distribuição do tráfego	42
Figura 3.3 - Aumento de k devido à presença de sub-base granular	43
Figura 3.4 - Aumento de k devido à presença de sub-base de brita tratada com cimento.....	44
Figura 3.5 - Aumento de k devido à presença de sub-base de solo-cimento.....	45
Figura 3.6 - Aumento de k devido à presença de sub-base de concreto rolado.....	46
Figura 3.7 - Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos simples).....	47
Figura 3.8 - Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos tandem duplos).....	48
Figura 3.9 - Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos tandem triplos)	49
Figura 3.10 - Curvas de Fadiga	51
Figura 3.11 - Posições críticas de carga	52
Figura 3.12 - Análise de fadiga - Número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga (com ou sem acostamento de concreto).....	56
Figura 3.13 - Análise de erosão - Número de repetições admissíveis de carga com base no fator de erosão (sem acostamento de concreto)	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Camadas constituintes do pavimento asfáltico..... 15
 Quadro 2.2 - Camadas constituintes do pavimento rígido..... 18
 Quadro 2.3 - Aplicações do Pavimento de Concreto 19
 Quadro 2.4 - Vantagens e desvantagens..... 21
 Quadro 2.5 - Tipos de Pavimentos de Concreto 22
 Quadro 2.6 - Desempenho do WT nos EUA 33
 Quadro 2.7 - Processo técnico básico de um pavimento WT 34
 Quadro 3.1 - Fatores de segurança para as cargas (FSC) 42
 Quadro 3.2 - Fatores de segurança para as cargas (FSC) 53
 Quadro 3.3 - Tensão equivalente para eixos simples e tandem duplos (MPa)..... 54
 Quadro 3.4 - Tensão equivalente para eixos tandem triplos (MPa) 54
 Quadro 3.5 - Fator de erosão para eixos simples e tandem duplos (MPa) 55
 Quadro 3.6 - Fator de erosão para eixos tandem triplos (MPa)..... 55
 Quadro 4.1 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (20 cm)..... 67
 Quadro 4.2 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (19 cm)..... 68
 Quadro 4.3 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (18,5 cm)..... 69
 Quadro 4.4 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (20 cm)..... 73
 Quadro 4.5 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (23 cm)..... 74
 Quadro 4.6 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (24 cm)..... 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Relação de tensões e número admissível de repetições de carga	39
Tabela 3.2 - Relação aproximada entre o tipo do solo do subleito e o coeficiente de recalque (k)	40
Tabela 4.1 - Distribuição percentual do tráfego por classe de veículo conforme o DNER:	59
Tabela 4.2 - Solicitações de eixos	60
Tabela 4.3 - Carros de passeio (C)	61
Tabela 4.4 - Ônibus (O).....	61
Tabela 4.5 - Caminhões leves (C_L).....	61
Tabela 4.6 - Caminhões médios (C_m).....	62
Tabela 4.7 - Caminhões pesados (C_p)	62
Tabela 4.8 - Reboques e Semi-reboques (R)	63
Tabela 4.9 - Somatório das frequências dos tipos de veículos para cada carga por eixo	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 - Tráfego médio diário final (V_p).....58

Equação 3.2 - Tráfego médio diário durante o período de projeto (V_m)58

Equação 3.3 - Número total de veículos durante o período de projeto (V_t)58

Equação 3.4 - Número de solicitações de eixo por classes de veículo (N)58

Equação 3.5 - Frequência das cargas por eixo por classe de veículo (N_{ji}).....58

LISTA DE SÍMBOLOS

k - coeficiente de recalque na base

k_{ab} - coeficiente de recalque do sistema (topo)

$F_{ctM,k}$ - Resistência característica à tração na flexão

V_0 - volume diário de veículos

t - Taxa de crescimento de tráfego em progressão aritmética

P - Período de projeto

P_{ji} - Porcentagem de veículos

V_p - Tráfego médio diário final

V_m - Tráfego médio diário durante o período de projeto

V_t - Número total de veículos durante o período de projeto

N - Número de solicitações de eixo por classes de veículo

N_{ji} - Frequência das cargas por eixo por classe de veículo

F_e - Fator de eixo

C_{RF} - Consumo de resistência à Fadiga

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. PROBLEMA.....	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo Geral	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. JUSTIFICATIVA	5
1.5. METODOLOGIA DE TRABALHO.....	6
1.6. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	7
2 REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1. HISTÓRIA DA PAVIMENTAÇÃO MUNDIAL	8
2.2. HISTÓRICO BRASILEIRO.....	10
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS	14
2.3.1. TIPOS DE PAVIMENTO.....	14
2.3.1.1. Pavimento Flexível (Asfáltico).....	14
2.3.1.2. Pavimento Semirrígido (Semi-Flexível).....	15
2.3.1.3. Pavimento Rígido	16
2.4. OS PAVIMENTOS RÍGIDOS	17
2.5. TIPOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO	21
2.5.1. PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLES (PCS)	23
2.5.2. PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADO (PCA)	27
2.5.3. PAVIMENTO DE CONCRETO COM ARMADURA CONTÍNUA (PCAC).....	29
2.5.4. PAVIMENTO DE CONCRETO PROTENDIDO (PCPRO).....	29
2.5.5. PAVIMENTO DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO (PCPM).....	30
2.5.6. <i>WHITETOPPING</i> (WT).....	31
2.5.6.1. Inlay	35
2.5.7. <i>WHITETOPPING</i> ULTRADELGADO (WTUD)	35
3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO.....	37

3.1. ESTUDO DOS MÉTODOS DA <i>PORTLAND CEMENT ASSOCIATION</i> (PCA) DE 1966 E 1984	37
3.1.1. <i>PORTLAND CEMENT ASSOCIATION</i> (PCA) DE 1966	37
3.1.1.1. Características do Concreto	38
3.1.1.2. Suporte da Fundação (Subleito)	39
3.1.1.3. Tráfego - Tensões Devidas às Cargas.....	41
3.1.1.4. Tráfego - Fatores de Segurança para Cargas	42
3.1.1.5. Coeficiente de Recalque	42
3.1.2. <i>PORTLAND CEMENT ASSOCIATION</i> (PCA) DE 1984	50
3.1.2.1. PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO	51
3.1.2.2. PARÂMETROS - DIMENSIONAMENTO	51
3.1.2.2.1. Modelos de Ruína - Fadiga	51
3.1.2.2.2. Modelos de Ruína - Erosão.....	52
3.1.2.2.3. Características do Concreto	52
3.1.2.2.4. Acostamento De Concreto	53
3.1.2.2.5. Barras de Transferência	53
3.1.2.2.6. Fatores de Segurança para Cargas	53
3.1.2.2.7. Coeficientes de Recalque.....	53
3.2. BREVE ROTEIRO DE CÁLCULO DO TRÁFEGO.....	58
4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS	59
4.1. MÉTODO PCA 1966.....	65
4.2. MÉTODO PCA 1984.....	70
5 COMPARATIVO DOS MÉTODOS PCA	76
6 CONCLUSÃO.....	78
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os primeiros a usarem o pavimento de concreto foram os ingleses em 1865, mas sua construção teve início só em 1894 quando chegou ao seu sucesso nos Estados Unidos. Esses países usaram pouco do pavimento rígido nessa época por falta suporte tecnológico e técnico e por isso os resultados não foram satisfatórios, já que o cimento em obras suporta bem á cargas estáticas e não apresentava os mesmos resultados sob cargas dinâmicas e repetidas. Quando o pavimento rígido passou a ter em seu desenvolvimento esses fatores e considerando todos outros fatores é que passaram a ser usados.

Nos Estados Unidos e na Alemanha e em outros países antes da Segunda Guerra Mundial, o pavimento de concreto foi muito usado nas estradas. Nessa época havia uma boa porcentagem das estradas desses países em pavimento de concreto e logo após a guerra esse percentual aumentou nas vias urbanas e também nas vias rurais. No Peru na cidade de Lima uma das principais e mais extensas avenidas, a Avenida Javier Prado não levou em contas os fatores anteriormente ditos, além das trincas e da retração causando trincas longitudinais e transversais comprometendo toda via pavimentada.

Para a escolha do uso do pavimento rígido no Brasil têm-se algumas características que fazem dele uma opção cada dia mais atribuído nas vias de transporte como resistência, menor custo de manutenção, mais economia na iluminação pública por ter uma coloração clara evitando acidentes, durabilidade com uma vida útil aproximada de trinta anos.

Por ter características tão importantes na sua execução e manutenção vem sendo um recurso bastante usado na construção e reforma de vários meios de transporte, aeroportos, heliportos e avenidas e estradas. Pela sua necessidade cada vez mais presente no Brasil, meios diferenciados de uso e aplicação foram desenvolvidos como o método *Whitetopping*.

Este trabalho apresenta um estudo sobre as técnicas construtivas do pavimento de concreto de cimento Portland (CCP). A Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP) se dedica a em estudos tecnológicos de processos construtivos a base de cimento durável, e um desses processos construtivos é o *Whitetopping* que consiste na execução do pavimento rígido

sobre o pavimento flexível, que o utiliza com base, sem necessidade de sua remoção, para a recuperação de rodovias.

O engenheiro e presidente da Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP) Renato Giusti, comenta em um de seus artigos que: “O Brasil vem passando por grandes transformações nas últimas duas décadas. Com a estabilidade econômica e política, o país recuperou a credibilidade internacional, conquistou o título de grau de investimento pelas agências de avaliação, botou de pé um plano de crescimento de longo prazo, e cada vez mais tem recebido investimentos estrangeiros. Além disso, vai sediar grandes eventos que não só aumentam a exposição do Brasil, mas abrem novas oportunidades de investimento, principalmente em infraestrutura.” E por causa de todo esse desenvolvimento o Brasil se tornou um canteiro de obras, que vão de praças e ruas até a construção de aeroportos e estradas.

1.2. PROBLEMA

Aqui no Brasil o asfalto é usado em praticamente todo lugar por ter alguns pontos que fazem dele uma escolha mais definida por ter uma execução rápida percorrendo grandes distâncias em menor tempo, prática e custo baixo em relação ao pavimento de concreto de cimento *Portland*, entretanto possui problemas decorrentes de seu uso, de acordo com a (ABESC), o calor que faz que ele se deforme e causa trincas e ao contato com a água da chuva infiltra e passa para as camadas abaixo danificando a instabilidade do pavimento, outro motivo é a transito de veículos pesados fazendo com que seu desgaste seja maior. O pavimento de concreto não sofre com tais problemas por ter uma resistência maior e transferir as cargas por uma área bastante considerável evitando maiores impactos em suas subcamadas.

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso visa à importância e características dos pavimentos rígidos destacando as técnicas do pavimento de concreto de cimento *Portland* e suas metodologias de aplicação.

1.3.1. Objetivo Geral

Conhecer as diferenciadas formas disponíveis de execução do pavimento rígido no Brasil, conceitos, fases de execução e locais onde são melhores utilizados esses pavimentos, além de um estudo comparativo de dimensionamento de pavimento de concreto simples.

1.3.2. Objetivos Específicos

Apresentar as técnicas de aplicação do pavimento em concreto de cimento *Portland*;

Comparar os métodos de dimensionamento da *Portland Cement Association* (PCA) de 1966 e o de 1984, proporcionando dados característicos de cada um, modificações, atualizações e diferenças entre os resultados obtidos no dimensionamento.

1.4. JUSTIFICATIVA

Observando a malha viária brasileira atual vemos que o pavimento flexível (asfalto) é predominante em todo o terreno nacional e com o crescimento econômico necessita-se de uma reestruturação adequada para esse desenvolvimento constante.

Como as estradas brasileiras apresentam na maior parte dos trechos problemas no asfalto, causadas pelo tráfego de veículos pesados, pelo calor e chuvas que infiltram passando para as camadas abaixo danificando e dificultando o fluxo de automóveis, há necessidade dessa implantação do pavimento estrutural, para que se possa ter mais qualidade e durabilidade. Cada vez mais ela se torna uma alternativa mais viável para a recuperação asfáltica apesar de ser uma tecnologia nova em território brasileiro.

A ABCP diz que o pavimento de concreto - hoje também chamado de pavimento verde, pelas suas características de sustentabilidade - é um sistema construtivo de alta durabilidade, indicado para estradas e vias de tráfego intenso e pesado, além de portos e aeroportos. O Brasil domina essa tecnologia ambientalmente correta e já a empregou em diversas obras recentes.

Assim, este trabalho tem como justificativa, a melhoria da pavimentação no Brasil com o uso dessa nova tecnologia expondo suas vantagens e benefícios para a sociedade atual e a futura.

1.5. METODOLOGIA DE TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido primeiramente a partir de um levantamento de pesquisas e informações sobre o tema, chamada pesquisa bibliográfica.

Na parte de leitura do conteúdo adquirido foi notado que havia várias informações sobre as metodologias do pavimento verde, além de estudos e específicos sobre cada método usado hoje em dia.

No estudo de caso aplicou-se as metodologias para dimensionamento de pavimentos rígidos, porém não foi realizado nenhum acompanhamento prático, no entanto procedeu-se a comparações entre os resultados de aplicações dos métodos PCA 1966 e o PCA 1984.

1.6. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está dividido em seis capítulos distribuídos em:

No capítulo um, é exposta a introdução onde estão presentes, as considerações iniciais, o problema, o objetivo geral e os objetivos específicos, justificativa e a metodologia aplicada neste trabalho.

No capítulo dois, é abordada o referencial teórico, sobre a história da pavimentação no mundo e no Brasil desde seus primeiros indícios de existência, dos tipos de pavimentos existentes, e técnicas de aplicação do pavimento de concreto, onde se formou a toda base teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo três, apresenta o estudo entre dos dois métodos para dimensionamento de pavimentos de concreto simples da *Portland Cement Association* (PCA) de 1966 e a de 1984.

No capítulo quatro, apresenta-se a aplicação dos métodos da PCA utilizando os mesmos dados para o dimensionamento da espessura do pavimento rígido.

No capítulo cinco, foi feito um comparativo entre esses métodos, mostrando atualizações, melhorias, vantagens e desvantagens, parâmetros considerados e o que mudou do PCA de 1966 para o PCA 1984.

No capítulo cinco, tem-se a aplicação teórica desses dois métodos num dimensionamento de pavimento de concreto simples.

No capítulo seis, apresenta-se a conclusão, e as considerações finais do trabalho, salientando as modificações de um método para o outro, além de relatar as diferenças da aplicação desses métodos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. HISTÓRIA DA PAVIMENTAÇÃO MUNDIAL

Aqui será apresentado um breve histórico dos primeiros pavimentos executados que deram origem e influência para os tempos de hoje.

Seguir o histórico da pavimentação nos leva a própria história da humanidade, percorrendo as conquistas territoriais, culturas, seguimentos religiosos, urbanização e desenvolvimento.

A história, assim como o pavimento formam caminhos para avaliar o passado, desvendando os princípios de cada civilização ate os dias de hoje e o pavimento esta presente desde o inicio dos tempos onde o domínio e as conquistas significavam poder.

Conforme Senço (2007), “os precursores dos pavimentos de concreto foram os ingleses, que iniciaram a sua construção em 1865.”

Algumas das civilizações que usavam de caminhos para romper distâncias estão dispostos na linha do tempo mostrada na figura 2.1 abaixo:

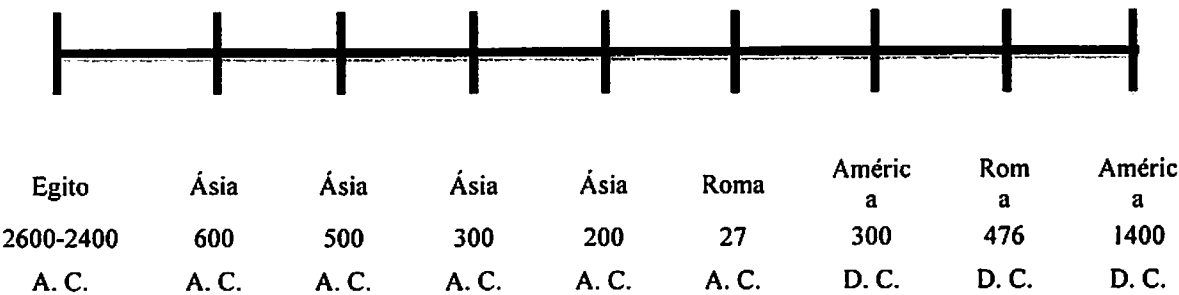


Figura 2.1 - Linha do tempo das civilizações precursoras da pavimentação

Uma das estradas mais antigas mostrada na figura 2.2 estava localizada no Egito (2600-2400 a.C.), foi destinada não para veículos com rodas, mas a trenós pesados que serviam para fazer carregamentos pesados utilizados para construção das pirâmides.



Figura 2.2 - Estrada usada por trenós destinados ao transporte de cargas

Na Ásia, estrada como a Estrada de Semíramis (600 a.C.) que era caminho entre duas cidades, a Babilônia e Ecbatana e cruzava o Rio Tigre não desapareceu apesar das centenas de anos que se passaram e transformou-se em estrada asfaltada hoje. Também pode-se falar da Estrada Real (500 a.C.) que fica na Ásia Menor que era o caminho entre Iônia (Éfeso) do Império Grego e centro do Império Persa, Susa que levou 400 anos para ser concluída com 2840 km de extensão. Além dessas, havia também, no tempo de Alexandre, o Grande (anos 300 a.C.), tinha a estrada que ligava Susa e Persépolis (aproximadamente a 600 km ao sul do que é hoje Teerã, capital do Irã), que permitia o tráfego de veículos com rodas que seguia 1.800 metros de altitude acima do nível do mar.

Os romanos não desapontaram porque há mais de 2000 anos já tinham um bom planejamento e manutenção fazendo com que tivessem uma malha viária boa, e a mais extensa foi a estrada, na figura 2.3 que percorria a Muralha de Antonino (Escócia) à Jerusalém com mais de 5000 km (Hagen 1955, 2013, *apud* UFRGS).



Figura 2.3 - Via Ápia em Roma

A Estrada da Seda não era apenas utilizada para o transporte de seda mais de ouro, marfim, animais e plantas exóticas tendo como mercadoria principal, o budismo. Era um dos caminhos de comércio mais antigos devido as grande influência nas culturas da China, Índia, Ásia e também do Ocidente. Bohong, (1989) diz que um dos principais visitantes dessa estrada e melhor documentados na história foi Marco Pólo, negociante veneziano, que iniciou suas viagens com apenas dezessete anos em 1271.

2.2. HISTÓRICO BRASILEIRO

Quando falamos em pavimento de concreto no Brasil não podemos pensar que é novidade nas vias e rodovias. Já no início do século XX, o Brasil foi um dos primeiros a adotá-los com o uso reforçado até a década de 1970 decrescendo então por aspectos das dificuldades econômico-financeiras do país.

A ABCP foi buscar o que se podia encontrar de melhor no mundo em tecnologia de pavimentação de concreto a partir dos anos 90, trazendo de volta o controle de qualidade na execução e cultura empregando os melhores e mais modernos equipamentos e capacitação profissional (ABCP). Abaixo (Figura 2.4) tem-se uma linha do tempo dos principais órgãos responsáveis pela pavimentação no Brasil e no mundo.

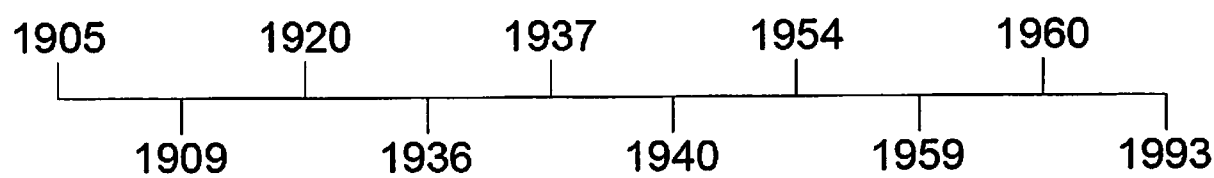


Figura 2.4 - Linha do tempo das principais associações relacionadas à pavimentação

1905 - Uso do Asfalto	1940 - USACE
1909 - Uso de placas de CCP	1954 - CNT
1920 - HRB	1959 - ABPv
1936 - ABCP	1960 - AASHO
1937 - DNER	1993 - SHRP

A Rodovia Caminhos do Mar (1925), (Figura 2.5) foi a primeira a receber pavimentação em concreto na América do Sul e uma das primeiras no mundo. No ano de 1936, a Associação Brasileira de Cimento Portland foi fundada, com o intuito de desenvolver postes, cercas e pavimentos de concreto. No ano seguinte, em 1937, a Revista Concreto foi criada para anunciar aos consumidores sobre os benefícios do pavimento de concreto (ABCP).



Figura 2.5 - Estrada Caminho do Mar no século 20

Na década de 50 o pavimento de concreto aqui no Brasil foi muito usado em vias urbanas, rodovias e aeroportos. Após a segunda Guerra Mundial, o cimento Portland passou a mais utilizado em construções civis, logo a indústria de pavimento flexível (asfalto) teve um grande salto em seu desenvolvimento graças aos preços baixos do petróleo, principalmente em equipamentos, mão de obra e novas tecnologias para execução desses pavimentos. Algumas décadas depois nos anos 90 o pavimento de concreto ressurgiu em diversos países desenvolvidos e com economia estável onde os custos são mais competitivos e que apresentaram equipamentos de alto desempenho (Figuras 2.6 e 2.7).



Figura 2.6 - Perfilógrafo tipo Califórnia



Figura 2.7 - Texturizadora de pavimento de concreto

Fonte: ABCP

No Brasil, com a implantação dos pavimentos de concreto tem-se algumas obras importantes como a III Perimetral em Porto Alegre (RS) (Figura 2.8), em Aeroportos (Figura 2.9), a Rodovia Imigrantes em São Paulo (Figura 2.10) e a recuperação da BR - 290 *Free Way* em Porto Alegre (RS) (Figura 2.11) com o uso de *Whitetopping*.

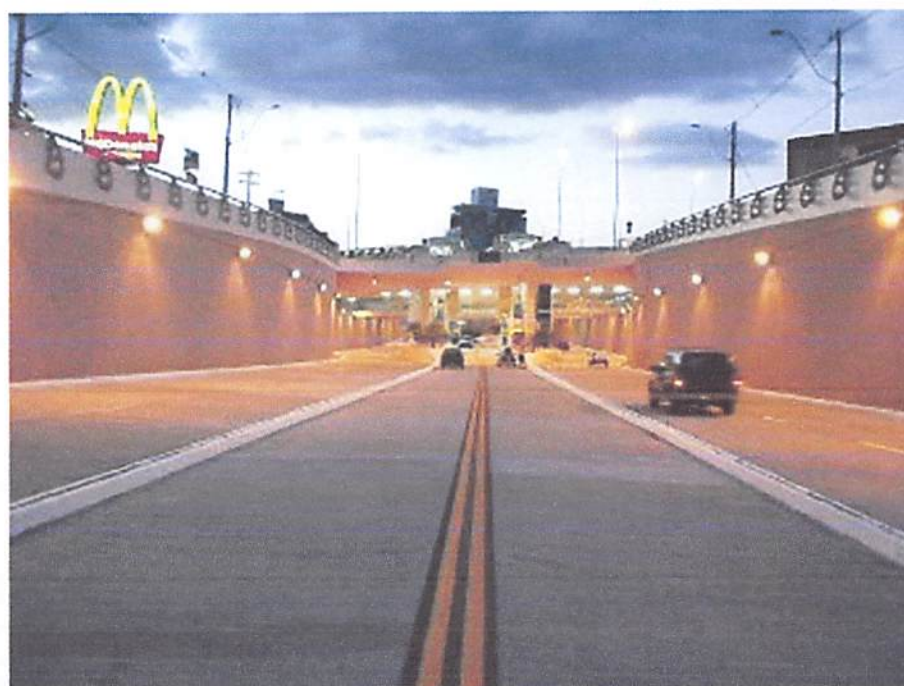


Figura 2.8 - III Perimetral - Porto Alegre/RS

Fonte: ABCP

Disponível em: <viasconcretas.org.br>



Figura 2.9 - Aeroporto

Fonte: ABCP



Figura 2.10 - Rodovia Imigrantes SP

Fonte: ABCP



Figura 2.11 - BR - 290 *Free Way* em Porto Alegre (RS)

2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Ao se falar de pavimento, que do latim “pavimentu”, uma de suas características é sua superestrutura constituída por um conjunto de camadas de espessuras assentadas sobre um espaço (infraestrutura ou fundação).

Segundo Baptista (1975), “os pavimentos rígidos são aqueles em que o ligante é constituído de cimento, e sua espessura é função da resistência à flexão das lajes.”

2.3.1. TIPOS DE PAVIMENTO

2.3.1.1. Pavimento Flexível (Asfáltico)

Revestimento de camada asfáltica (Figura 2.12) que possui base de brita ou solo e estão em geral presentes camadas de base, de sub-base, de reforço do subleito, e subleito. O reforço do subleito, a sub-base e a base (Quadro 2.1) são importantes porque tem um enorme valor estrutural.

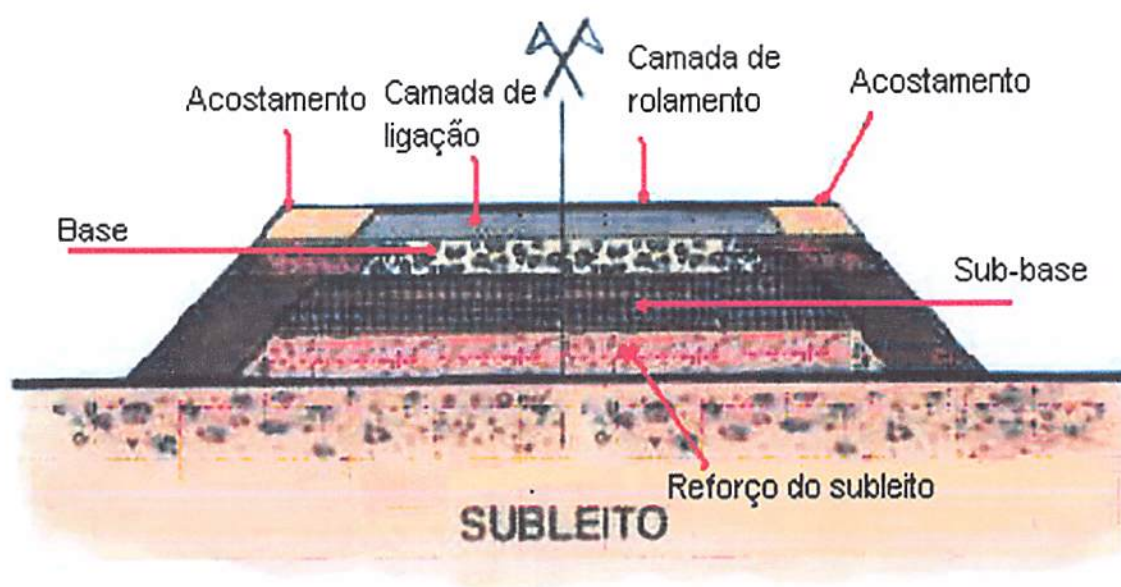


Figura 2.12 - Seção transversal típica de pavimento flexível

Fonte: UFRGS

“O asfalto é um material de cor escura e consistência sólida ou semissólida composto de mistura de hidrocarbonetos pesados onde os constituintes predominantes são os betumes, incluindo os materiais betuminosos”. (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos - ABEDA)

Quadro 2.1 - Camadas constituintes do pavimento asfáltico

SUBCAMADAS	CARACTERÍSTICAS
Subleito	Fundação onde se apoia o pavimento e devem ser consideradas espessuras onde as cargas impostas pelo tráfego atuam.
Regularização do Subleito	Destinada a corrigir as falhas do subleito, transversal e longitudinalmente (camada final da terraplenagem).
Reforço do Subleito	Camada de espessura constante no pavimento e que pelo dimensionamento é executado sobre o subleito regularizado servindo para melhorar a qualidade do subleito e regularizar a espessura da sub-base.
Leito	Superfície do subleito obtida pela terraplenagem ou e conformada ao greide e seção transversal.
Sub-base	Complementa a base e deve-se usar quando não viável executar a base sobre o subleito o sobre o reforço. Pode ser usado para regularizar a espessura da base.
Base	Camada destinada a resistir e distribuir ao subleito, os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se construirá o revestimento.

Fonte: Universidade Federal do Paraná - UFPR

O pavimento flexível é a camada superior dedicado a resistir às ações do tráfego e transmiti-las às camadas inferiores, impermeabilizando e melhorando as condições de dando conforto e segurança.

“São pavimentos flexíveis àqueles que podem sofrer deformações, dentro e certos limites, sem se romperem. São construídos em camadas de materiais granulares, sem resistência acentuada à tração e por revestimentos betuminosos delgados”.(Senço, 2008)

2.3.1.2. Pavimento Semirrígido (Semi-Flexível)

Revestimento de camada asfáltica e que possui base de cimento (Figura 2.13). Consiste numa união intermediária entre os pavimentos flexíveis e rígidos. É definido como o pavimento utiliza a ligação solo-cimento, solo-cal, solo-betme, etc., que tem uma resistência razoável apresentada às solicitações de tração. Com o aumento do módulo de elasticidade e da rigidez a base de solo-cimento absorve, bastante, partes dos esforços á tração. Exemplo: bases de solo-cimento com revestimento em camada asfáltica.



Figura 2.13 - Pavimento semirrigido com camada asfáltica e com base estabilizada quimicamente (cal, cimento)
(Fonte: UFRGS)

Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/petengcivil/Arquivos/Materiais/aula1-Introducao.pdf>>

2.3.1.3. Pavimento Rígido

Revestimento com placas de concreto de Cimento *Portland* (Figura 2.14) e sua espessura é definida em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das subcamadas.



Figura 2.14 - Via pavimentada de concreto de cimento *Portland* (CCP)
(Fonte: ABCP)

São aqueles que revestimento tem uma elevada rigidez se relacionado às camadas inferiores e, portanto, absorve quase todas as tensões vindas do carregamento dos rolamentos

características da sua estrutura semelhantes a do pavimento flexível dimensionado em sub-base, subleito e o revestimento de concreto (Quadro 2.2).

Segundo Senço (2007), “pavimentos rígidos são aqueles que têm sensível rigidez à flexão não podem sofrer deformações sem se romper, trabalhando, assim, à tração e se caracteriza por ter na resistência à tração o fatorpreponderante para o dimensionamento”.

Quadro 2.2 - Camadas constituintes do pavimento rígido

SUBCAMADAS	CARACTERÍSTICAS
Subleito	Fundação onde se apoia o pavimento e devem ser consideradas espessuras onde as cargas impostas pelo tráfego atuam.
Sub-base	Complementa a base e deve-se usar quando não viável executar a base sobre o subleito o sobre o reforço. Pode ser usado para regularizar a espessura da base.

Fonte: Universidade Federal do Paraná - UFPR

O pavimento de concreto, que também é chamado de “pavimento verde”, é opção que atende as solicitações ambientais que estão cada vez mais rigorosas e importantes para a aprovação de projetos de vias. Este pavimento não necessita de operações tapa-buracos e recapeamentos com frequência, ações que provocam congestionamento e acentuam a emissão de CO₂ (gás causador do efeito estufa) pelos veículos parados, causando desperdício de combustível. Por ter maior durabilidade e exigir pouca manutenção, resulta em redução de custos e menos impactos ao meio ambiente (ABCP).

Num país onde a porcentagem do transporte automotivo de passageiros e de cargas é muito elevada necessita-se de uma estrutura de estradas de rodagem com alta durabilidade e que tenha um baixo custo de manutenção capaz de suportar o tráfego pesado, intenso e contínuo. Tendo essas informações como características e objetivos, podemos dizer que o pavimento de concreto é uma alternativa que atende a esses requisitos para que a qualidade seja o resultado, garantindo a segurança e produtividade e competitividade dos setores econômicos e logísticos do País.

A Confederação Nacional dos Transportes (CNT) em 2011 realizou um estudo sobre a necessidade de melhorias nas estradas, diz que 47,9% dos trechos de rodovias pesquisados encontra-se em estado regular, ruim ou péssimo.

“A vida útil do pavimento de concreto é de, no mínimo, 20 anos. No Brasil há exemplos de pavimentos com mais de 50 anos de serviço. O dinheiro economizado, quando se adota o

pavimento de concreto, pode ser usado na construção de novas rodovias”, afirma Ronaldo Vizzoni, gerente de infraestrutura da Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP).

O Brasil foi um dos primeiros países a utilizar o pavimento de concreto, ou seja, deixade ser novidade nas vias e rodovias, já no início do século XX e sua utilização foi bastante expressiva até a década de 1970, reduzindo a partir desse período por aspectos da conjuntura econômica e financeira do país.

Dos anos 90 em diante a ABCP foi buscar pelo mundo a fora o que se podia encontrar de melhor em tecnologia de pavimentação em concreto de cimento *Portland*, reerguendo a cultura e o controle da sua execução, empregando os mais modernos equipamentos e capacitação de profissionais para resultados de qualidade e eficiência.

Nos corredores de ônibus, o pavimento de concreto é muito eficaz quando empregado, por ter vida útil bem mais elevada que as demais soluções de pavimentação e não sofrem deformações plásticas como buracos e as famosas “trilha de rodas”.

A aplicabilidade do pavimento de concreto de cimento *Portland* atualmente se estende por muitas áreas de transporte, tráfego, obras públicas e particulares, em indústrias, aeroportos, entre outros, etc. No Quadro 2.3 podemos ver onde são aplicadas essas técnicas pavimentação rígida.

Quadro 2.3 - Aplicações do Pavimento de Concreto

APLICAÇÃO BÁSICA DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO	
Vias de tráfego intenso e canalizado	Rodovias (federais, estaduais e concessões), canaletas exclusivas de ônibus, vias arteriais e perimetrais de grandes cidades.
Áreas sujeitas a derramamento de combustíveis	Postos de combustíveis, praças de pedágio, estacionamento de ônibus e caminhões.
Áreas de tráfego pesado	Portos/Terminais de contêineres e de ônibus.
Pisos industriais	Indústrias e Montadoras.
Aeroportos	Pátio de estacionamento das aeronaves, cabeceiras de pistas, pistas (principais e de taxiamento).
Recuperação de pavimentos asfálticos	Rodovias e vias urbanas.
Obras de Arte	Túneis, viadutos, pontes, alças de acessos.

Fonte: Departamento de Estradas de Rodagem - DER

Para esse processo de execução de pavimentos rígidos, temos tem-se máquinas específicas para produção de concreto *in loco*, como o exemplo abaixo (Figura 2.16):



Figura 2.16 - Pavimentadora Tipo SP 1200

Fonte: Deltamaq

Esses pavimentos de formas diferenciadas transmitem seus esforços, o pavimento flexível por ser menos resistente que o concreto tende a distribuir sua carga em áreas menores (Figura 2.17) causando assim diretamente mais influência sobre as camadas inferiores diferentemente do pavimento de concreto de cimento *Portland* que é tem uma elevada rigidez transferindo assim por uma área bem mais extensa da sub-base (Figura 2.18) suprimindo a maior parte de sua carga gerando pouco esforço para suas subcamadas (UFPR).

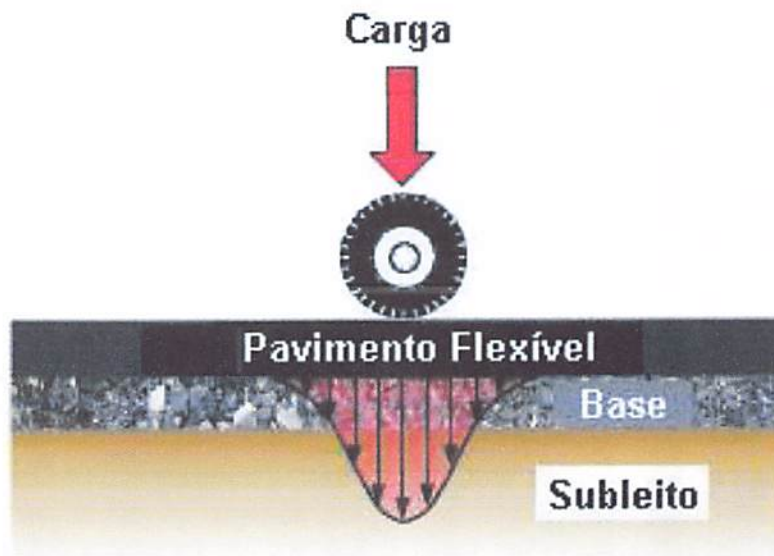


Figura 2.17 - Distribuição de cargas no pavimento flexível

Fonte: Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012 FEUP

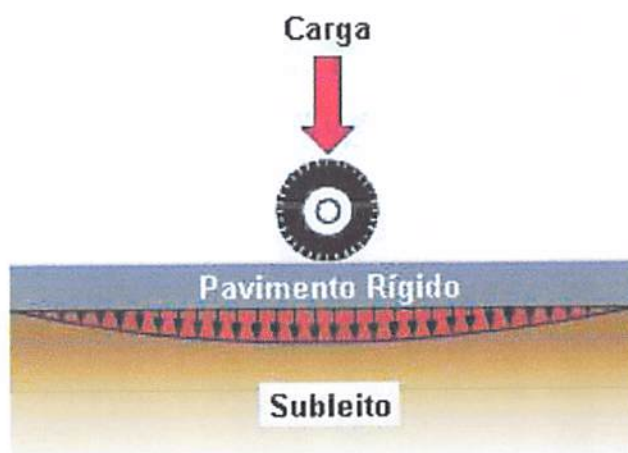


Figura 2.18 - Distribuição de cargas no pavimento rígido

Fonte: Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012 FEUP

Em média esses pavimentos são projetados para ter uma duração longa, mas mesmo assim o pavimento rígido leva vantagem pela durabilidade ao longo dos anos podendo chegar a 30 anos, e a escolha por um desses pavimentos certamente tem razões específicas como políticas, comerciais e outras práticas levando em consideração que o pavimento de concreto de cimento *Portland* necessita de maiores recursos para sua aplicação, entretanto sua manutenção não requer cuidados por um longo tempo (ABCP).

No quadro 2.4 tem-se algumas vantagens e desvantagens do pavimento de concreto.

Quadro 2.4 - Vantagens e desvantagens

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Economia, Técnica e desempenho, Construção, Durabilidade, Segurança e conforto de rolamento, Economia de iluminação pública e energia elétrica, Ecologia e meio-ambiente, Diminuição do calor ambiente, Normatização.	Baixa produtividade, Custo inicial (Cerca de 30% mais caro que o pavimento flexível), Controle tecnológico (bastante rigoroso).

Fonte: Autor

2.5. TIPOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO

Neste trabalho serão tratados somente os pavimentos de concreto constituídos por placas de concreto e os blocos de concreto por terem uma atuação estrutural totalmente diferente não serão citados apesar de que também se enquadram no contexto dos pavimentos rígidos.

De acordo com Baptista (1975), “o dimensionamento dos pavimentos rígidos depende de vários efeitos do trânsito e do meio exterior e os principais são: ação do tráfego, isto é, dos esforços devidos à ação estática do peso dos veículos que transitam no pavimento mais o aumento devido ao efeito do impacto; aos esforços devidos à variação de temperatura e aos esforços devidos às variações de umidade do concreto e da retração.”

Os pavimentos têm funções que devem ser encontradas em sua estrutura, segundo Senço (2008):

Devem resistir os esforços verticais, oriundos do tráfego;

Melhorar as condições de rolamento, quanto ao conforto e a segurança;

Resistir aos esforços horizontais (desgaste), dando durabilidade à superfície de rolamento.

De acordo com a divisão feita por Balbo (2009), no Quadro 2.5, os pavimentos são divididos em:

Quadro 2.5 - Tipos de Pavimentos de Concreto

DENOMINAÇÃO	SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS
Pavimento de Concreto Simples	PCS	Concreto mais resistente que os usados em edificações prediais e assim combatendo a tração na flexão por não terem armadura em sua composição. Possui juntas para controlar a retração pouco espaçadas.
Pavimento de Concreto Armado	PCA	Possui armadura na parte inferior onde se trabalha a tração e o concreto trabalha em regime de compressão na parte superior da placa sem ser esmagado e com juntas mais espaçadas que o PCS.
Pavimento de Concreto com Armadura Contínua	PCAC	Controla bem a fissuração transversal, com armadura contínua posta acima da linha neutra na seção transversal do pavimento e por não ter juntas tende a manter unidas as fissuras.
Pavimento de Concreto Protendido	PCPRO	Concreto com grandes dimensões com espessuras inferiores trabalhando no regime elástico.
Pavimento de Concreto Pré-Moldado	PCPM	São fabricadas sob medida com muita precisão para substituição de pavimentos de concretos com patologias, atendendo as necessidades do transporte.
Whitetopping	WT	Revestimento de concreto usando como base o pavimento asfáltico podendo ser em PCS, PCA, PCAC, PCPRO ou PCPM se assim solicitados.
Whitetopping Ultra Delgado	WTUD	Revestimento delgado de concreto com superior grau de resistência usando como base o pavimento asfáltico fresado, operando a flexão e a deflexão. Possui juntas de contração divididas em espaçamentos menores.

Fonte: Balbo, 2009

2.5.1. PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLES (PCS)

“Pavimento de concreto simples é o pavimento cuja camada é constituída por placas de concreto de cimento *Portland*, não armadas ou eventualmente com armadura sem função estrutural, que desempenham simultaneamente as funções de base e de revestimento.” (DNER, 2007)

O PCS (Figura 2.19) é o pavimento constituído por placas de concreto de cimento *Portland*, moldados *in loco*, não armados ou com armadura sem nenhuma função estrutural, que desempenham ao mesmo tempo as funções de base e de revestimento e logo após a concretagem é definido a serragem das juntas longitudinais e transversais.

“Pavimento de concreto simples de cimento *Portland* no qual as tensões solicitantes são combatidas tão somente pelo próprio concreto e que não contém nenhum tipo de armadura distribuída, não se considerando como armadura, neste caso, eventuais sistemas de ligação ou de transmissão de carga entre as placas formadas pelas juntas longitudinais e transversais, nem armaduras sem função estrutural usada para combater fissuração em placas de formato irregular” (ABCP).

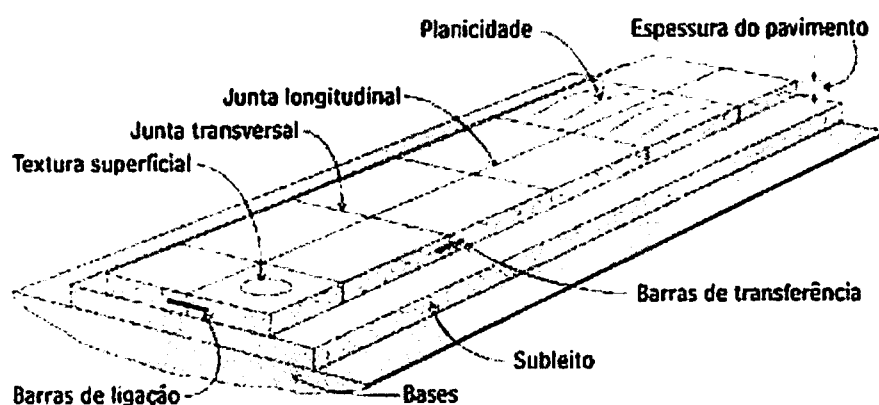


Figura 2.19 - Estrutura básica de um pavimento de concreto simples com BT

Fonte: ACPA

Para a execução desse pavimento pode ser utilizar vários tipos de pavimentos como o CCV (concreto convencional), o CAD (concreto de alta resistência) e o CCR (concreto compactado com rolo) e são assentados sobre as subcamadas que são a base, sub-base e o subleito.

A serragem das juntas devidamente espaçadas tem como objetivo principal essa igual serragem o controlar a retração hidráulica na massa de concreto fresca e por terem as mesmas

condições de cura do concreto usado em edificações também são expostos às condições ambientais bastante desfavoráveis como sol, chuva e ventos. Nessas fissuras por retração hidráulica na massa fresca de concreto de cimento *Portland* (CCP), por ter uma diminuição da área de concreto torna-se em termos técnicos, mais frágil (enfraquecida).

Por esse motivo a colocação das chamadas barras de transferência de carga (BT) (Figura 2.20) se faz necessária, posicionadas justamente nessas juntas transversais de tal forma que em sua transmissão de cargas próximas às juntas, seus efeitos diminuem por ter a presença das barras de transferência que deslocam os esforços, assim as placas trabalham em conjunto naquela região e esse efeito chama-se “transferência de carga”. As barras de transferência de carga são barras de aço liso (CA-25) que transferem cargas verticais de uma placa para outra, impedindo a aplicação dos esforços verticais aplicados pela rolagem de veículos e a criação de degraus entre estas placas (ABCP). As BT influenciam muito no comportamento dos pavimentos de CCP simples e o mau posicionamento delas causa defeitos no pavimento com custos muito altos em sua correção.

Para os cálculos estruturais de PCS, não existir BT (Figura 2.20) é um fator muito importante porque demarca os tipos de métodos a serem usados. Nesses casos a junta serrada de fazer uma ligação de distribuição de esforços nas placas contínuas por interfaceamento de agregados na face vertical das fissuras.

As barras de ligação (BL) são de aço corrugado, geralmente do tipo CA-50, posicionadas nas juntas longitudinais tendo a função de impedir o deslocamento horizontal entre as placas que acontece pelo engastamento da armadura nas placas de concreto executadas lateralmente.

Placas com Barras de Transferência

Placas sem Barras de Transferência

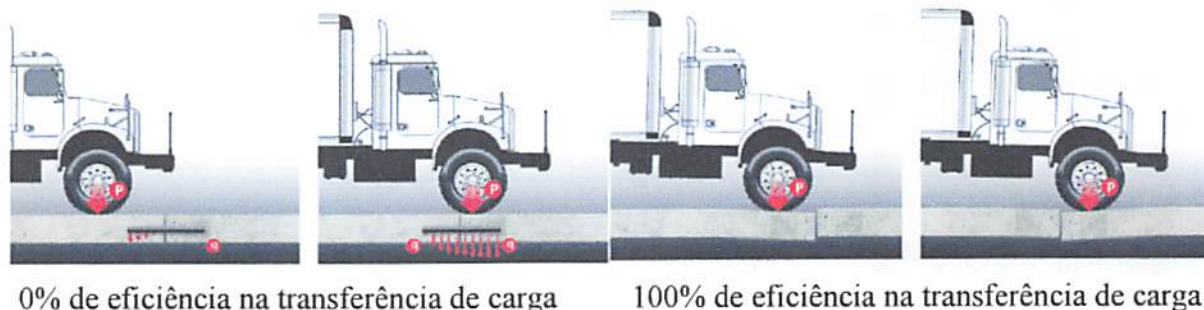


Figura 2.20 - Eficiência das barras de transferência

Fonte: UFPR *apud* ACPA

Pode-se optar também por telas como armadura de retração colocadas acima da linha neutra permitindo o aumento do comprimento das placas, assim todas as características do pavimento de concreto simples não sofrem alterações. Mas com tempo essa técnica foi abandonada e o espaçamento entre as justas cerradas é basicamente entre 4,5 até 6 metros.

Antigamente no Brasil, se usa como meio de evitar a propagação de fissuras na base de cimento (CCR ou BGTC - brita graduada tratada com cimento) do pavimento de concreto de cimento *Portland*, manta ou lona plástica de polietileno (Figura 2.21). Preocupação antes vista somente na Espanha já que nos EUA se usava da aderência entre o CCR ou a base de cimento e o concreto sem usar dessas mantas. Em algumas outras obras de grandes rodovias, pelo alto custo que havia ao se usar lona plástica, optou-se pelo uso de emulsão asfáltica na base cimentada, para a cura do concreto.

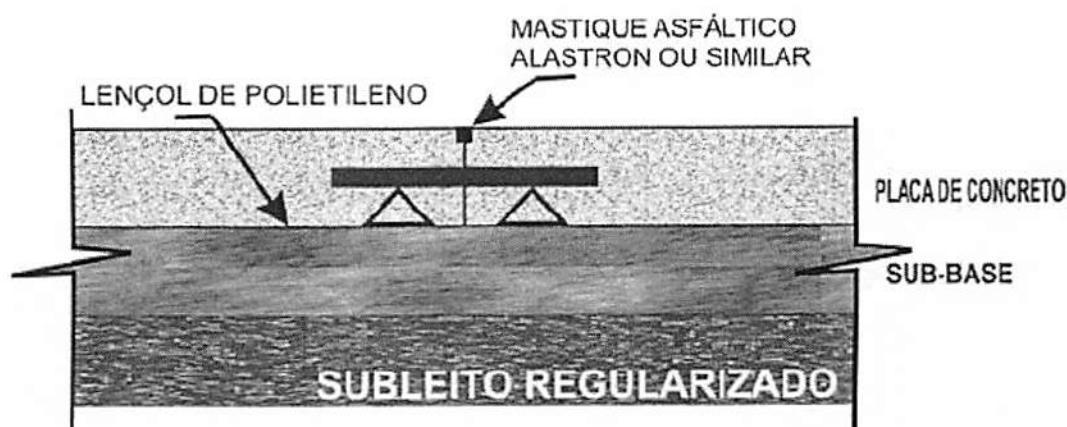


Figura 2.21 - Estrutura de pavimento de CCP com lona de polietileno

No PCS o cálculo de momentos fletores ou tensões de tração na flexão em regime elástico é analisado com base em teorias derivadas de análises de estado plano de tensões, devido à criação de um estado de flexão na placa pelos esforços das ações possíveis no pavimento.

Antigamente, o cálculo desses esforços tinham embasamento na Teoria de Westergaard de modelagem elástica eram mais utilizados, mas recentemente os cálculos estruturais empregam, por motivos claros, a modelagem numérica.

Por não possuir armadura estrutural é imposta ao concreto toda a responsabilidade de suportar as deformações de tração na flexão, porque somente ele é responsável por resistir às esforços, impedindo a ruptura que seria por fissuração (admitindo o processo de desgaste do

pavimento por fadiga ao longo do tempo), por isso os métodos das análises das tensões exige hipoteticamente que o concreto esteja em regime elástico para os cálculos de espessuras.

O ponto principal para o dimensionamento desse pavimento, devido ao grande esforço provocado por veículos e ao clima, conforme BALBO (2008) é a:

“Definição, para o concreto, de uma espessura de placa e de uma resistência à tração na flexão que, analisado o consumo de fadiga do concreto sob a ação de esforços de natureza repetitiva, leve a resultados capazes de atender a uma demanda de tráfego e ambiental ao longo de um período de projeto preestabelecido”.

Por esse motivo a resistência do concreto tem que ser muito bem avaliada, mantendo os outros parâmetros como o módulo de elasticidade sem variação, e controlar essa característica é muito importante para o desempenho desse pavimento devendo estar atento aos critérios de segurança do processo de execução e projeto fazendo ensaios dos esforços a tração na flexão.

O CCR (Figura 2.22 e Figura 2.23) é um dos métodos de aplicação do PCS, que tem a necessidade de cuidados com o seu acabamento superficial por algumas razões. Ele não tem um acabamento desempenado causando uma falta de nivelamento da superfície que em contato com o rolamento de veículos causa desconforto, assim, por não ter ranhuras (texturização) na superfície do CCR, como no caso do CCP vibrado, a aderência pode ser prejudicada. Outra razão é a dificuldade de instalação das BT e BL nas juntas transversais e longitudinais respectivamente fazendo com que o PCS não tenha o aço necessário para transferência de carga e sem ligação das placas.



Figura 2.22 - Lançamento de concreto a ser compactado com rolo

Fonte: Infraestrutura Urbana

(Disponível em: <<http://www.infraestruturaurbana.com.br/solucoes-tecnicas/7/artigo235525-1.asp>>)



Figura 2.23 - Concreto compactado com Rolo

Fonte: DER (Disponível em: <www.der.pr.gov.br>)

2.5.2. PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADO (PCA)

Do mesmo modo que o PCS, o pavimento de concreto armado (PCA) (Figura 2.24) é formado por placas armadas em conjunto que apresentam maiores dimensões planas (duas ou três vezes maior que uma placa PCS) e por terem tais características os espaçamentos entre BT e BL são maiores, em sua execução. Os pavimentos do tipo PCA trabalham de sob os esforços na flexão, não deixando de se considerar a densidade de retração e a densidade da armadura existente nessas placas.

Em termos de dimensionamento e análise de tensões o PCA diferencia-se muito do PCS, e Balbo (2009) diz que essa diferença se dá:

“Pela hipótese assumida em projeto, de que os esforços de tração críticos que ocorrem em fibras superiores ou inferiores de uma placa armada são obrigatoriamente absorvidos pela área transversal da armadura de aço, projetada e disposta de modo racional para cumprir tal função”.

O PCA tem uma espessura de concreto reduzida e também a resistência (compressão) reduzida por ser armado se comparado ao PCS. Com a redução da resistência a um aumento considerável dos momentos fletores fazendo com que a placa de concreto entre em regime de fissuração e os esforços são absorvidos pelas armaduras transversais e longitudinais.

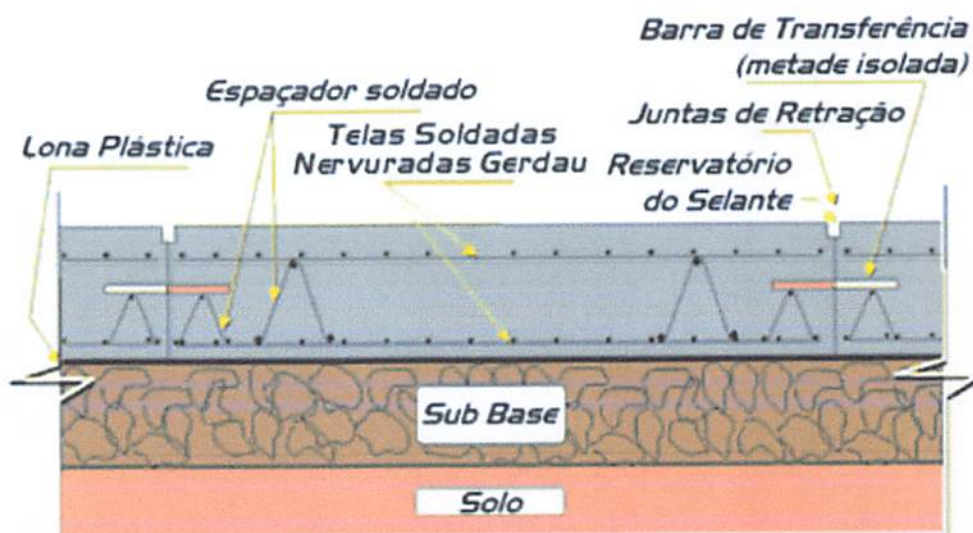


Figura 2.24 - Concreto compactado com Rolo

Fonte: UFC

(Disponível em: <http://www.det.ufc.br/jsoares/super/10_Pavimentos_de_concreto.pdf>)

Em relação aos fundamentos de cálculos do PCA, diferentemente do PCS que se analisa em regime elástico, adota-se que o pavimento seja analisado em regime plástico (no território brasileiro quase não ocorre essa prática), ate porque os momentos fletores são calculados em regime elástico. Isso nos mostra que o concreto fissa nas áreas da placa armada onde ocorrem os esforços de tração na flexão, sendo assim, a placa deixa de ter continuidade devido às fissuras, portanto essas deformações são absorvidas pelo aço, já que o concreto perde essa função.

A Teoria de *Westergaard* e outras baseadas na Teoria de Charneiras Plásticas podem ser usadas no dimensionamento desse tipo de pavimento, bem como os métodos numéricos mais desenvolvidos, sendo ponto principal para o cálculo de definição da área das armaduras longitudinais e transversais que resistam aos momentos causados pelas cargas na via pavimentada impedindo a ruptura do aço que coordena a resistência da placa, uma vez que o concreto esteja fissurado.

Por causa da taxa quantidade de aço no PCA elevada, armadura controla o nível de fissuras por retração durante o período de cura do concreto, de tal modo que as juntas transversais e longitudinais são mais espaçadas, e essa característica possibilita a ter dimensões maiores de placas de concreto sem que ocorra risco de fissuras durante esse período (não é valido para o PCS).

A resistência do concreto do PCA não se define pelo ajuste para que possa responder positivamente aos esforços atuantes, até porque, se viu anteriormente que o concreto não controla as reações aos esforços de flexão, sendo assim, a resistência do concreto pode ser definida segundo Balbo (2009) em:

“Função da necessidade de durabilidade do concreto, cuja área superficial muito grande em pavimentos fica exposta à ação das chuvas, de descargas de elementos sólidos ou líquidos nocivos à sua durabilidade e, principalmente, à abrasão causada por rodas de veículos”.

Ao contrário do PCS, devido aos fundamentos apresentados, pode se dizer que não há necessidade de controlar a resistência à tração na flexão do concreto usado para construção do PCA, já que o concreto ao resistirá a esses esforços, ou seja, seria um erro em termos de economia na obra, dimensionar um PCA que resistisse aos esforços de tração na flexão (em regime elástico).

2.5.3. PAVIMENTO DE CONCRETO COM ARMADURA CONTÍNUA (PCAC)

O pavimento de concreto do PCAC suportana seção transversal a fissuração da retração de modo aleatório. Na seção transversal da placa de concreto, um pouco acima da linha neutra, coloca-se a armadura contínua com o principal proposito de manter as faces fissuradas fortemente unidas. Não se executaram juntas de contração nesse pavimento (BALBO, 2009).

2.5.4. PAVIMENTO DE CONCRETO PROTENDIDO (PCPRO)

Os pavimentos de concreto protendido podem ser constituídos ao mesmo tempo ou não, armaduras convencionais e armaduras de cordoalhas protendidas, ou somente de cordoalhas protendidas.

O processo construtivo basicamente é a criação de esforços de compressão na estrutura, antes de requisitar as cargas externas (rolamento de veículos), fazendo uma protensão nas barras de aço. Durante o rolamento de veículos ou por efeitos ambientais, ocorre a tração no concreto protendido quando se supera o esforço de compressão, podendo assim, reduzir, por tolerar maiores momentos fletores, a espessura da placa.

Com tais características que o PCPRO possui, podem ser empregadas espessuras bem menores se comparado ao PCS e também não tem a necessidade de juntas de retração. O PCA

permite que se tenha um detalhamento das armaduras para as resistências de concretos inferiores à do PCS, se opondo a esse caso, o PCPRO que tem a necessidade de impor esforços de protensão em compressão possui uma alta resistência à compressão do concreto. O PCPRO é uma técnica usada há décadas no Brasil para construção de áreas de manobras em aeroportos, pátios e atualmente expandiu para o uso em pátios industriais principalmente quando tem restrições para as juntas (BALBO, 2009).

2.5.5. PAVIMENTO DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO (PCPM)

Merrit e Tyson (2006) dizem que as placas pré-moldadas foram uma solução para os problemas gerados, em serviços de reconstrução (*in loco*) e de demolição de pavimentos, com tráfego. Os PCPM são placas de concreto que tem atualmente duas finalidades. Uma delas é a uso na reparação de pavimentos já existentes repondo partes degradadas e a outra seria na construção de pavimentos novos (Figura 2.25). Essas peças podem ser estocadas para uso na pavimentação.

“Hugo Corres Peiretti, fundador da FHECOR, disse que o pré-moldado é uma possibilidade construtiva, não é a única, é uma possibilidade construtiva. E, construtivamente, eu posso resolver um problema de diversas formas: a pré-fabricação é uma das formas. E é uma das formas que, realmente, cada dia, tem um maior protagonismo, cada dia e cada vez é mais importante” (Revista Concreto, 2010).

As placas pré-moldadas não é o meio mais barato de execução de pavimentos de concreto, entretanto, possuem várias vantagens que ao pensar em qualidade na construção é uma boa opção. A principal delas é a placa acabada, por ter uma impecável elaboração, nas quais as medidas (variáveis) solicitadas e nas melhores condições de cura possíveis, impedindo o surgimento de fissuras por retração no concreto. Garantidas essas condições de cura, obtêm-se resistências mais elevadas e placas mais uniformes.

No processo construtivo dos pavimentos a dados importantes que devem ser colocados em prática, como por exemplo, as placas devem ser colocadas sob a base, impedindo que haja vazios e falha no contato entre elas, causando vários problemas quando expostos sob a ação das cargas dos rolamentos e efeitos ambientais. Outro ponto importante das placas é a existência de armaduras em sua estrutura, que por serem transportadas, estocadas e suspensas para a sua instalação necessita de uma resistência superior se comparado ao seu peso próprio.

Os PCPM podem ser considerados como um PCA, por terem as mesmas características, porque são estruturalmente armados e também essas armaduras combatem esforços provocados pelo tráfego, mas tem limitações em suas dimensões por causa da instalação e do transporte. Não devemos esquecer que as juntas têm q ser seladas e tem-se usado *grout* para tal função, bem como devem ter em sua execução BT e BL entre as placas posicionadas.



Figura 2.25 - Placas Pré-moldadas

2.5.6. *WHITETOPPING* (WT)

O *whitetopping* (WT) que significa “cobrindo de branco” ou “cobertura branca” é uma camada de reforço de CCP rígido, para reabilitação de pavimentos, executado sobre o pavimento flexível (Figura 2.26) existente e este passa a ter uma função de sub-base.



Figura 2.26 - Aplicação da Técnica *Whitetopping* sobre o pavimento flexível

Fonte: ABCP

Para o Engenheiro Marcos Dutra de Carvalho (ABCP), o *Whitetopping* é o recapeamento de pavimentos asfálticos com concreto de cimento *Portland*. É a evolução do conceito de que o recapeamento dos pavimentos asfálticos somente possa ou deva ser feito usando-se materiais da mesma natureza que o da estrutura existente, isto é, misturas asfálticas.

O uso desse método passou ter fundamentos após o estudo e pesquisa feita pela ABCP/IPR, e normatizado com a elaboração do Manual de Recapeamento de Pavimentos Flexíveis com Concreto Tipo *Whitetopping* (DNIT, 2005).

Apesar desse processo não ser muito usual em projetos de recuperação de pavimentos, existem momentos que se torna viável estrategicamente e além de acabar com as patologias do antigo pavimento, possui algumas vantagens que fazem dele, uma alternativa mais viável.

Dentre essas vantagens destacam-se economia (usuários e órgãos públicos) na iluminação e combustível, segurança de rolamento elevada, boa aplicação para o tráfego pesado, rápida liberação do tráfego, impede a reflexão de trincas, aplicação única (evitando etapas construtivas), durabilidade de vida de serviço em torno de trinta anos com uma necessidade de manutenção mínima e possuir características iguais ao pavimento de concreto novo como, por exemplo, o recebimento das cargas, que são praticamente absorvidas pelo concreto.

O uso dessa técnica não é muito usado em projetos de restauração de pavimentos, mas há ocasiões onde esse método tem suas vantagens, e na maioria das vezes é mais viável e econômica quando o pavimento flexível está seriamente deteriorado ou que tenha características de uma degradação mais acelerada sob o tráfego de veículos pesados ou ainda por estar em um ambiente hostil. Devido a essas características emprega-se uma camada regulamentadora sobre o pavimento existente corrigindo as imperfeições antes do lançamento do pavimento de concreto.

Da mesma forma que o PCS, as tensões das cargas são combatidas pelo próprio concreto, sendo usado em pavimentos rígidos, avaliado aos 28 dias com resistência característica à tração na flexão ($f_{ctM,k}$) geralmente da ordem de 4,5 MPa.

Um exemplo dessa aplicação aqui no Brasil é o da rodovia BR - 290 *Free Way* (Figura 2.27) em que foi utilizado o *Whitetopping* tradicional, que a falta de manutenção e tráfego intenso apresentou problemas estruturais em seu pavimento asfáltico, que gerou agilidade e

redução de custos na operação e manutenção garantindo o conforto e segurança que o pavimento rígido oferece.



Figura 2.27 - Rodovia BR - 290 Free Way - Porto Alegre/RS

Fonte: ABCP

Disponível em:<viasconcretas.org.br>

Podemos afirmar que a técnica *Whitetopping* usada como solução para recuperação de pavimentos asfálticos resulta em um ótimo comportamento, comprovado pelos altos valores obtidos para o *Present Serviceability Rating* (PSR) Quadro 2.6 abaixo, nos EUA.

Quadro 2.6 - Desempenho do WT nos EUA

Estado	Cidade	Via	Construção	Tipo de WT	Espessura (cm)	PSR	Desempenho (1989 / 1990)
CA	Los Angeles	US-101	1966	Simples	17,8	4,1	Excelente
CA	Orange Co.	CA-11	1966	Simples	20,3	3,8	Bom
OR	Salem e Portland	I-5	1970	PCCA	20,3	3,8	Bom
			1972	PCCA	20,3	4,1	Excelente
			1973	PCCA	20,3	4,3	Excelente
			1975	PCCA	20,3	4,1	Excelente
IA	Correctionville	Co.L-36	1971	Simples	15,2	3,0	Regular
IL	Lasalle	Plank Rd.	1974	Simples	25,4	3,7	Bom
IA	Stuart	I-80	1981	Simples	12,7	3,9	Bom
MN	Ohlmsted Co.	Co. 10	1982	Simples	25,4	4,0	Excelente
NE	Stromsburg	US-81	1982	Simples	15,2	4,0	Excelente
TX	Royce City	I-30	1986	Simples com BT	22,9	4,3	Excelente
NV	Las Vegas	I-15	1990	Simples	26,7	4,8	Excelente

Fonte: American Concrete Pavement Association (ACPA)

A construção do WT (Quadro 2.7) é de modo grosseiro, a execução da fresagem do revestimento asfáltico retirando de dois a sete cm antes da colocação do WT, logo, a execução da camada asfáltica intermediária e depois a colocação direta do WT sobre o revestimento asfáltico existente.

Quadro 2.7 - Processo técnico básico de um pavimento WT

PROCESSOS CONSTRUTIVOS	CARACTERÍSTICAS
Fresagem do asfalto	Fresagem executada em pontos localizados, geralmente para concordar o greide final da pista de concreto.
Instalação do Sistema de Referência	Dois cabos de aço nas laterais ao equipamento, quatro sensores (dois de cada lado).
Lançamento do concreto dosado e pré-misturado em usina	Utilização de caminhões basculantes.
Lançamento do concreto	Em função da largura da pista, pode ser utilizada uma escavadeira hidráulica na frente da pavimentadora.
Barras de transferência	Colocação das BT devidamente espaçadas de acordo com o projeto.
Espalhamento e Vibração do Concreto	Pode-se usar pá-distribuidora do sistema de formas deslizantes, pá triangular móvel, distribuindo-o por toda a largura da pista e deve ter altura uniforme e relevante para a operação de vibração.
Barras de ligação	Colocação das BL de acordo com o projeto.
Acabamento	Desempenho mecânico com Auto float SP 500 e float Pan CMI SF 3004.
Texturização manual ou mecânica	Pode ser manual ou mecânica.
Cura química	A cura do concreto pode ser manual ou mecânica.
Serragem e selagem das juntas	As juntas deverão ser serradas de acordo com o projeto e certificar que todas as juntas sejam preenchidas com selante.
Juntas de construção	Executadas manualmente e se deve tomar cuidado no nivelamento da fôrma.

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP

Para se dimensionar esse tipo de pavimento necessita-se apenas de determinar o módulo de reação que é o coeficiente de recalque k do pavimento que já existe e depois dimensionar o pavimento de concreto que será aplicado sobre esse pavimento a ser restaurado, podendo ser de qualquer tipo de pavimento de concreto antes mencionado na Tabela 2, havendo ou não barras de transferência.

- ✓ Para a aplicação desse pavimento podemos citar três técnicas diferenciadas que são:

- ✓ Construção de uma camada de nivelamento intermediário entre o pavimento existente e o WT;
- ✓ Colocação direta, precedida de umedecimento da superfície;
- ✓ Fresagem do revestimento existente de 2 a 7 cm.

2.5.6.1. *Inlay*

O *inlay* é simplesmente a execução do WT “encaixado” (Figura 2.28), onde se faz uma remoção mais aprofundada do pavimento degradado, e se coloca o WT nessa área com uma espessura maior que o método tradicional de aplicação.

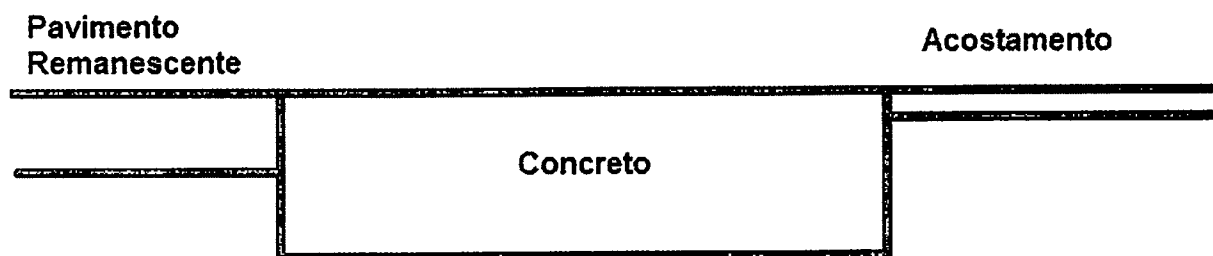


Figura 2.28 - Aplicação do *inlay*

2.5.7. *WHITETOPPING ULTRADELGADO (WTUD)*

Com uma espessura limitada de 10 cm, o WTUD são camadas ultradelgadas de concreto aplicadas sobre o pavimento já existente. O termo *whitetopping* é usado pelo fato da cor do concreto substituir a cor antiga do asfalto. A execução desse pavimento, com uma espessura tão inferior se relacionados aos outros, como processos básicos podendo ser executada no sistema superposto e no sistema encaixado (*overlay* e *inlay* anteriormente falado) Figura 2.29 (BALBO, 2009).

Depois do concreto moldado, ele é serrado transversalmente e longitudinalmente com uma distância entre elas pouco menos de 1 cm se comparado aos pavimentos de concreto convencionais.

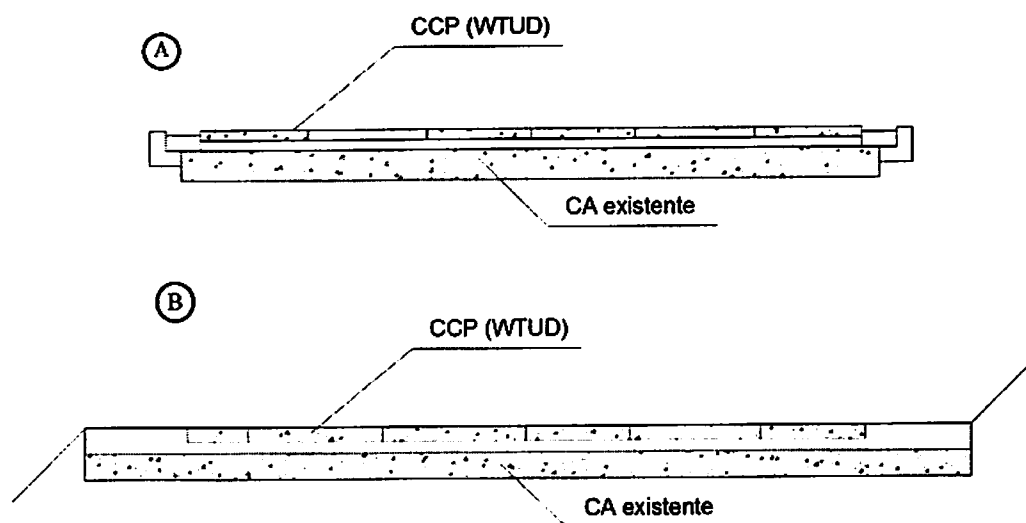


Figura 2.29 - Sistemas de moldagem sobreposta (A) e encaixada (B)
(adaptado de Balbo, 2009)

A aderência do concreto com a superfície a ser restaurada é um ponto crucial dessa técnica, porque com ela se conseguiu uma redução de tensões na placa superior de concreto. A limpeza e a fresagem da mistura asfáltica é um ponto importante para que essa aderência, retirando agregados soltos e pó gerado pela fresagem, sendo assim, podendo hidratar o cimento que cobrirá o agregado superficial asfáltico segundo Balbo (2009).

Mas essa aderência não soluciona a questão se o pavimento a ser coberto houver fissuras, já que não adiantará aderir pavimento de concreto a um material que não trabalha na flexão porque o pavimento asfático fissurado trabalha como blocos em compressão.

A espessura remanescente do asfalto é uma outra questão que deve ser vista para que tenha uma ação conjunta entre as camadas, trabalhando assim na flexão e aderidas, ou seja, a camada superposta absorve parte dos esforços horizontais subtraindo os efeitos causados nas placas de concreto.

De modo geral o pavimento WTUD é uma camada delgada de concreto de alta resistência, que possui espessuras menores que os demais, tendo como característica principal resistir aos momentos fletores impostos a esse elemento.

3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

3.1. ESTUDO DOS MÉTODOS DA *PORTLAND CEMENT ASSOCIATION* (PCA) DE 1966 E 1984

3.1.1. *PORTLAND CEMENT ASSOCIATION* (PCA) DE 1966

Existem dois métodos para o dimensionamento dos pavimentos de concreto simples da *Portland Cement Association* (PCA), a versão tradicional de 1966, muito usada no Brasil, descrita abaixo e a versão atualizada de 1984 com novos meios de dimensionamento dos pavimentos de concreto simples.

H. M. Westergaard e G. Pickett e outros estudiosos foram responsáveis pelo estudo não qual foi baseado o PCA, mais além desse estudo foi realizado ensaios práticos pela mesma associada a *Bureau of Public Roads* (BPR) observando o comportamento do concreto sujeito a diferentes tipos de tráfego (ABCP, 1989).

Nesse processo verifica-se três procedimentos, as propriedades do concreto, a fundação do pavimento (não será tratado neste trabalho as características e métodos de execução das camadas de suporte do pavimento, mas o dimensionamento do pavimento de concreto simples) e o tráfego.

O estudo do tráfego no esse pavimento aborda em seu processo de cálculo alguns fatores, como a segurança, a tensão causada pela carga, o período não qual sera projetado o pavimento e a projeção desse tráfego considerando a pior hipótese de dimensionamento.

O PCA/66 apresentam basicamente dois procedimentos de cálculo de dimensionamento possíveis, o que se considera a *carga máxima* quando não se tem os dados completos do tráfego e o que considera o *consumos de resistência à fadiga* quando se tem os dados do tráfego, tendo o aumento do tráfego anual, as cargas distribuídas nos eixos de cada tipo de veículo, e a porcentagem de veículos (PITTA, 1989).

Nestes dois processos, utilizando os *ábacos de Picket-Ray*, para o cálculo de eixos simples e o ábaco da ABCP para os eixos tandem duplos e triplos. A espessura da placa de

concreto depende principalmente da tensão de tração na flexão gerada pela carga solicitante ao longo do pavimento.

A *fadiga* é a perda de concreto da placa causada pelo carregamento devido ao número de repetições de carga a que são submetidas mesmo que a tensão gerada pelo carregamento seja menor que a resistência do concreto usado. Ela pode ser atribuída a qualquer tipo de pavimento rígido citado anteriormente.

3.1.1.1. Características do Concreto

A *resistência à tração na flexão do concreto* ($f_{ctM,k}$) deve ser aplicada em projetos de dimensionamento adequadamente num período limitado entre 28 e 90 dias, sendo determinado pelo *módulo de ruptura* (M_R), apesar de que após esse período ele continua a ganhar resistência mas este não é considerado nos cálculos tornando se um fator de segurança do projeto. No período entre 28 e 90 dias o número de solicitações de cargas que vai ocorrer tem que ser muito inferior ao estipulado no período de projeto sem gerar redução do tempo de vida esperado do pavimento.

Para o cálculo do dimensionamento da espessura da placa de concreto, a escolha da resistência a adotar no projeto é essencial para que se torne adequado tanto no processo executivo quanto no financeiro, como por exemplo se o valor adotado for igual ou inferior a 4,0 MPa (40 Kgf/cm²) transmite características pouco consolidadas como durabilidade inferior e uma espessura muito elevada, enquanto o uso de valor igual ou superior a 5,0 MPa (50 Kgf/cm²) gera um concreto mais impermeável e rijo além de uma espessura necessária menor e por esse motivo necessita de um controle tecnológico muito preciso. Pela prática e bom senso, de acordo com a ABCP, o valor da resistência adequado (Aconselhável) é de 4,5 MPa (45 Kgf/cm²) que atende as necessidades do pavimento tanto em durabilidade quanto em seu comportamento imposto pelo tráfego, todos esses valores da resistência característica à tração na flexão devem ser alcançados aos 28 dias e ao 90 dias cerca de 1,10 do valor obtido aos 28 dias (DNIT, 2005).

Pesquisas feitas sobre a chamada *relação de tensões*, que é a ligação entre a resistência característica à tração na flexão e a tensão de tração na flexão ocorrida pela transito de cargas sob a placa, que tem seu limite seu próprio limite de aplicações dessas cargas, nos passa que o número admissível dessas aplicações que gera relações as tensões de 0,56 para baixo é ilimitado e que havendo período de folga entre o tráfego das cargas tem sua resistência a fadiga ampliada.

Mesmo com essas informações, usa-se o *limite de resistência* igual a 0,50 para garantir a segurança no lugar de 0,56. A tabela 3.1 abaixo mostra essa relação (ABCP, 1989).

Tabela 3.1 - Relação de tensões e número admissível de repetições de carga

Relação de tensões (*)	Nº admissível de repetições de carga	Relação de tensões (*)	Nº admissível de repetições de carga
0,50	Ilimitado	0,68	3.500
0,51	400.000	0,69	2.500
0,52	300.000	0,70	2.000
0,53	240.000	0,71	1.500
0,54	180.000	0,72	1.100
0,55	130.000	0,73	850
0,56	100.000	0,74	650
0,57	75.000	0,75	490
0,58	57.000	0,76	360
0,59	42.000	0,77	270
0,60	32.000	0,78	210
0,61	24.000	0,79	160
0,62	18.000	0,80	120
0,63	14.000	0,81	90
0,64	11.000	0,82	70
0,65	8.000	0,83	50
0,66	6.000	0,84	40
0,67	4.500	0,85	30
(*) Igual à tensão de tração na flexão devida à carga dividida pela resistência característica à tração na flexão do concreto.			

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP

No PCA/66, o *consumo de resistência à fadiga* (C_{RF}) é definido como relação porcentual entre o número previsto de repetições de uma carga qualquer e o número admissível de repetições dessa mesma carga. Para se ter o consumo total da resistência à fadiga, soma-se todos os C_{RF} individuais de todas as categorias de eixo relacionadas no projeto, para uma determinada espessura de projeto, assim esse valor do C_{RF} deve ser igual ou inferior a 100% para que seja adequada para o projeto (ABCP, 1989).

3.1.1.2. Suporte da Fundação (Subleito)

É utilizado para o dimensionamento da espessura do pavimento relacionado ao suporte do subleito ou sub-base, nesse método, o entendimento de *Westergaard*, isso significa que admi-se que a pressão exercida em qualquer ponto da fundação (subcamadas) seja diretamente proporcional à deflexão da placa naquele ponto (DNIT, 2005).

A constante de proporcionalidade se chama *coeficiente de recalque*, ou *módulo de Westergaard*, ou ainda *módulo de reação*, cujo símbolo é k , pode ser encontrado por fórmula (não será tratado nesse trabalho) ou por tabelas já desenvolvidas relacionadas os tipos de solos (ABCP, 1989).

Na tabela 3.2 abaixo, que também será adotada para PCA/84, esta destacado a faixa de variação dos valores de coeficiente de recalque relacionados aos diversos tipos de solos (classificação AASHTO-BPR), que tem utilização para a avaliação prévia de k para os cálculos preliminares de custo e jamais para dimensionamento final.

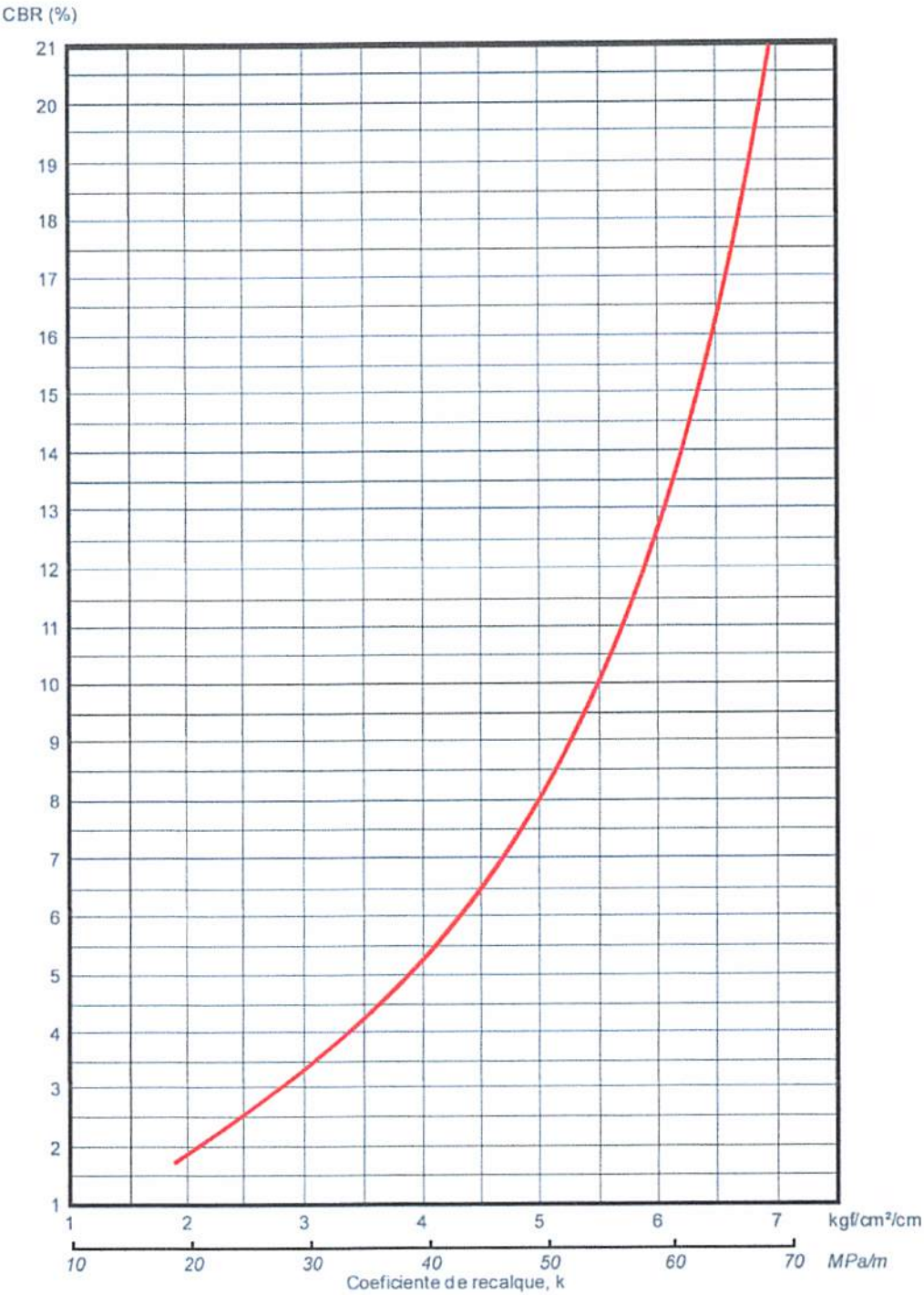
Tabela 3.2 - Relação aproximada entre o tipo do solo do subleito e o coeficiente de recalque (k)

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

Fonte: DNIT, 2005

Em projetos menores que não tenha uma grande importância, quando não se tenha os equipamentos, é de uso comum que sejam usados os valores do índice de suporte Califórnia (CBR) correlacionados ao coeficiente de recalque do solo de subleito (Figura 3.1), sendo feita com precaução e consultada a experiência regional (ABCP, 1989).

É de uso internacional aprovado inserir uma camada de sub-base, com algumas funções que para o DNIT são, proporcionar suporte razoável, uniforme e constante, eliminar a ocorrência do fenômeno de bombeamento dos finos do subleito, causa primordial da ruína de grande parte dos antigos pavimentos de concreto e aumentar o coeficiente de recalque de cálculo, trazendo portanto, uma certa economia na espessura da placa de concreto. Neste caso, o procedimento mais indicado será a execução de provas de carga estáticas no topo da sub-base, para fornecer valores para o dimensionamento. Pode-se encontrar o coeficiente de recalque lançando uma correlação entre os valores do coeficiente de recalque do solo do subleito e os valores obtidos para o Índice de Suporte Califórnia (CBR) (Figura 3.1).



Fonte: DNIT, 2005

Figura 3.30 - Relação entre Índice de Suporte Califórnia (CBR) e coeficiente de recalque (k) do subleito

3.1.1.3. Tráfego - Tensões Devidas às Cargas

No início dos tempos da pavimentação em concreto só se encontrava métodos básicos de dimensionamento quando as faixas de tráfego possuíam 2,75 m de largura forçando os veículos a usarem a borda livre e a junção entre esta e a junta transversal. Esse acontecimento

fazia com que a placa se se iguala a uma viga triangular em balanço, fazendo com que tenha no canto da placa, uma tensão crítica de tração na flexão no plano bissetor.

Estudos foram desenvolvidos sobre a distribuição das cargas relacionadas às placas, encontrando porcentagens de frequência para cada caso predominante de posição de veículo mostrado na figura 3.2 abaixo.

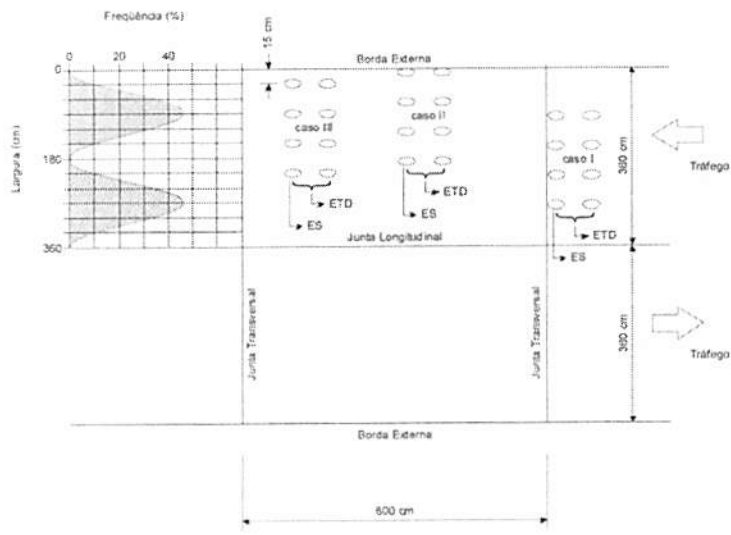


Figura 3.31 - Posições de carga e distribuição do tráfego

3.1.1.4. Tráfego - Fatores de Segurança para Cargas

Para o dimensionamento da espessura das placas do pavimento rígido são levados em consideração fatores de segurança para cada tipo de tráfego de acordo com o DNIT especificados no quadro 3.1.

Quadro 3.8 - Fatores de segurança para as cargas (FSC)

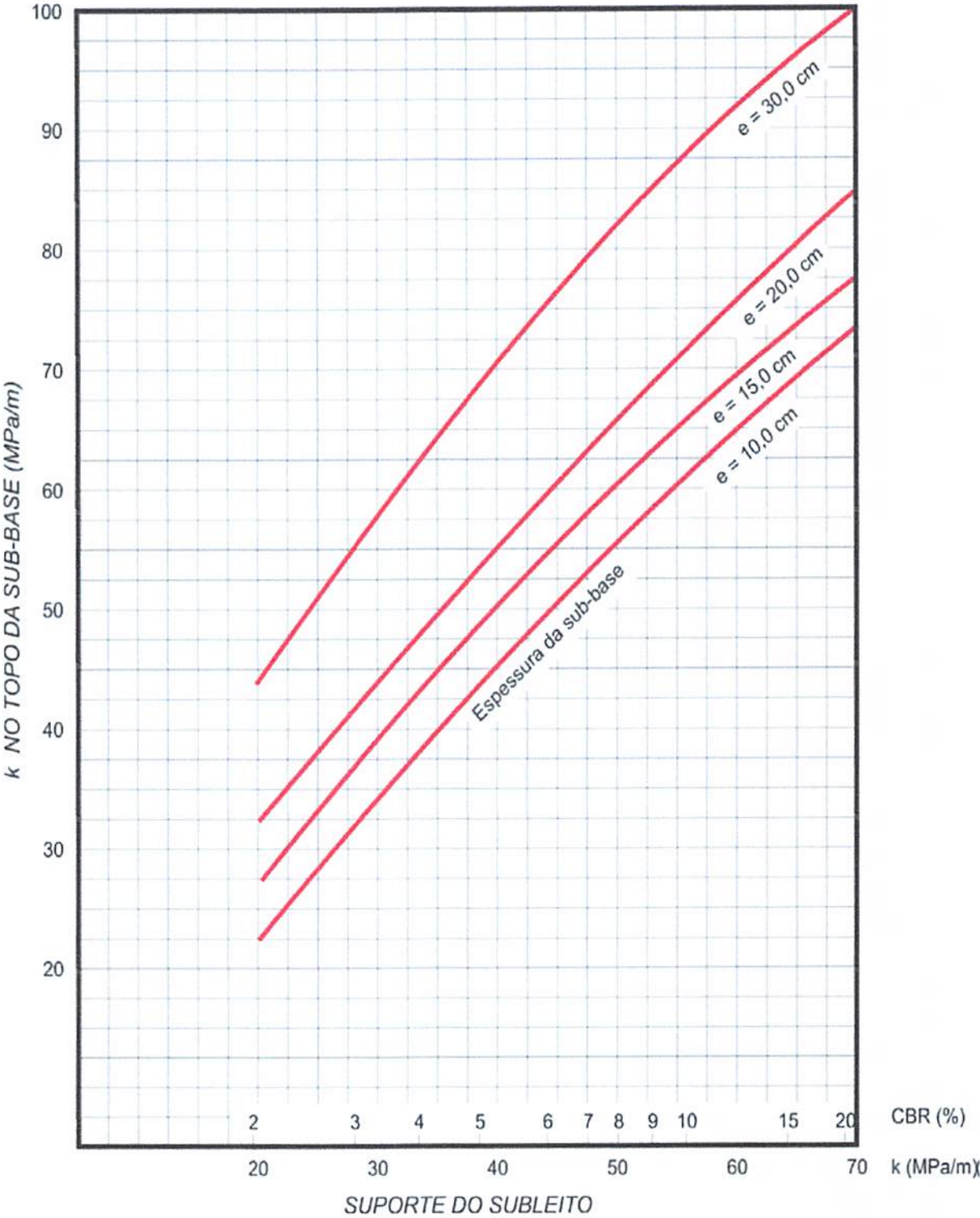
TIPO DE PAVIMENTO	FSC
Estradas rurais, ruas residenciais e vias em geral, submetidas a tráfego leve de caminhões	1,0
Rodovias e vias urbanas, submetidas a tráfego de caminhões pesados	1,1
Auto-estradas, rodovias com mais de duas faixas por pista, ou em qualquer projeto para tráfego ininterrupto ou de grande volume de caminhões pesados	1,2

Fonte: DNIT, 2005

3.1.1.5. Coeficiente de Recalque

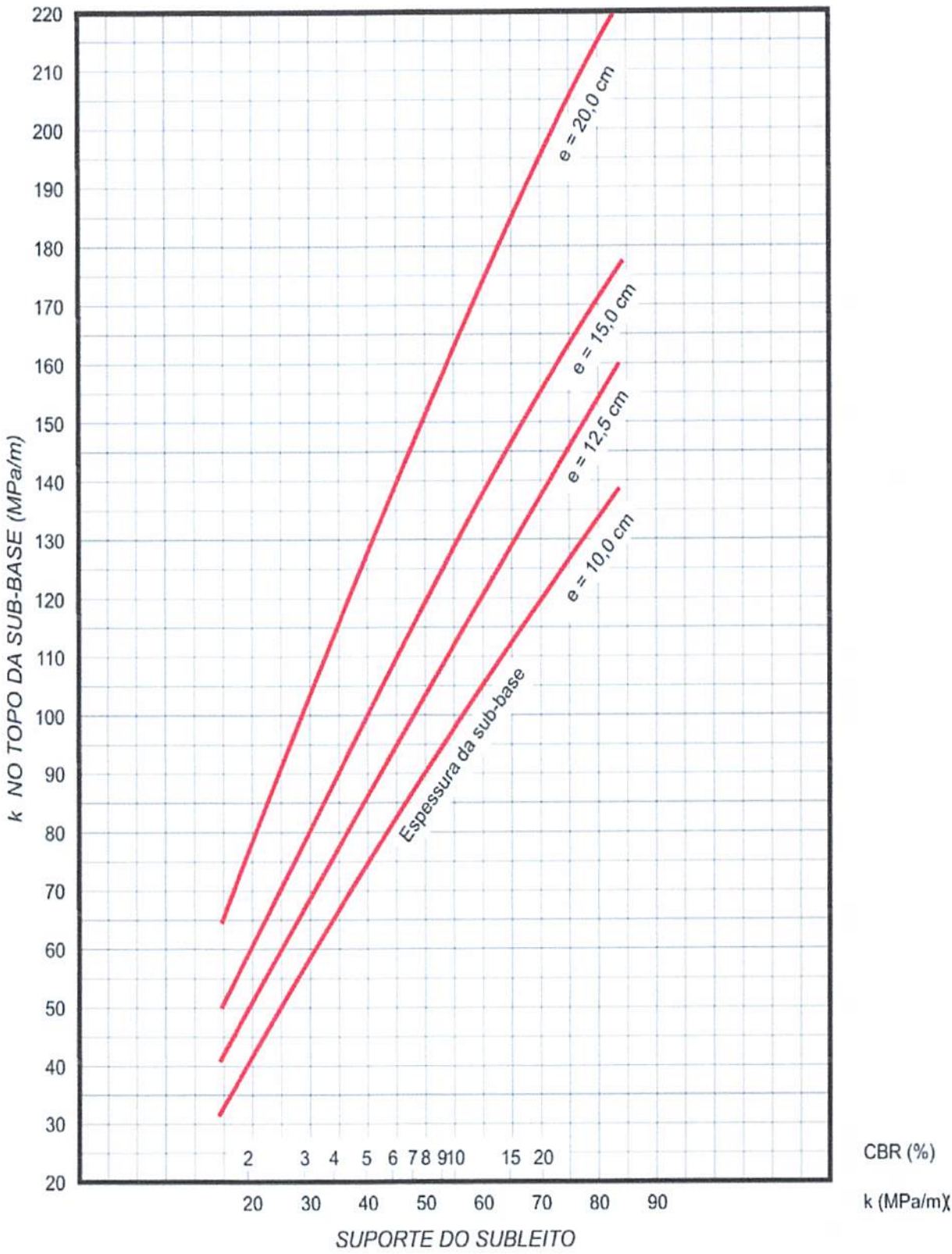
Ao se adotar o tipo de subleito determinado na tabela 2, tem-se o coeficiente de recalque na base. A partir desse valor se encontra o do coeficiente de recalque do sistema (topo - kab)

utilizando os ábacos dos gráficos das figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6. É recomendável limitar o valor máximo do coeficiente de recalque no topo da sub-base, a ser considerado no cálculo da espessura necessária de concreto, em cerca de 150 MPa/m.



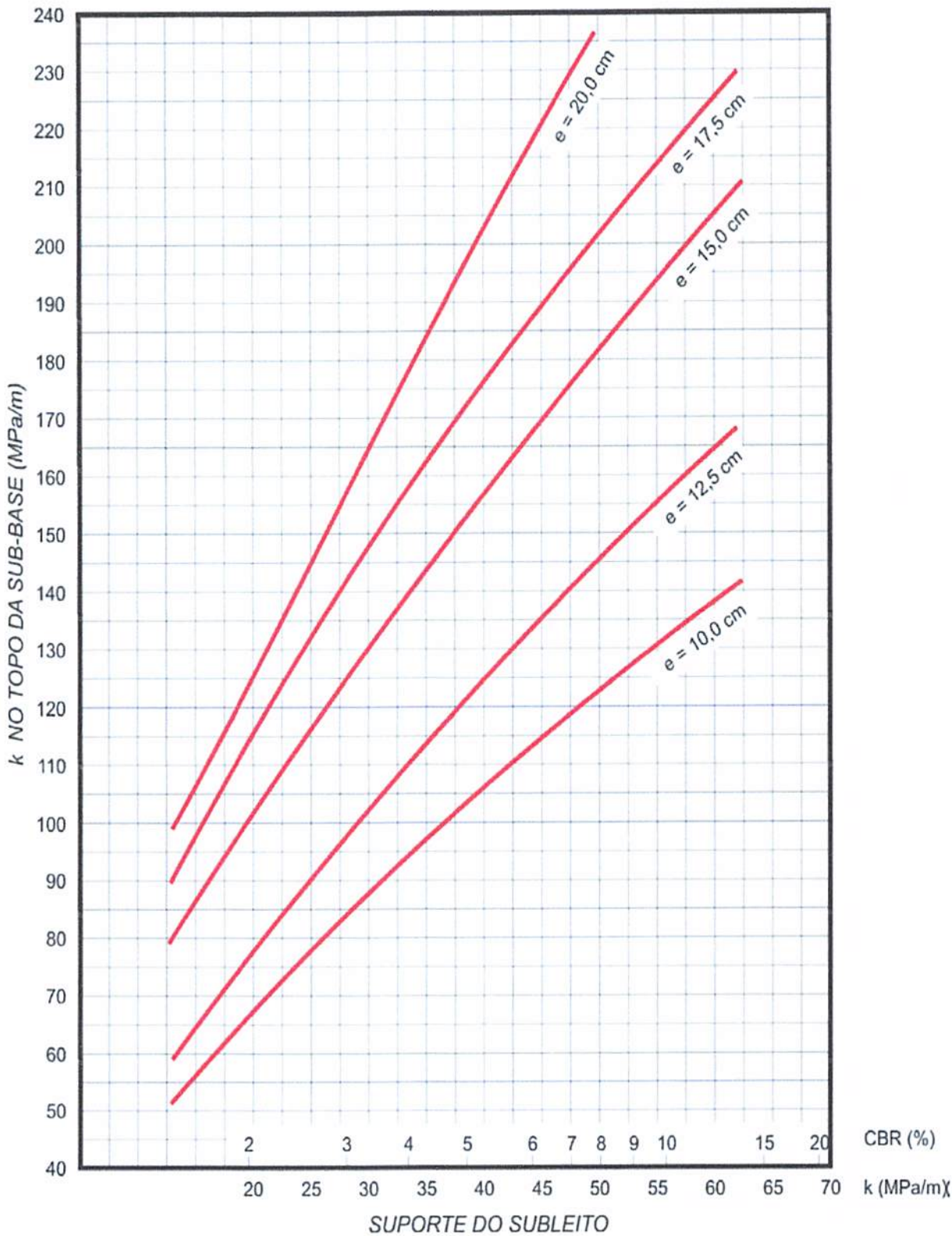
Fonte: DNIT, 2005

Figura 3.32 - Aumento de k devido à presença de sub-base granular



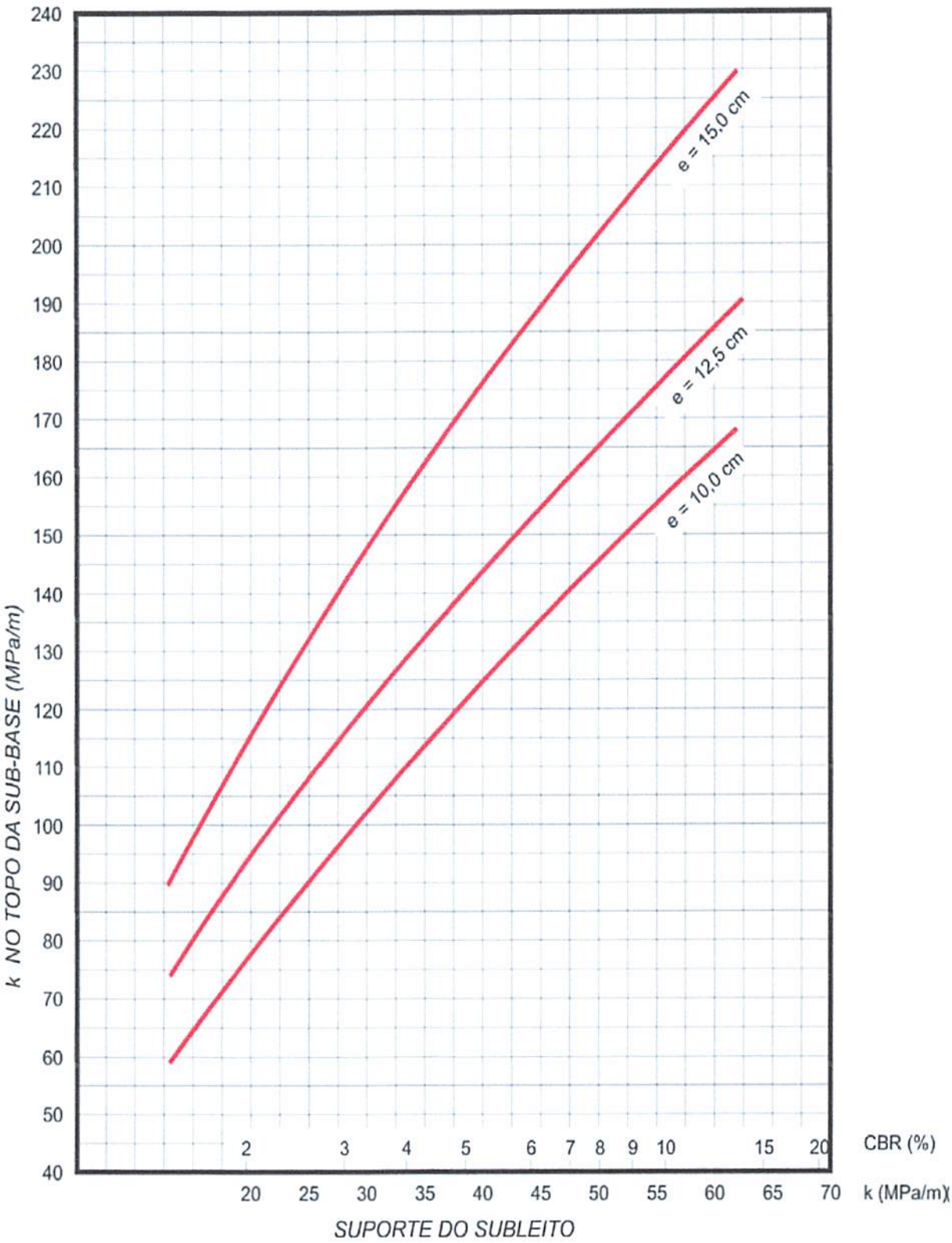
Fonte: DNIT, 2005

Figura 3.33 - Aumento de k devido à presença de sub-base de brita tratada com cimento



Fonte: DNIT, 2005

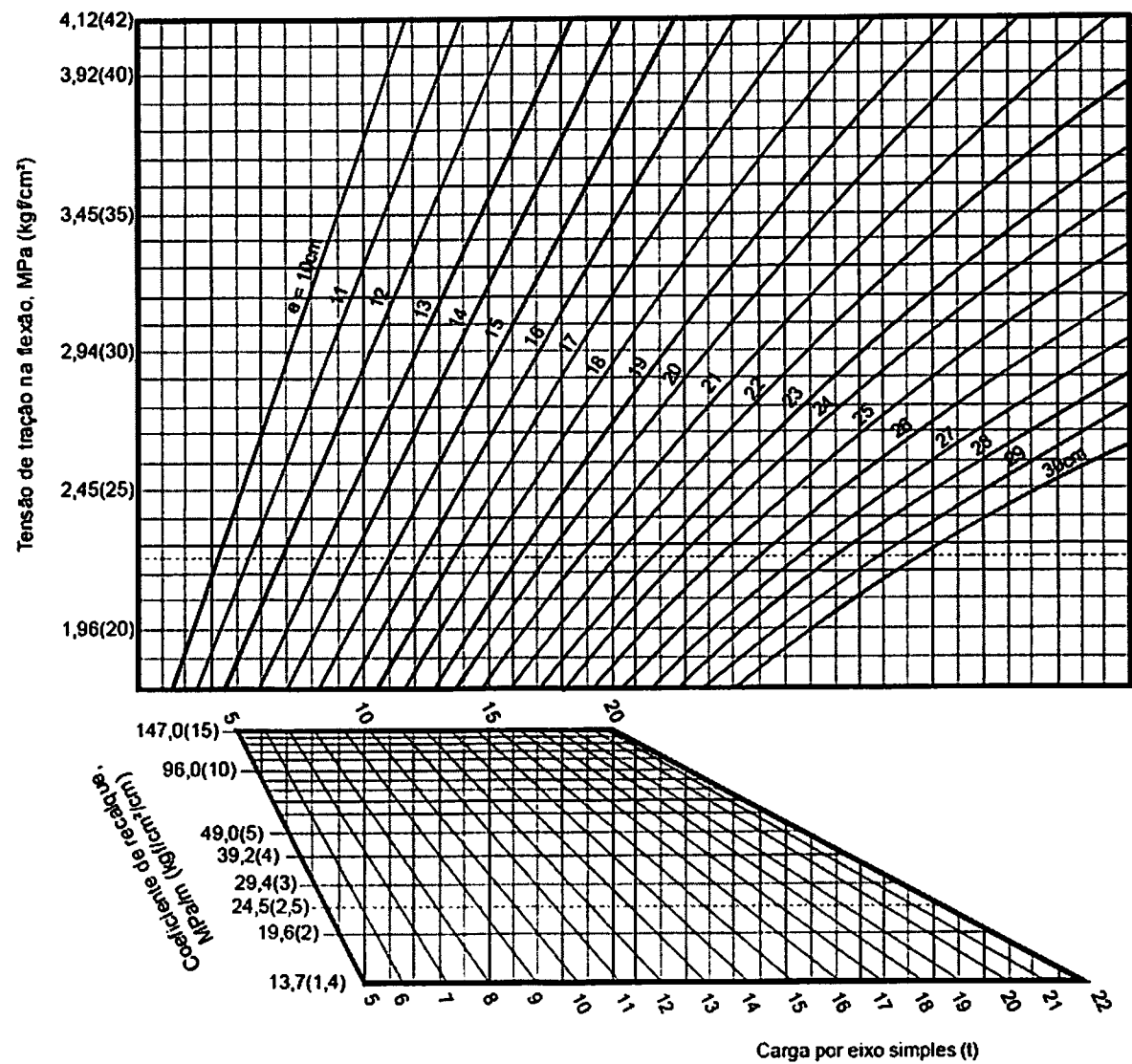
Figura 3.34 - Aumento de k devido à presença de sub-base de solo-cimento



Fonte: DNIT, 2005

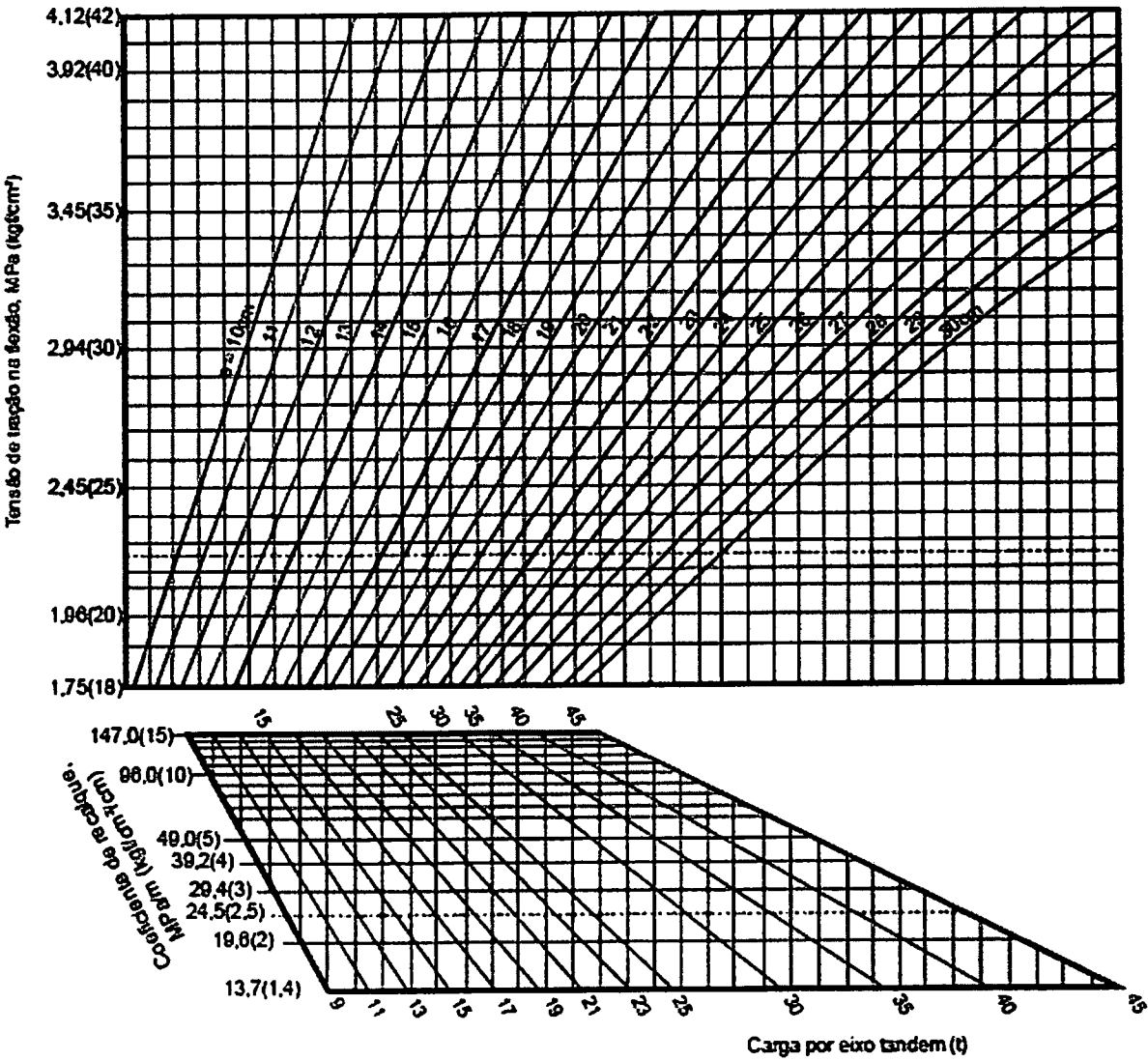
Figura 3.35 - Aumento de k devido à presença de sub-base de concreto rolado

As figuras 3.7, 3.8 e 3.9 abaixo, são utilizadas, a partir da relação entre a espessura adotada, a carga por eixos e o coeficiente de recalque do sistema, para encontrar as tensões de tração na flexão de cada cargas por eixos.



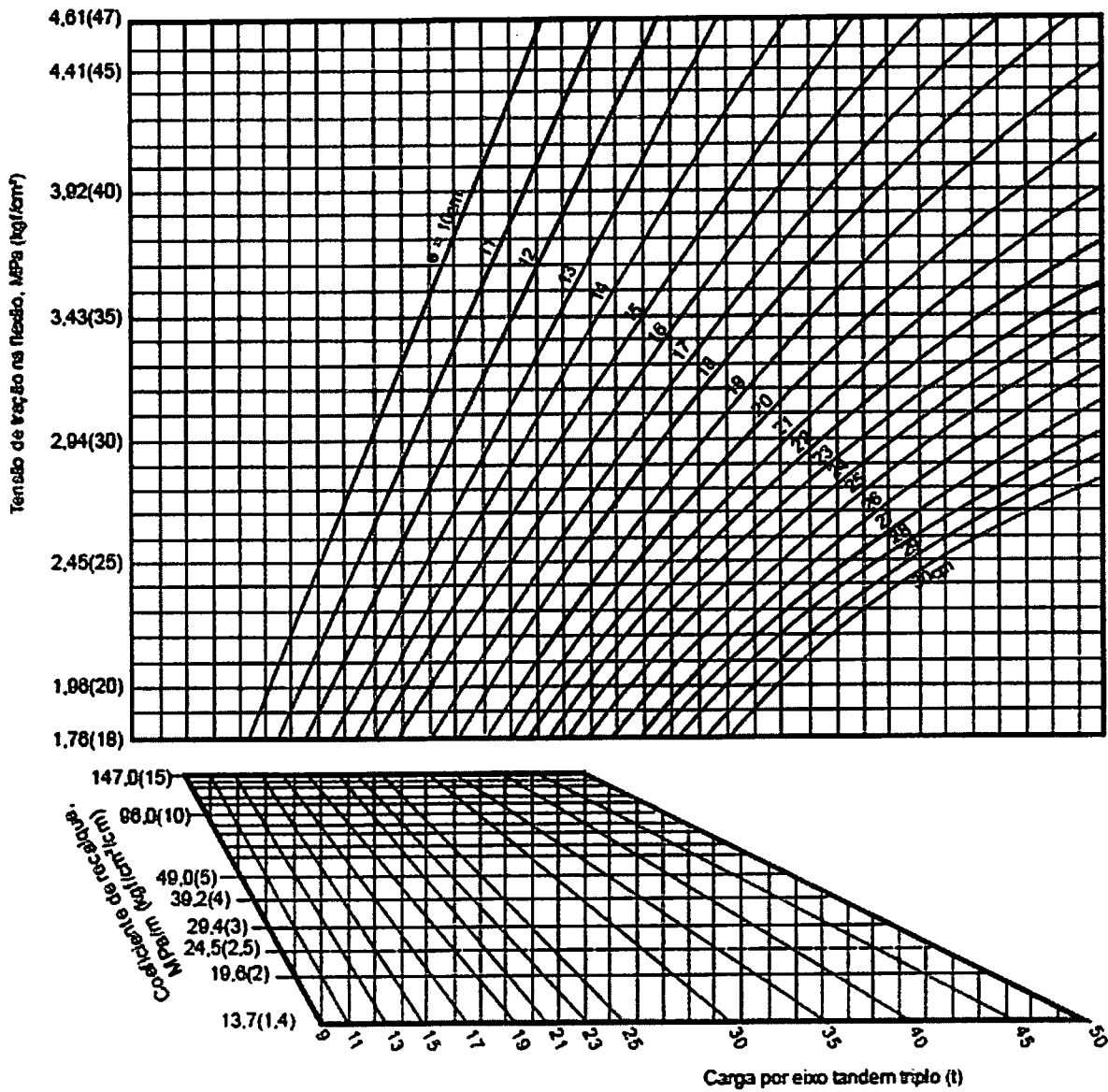
Fonte: DNIT, 2005

Figura 3.36 - Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (Caso de eixos simples)



Fonte: DNIT, 2005

Figura 3.37 - Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (Caso de eixos tandem duplos)



Fonte: DNIT, 2005

Figura 3.38 - Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (Caso de eixos tandem triplos)

3.1.2. **PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA) DE 1984**

O método do PCA (1984) é um estudo comparativo que usa curvas de dimensionamento como ferramentas de pré-dimensionamento que possui vantagens sobre os modelos analíticos, assim fazendo análises estruturais das bases cimentadas levando em conta a questão das variações térmicas e a transmissão das cargas nas juntas.

De acordo com Balbo (2009), o método PCA (1984) não leva em consideração as variações causadas pela temperatura ao longo da espessura da placa de concreto, ou seja, com quaisquer variações térmicas as tensões seria as mesmas. Por esse fato o PCA (1984) fica um pouco longe da realidade, assim gerando algumas questões do porque que ainda hoje nos países menos desenvolvidos esse fator é desconsiderado se é por ignorar o tema ou economia das obras de pavimento de concreto.

A versão da PCA de 1984 teve várias modificações introduzindo novos conhecimentos de construção, gerenciamento, projetos geométricos e cálculos de tensões que se aplica aos pavimentos de concreto simples com barras de transferência (BT) e a pavimentos com armaduras contínuas e distribuídas que não tem funcionalidade estrutural.

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos (2005), outros tópicos considerados são:

- a) o tipo e o grau de transferência de carga nas juntas transversais,
- b) os efeitos da existência ou não de acostamentos de concreto,
- c) a contribuição estrutural das sub-bases de concreto pobre rolado ou convencional, ou então de sub-bases tratadas com cimento,
- d) a ação dos eixos tandem triplos,
- e) introduz um modelo de ruína por erosão da fundação do pavimento (no qual se embute um modelo de ruína por formação de "degraus" ou escalonamento "*faulting*" nas juntas transversais), usando-o concomitantemente com o modelo modificado defadiga.

3.1.2.1. PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO

O Manual de Pavimentos Rígidos (2005) diz que este método PCA de 1984 consiste em 4 procedimentos, nos estudos teóricos clássicos sobre o comportamento de placas de concreto (Westergaard, Pickett) e modernas análises computacionais empregando elementos finitos (Tayabji e Colley), nos ensaios de laboratório e em modelos, sobre comportamento e influência de juntas, sub-bases e acostamentos no desempenho de pavimentos de concreto, nas pistas experimentais, especialmente da AASHO (hoje, AASHTO), além de estudos levados a efeito por diversos órgãos rodoviários e aeroportuários e na observação metódica de pavimentos em serviço.

3.1.2.2. PARÂMETROS - DIMENSIONAMENTO

3.1.2.2.1. Modelos de Ruína - Fadiga

A fadiga (Figura 3.10) se da pelo processo repetitivo das cargas atuantes no pavimento rígido, ressaltando também que é necessário que a espessura encontrada à resista antes de chegar a vida útil.

As tensões de tração por flexão consideradas no cálculo, são as produzidas pela carga tangente à borda longitudinal; a curva de fadiga alcança valores abaixo da relação de tensões limite de 0,50, o que elimina a descontinuidade nesse ponto e afasta a possibilidade de acontecer casos irreais de dimensionamento quanto ao número admissível de solicitações (DNIT, 2005).

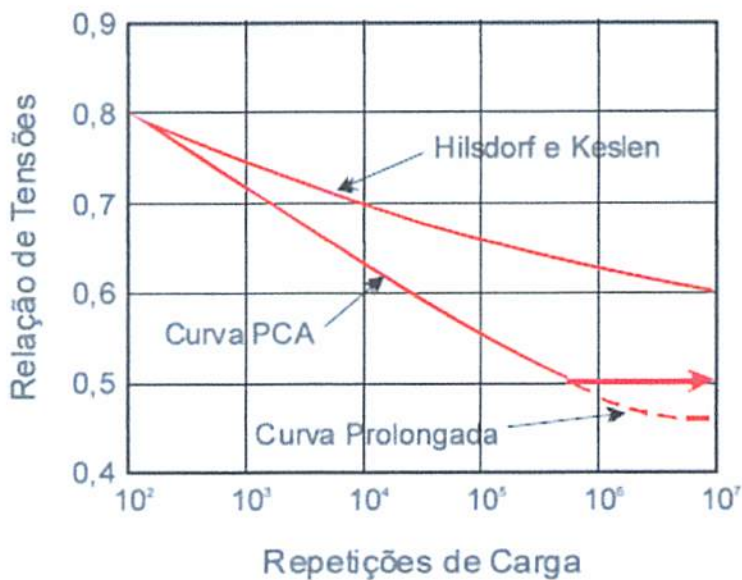


Figura 3.39 - Curvas de Fadiga

3.1.2.2.2. Modelos de Ruína - Erosão

Define-se como a perda da subcamada devido à água em conjunto com passagem das cargas pesadas, principalmente dos múltiplos eixos que ocorre não só nas juntas transversais mais também nas laterais desse pavimento.

Ocorre nos cantos e nas bordas deformações verticais gerando escalões (degraus nas juntas transversais), principalmente se não houver barras de transferência (BT) fazendo com que não haja contato da placa de concreto com as subcamadas ou até mesmo perda dessas subcamadas que causam vazios e esse tipo de consequência não pode ser calculado ou previsto no método de fadiga (Figura 3.11a).

Na análise de erosão, a deformação crítica é aquela que se dá no canto da placa (Figura 3.11b) quando a carga está tangenciando, ao mesmo tempo, a borda longitudinal livre do pavimento e a junta transversal.

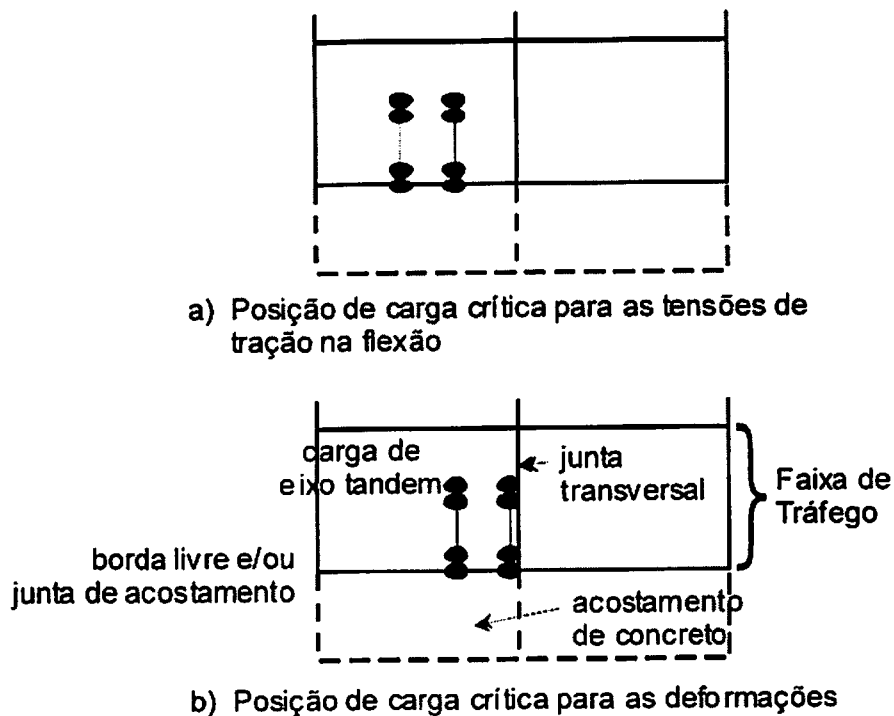


Figura 3.40 - Posições críticas de carga

3.1.2.2.3. Características do Concreto

Nesse método é incorporado, para um período de 20 anos com as variações de carga, o aumento da resistência à tração na flexão do concreto depois dos 28 dias (idade para estabilidade da resistência característica).

3.1.2.2.4. Acostamento De Concreto

Para o DNIT (2005), O efeito dos acostamentos de concreto é substancial, ainda mais no que toca à redução das deformações verticais ao longo da borda no pavimento. O modelo estrutural computa uma eficiência de junta da ordem de 65%, no caso de haver ligação entre o acostamento e o pavimento e a adoção de um acostamento de concreto pode resultar em até cerca de 4 cm na redução na espessura necessária de placa, dependendo dos demais parâmetros de projeto.

3.1.2.2.5. Barras de Transferência

Em um pavimento de concreto com barras de transferência, se comparado a um pavimento sem BT, contribuem de tal forma que se tem uma redução em sua espessura de até 5 cm, As BT não é aplicada ao dimensionamento deste trabalho.

3.1.2.2.6. Fatores de Segurança para Cargas

Para o dimensionamento da espessura das placas adota-se os seguintes fatores de segurança para cargas expostos no quadro 3.2.

Quadro 3.9 - Fatores de segurança para as cargas (FSC)

TIPO DE PAVIMENTO	FSC
Para ruas com tráfego com pequena porcentagem de caminhões e pisos em condições semelhantes de tráfego (estacionamentos, por exemplo).	1,0
Para estradas e vias com moderada frequência de caminhões.	1,1
Para altos volumes de caminhões.	1,2
Pavimentos que necessitem de um desempenho acima do normal.	Até 1,5

Fonte: DNIT, 2005

3.1.2.2.7. Coeficientes de Recalque

Para o dimensionamento utilizando a versão de 1984, atualização do método de 1966, foram desenvolvidos novos conhecimentos e procedimentos de cálculos, sendo assim, os formulários-tipo dos quadros 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 e nas figuras 3.12 e 3.13 foram criadas a partir desse estudos para o dimensionamento da espessura do pavimento de concreto. Esses quadros e figuras foram retirados do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), para o dimensionamento com os parâmetros específicos deste trabalho.

Quadro 3.10 - Tensão equivalente para eixos simples e tandem duplos (MPa)

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

ES: Eixos Simples; ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT, 2005

Quadro 3.11 - Tensão equivalente para eixos tandem triplos (MPa)

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

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fonte: DNIT, 2005

Quadro 3.12 - Fator de erosão para eixos simples e tandem duplos (MPa)

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

ES: Eixos Simples; ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT, 2005

Quadro 3.13 - Fator de erosão para eixos tandem triplos (MPa)

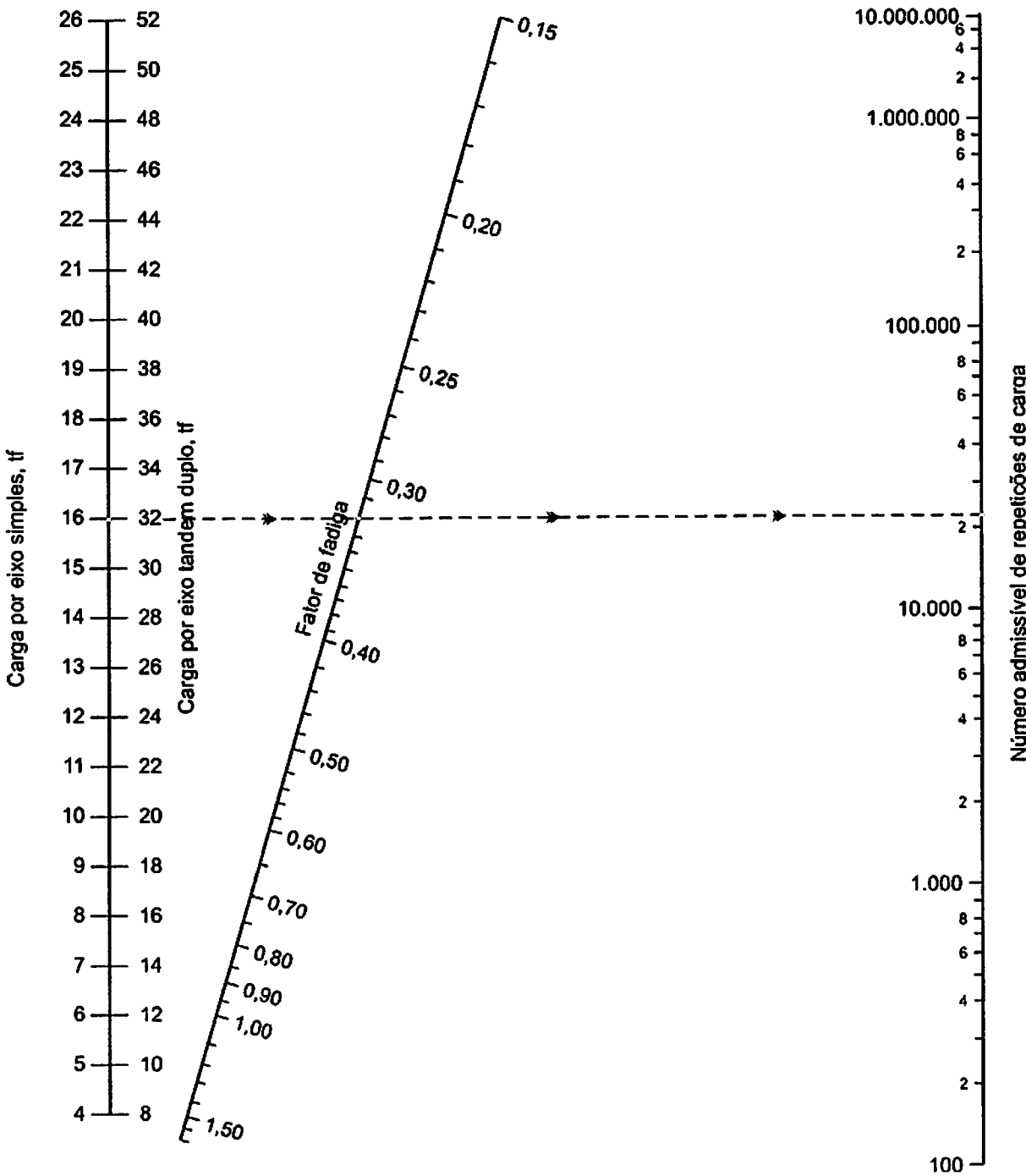
Espessura da Placa (cm)	Pavimento com acostamento de concreto e junta sem barra de transferência					
	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,29	3,18	3,12	3,09	3,02	2,99
13	3,23	3,11	3,05	3,01	2,94	2,91
14	3,17	3,04	2,98	2,94	2,87	2,83
15	3,12	2,99	2,92	2,88	2,80	2,77
16	3,08	2,94	2,87	2,82	2,74	2,70
17	3,03	2,89	2,82	2,77	2,69	2,65
18	2,99	2,85	2,77	2,72	2,60	2,60
19	2,96	2,81	2,73	2,68	2,59	2,55
20	2,93	2,77	2,69	2,64	2,54	2,50
21	2,89	2,74	2,65	2,60	2,50	2,46
22	2,87	2,71	2,62	2,56	2,47	2,42
23	2,84	2,68	2,59	2,53	2,43	2,38
24	2,81	2,65	2,56	2,50	2,40	2,35
25	2,79	2,62	2,53	2,47	2,37	2,29
26	2,77	2,60	2,50	2,44	2,34	2,26
27	2,74	2,57	2,48	2,39	2,31	2,23
28	2,72	2,55	2,46	2,37	2,28	2,20
29	2,70	2,53	2,43	2,35	2,26	2,20
30	2,68	2,51	2,41	2,33	2,23	2,18
31	2,67	2,49	2,39	2,31	2,21	2,16
32	2,65	2,47	2,37	2,29	2,19	2,13
33	2,63	2,45	2,35	2,27	2,17	2,11
34	2,61	2,43	2,33	2,27	2,15	2,09

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fonte: DNIT, 2005

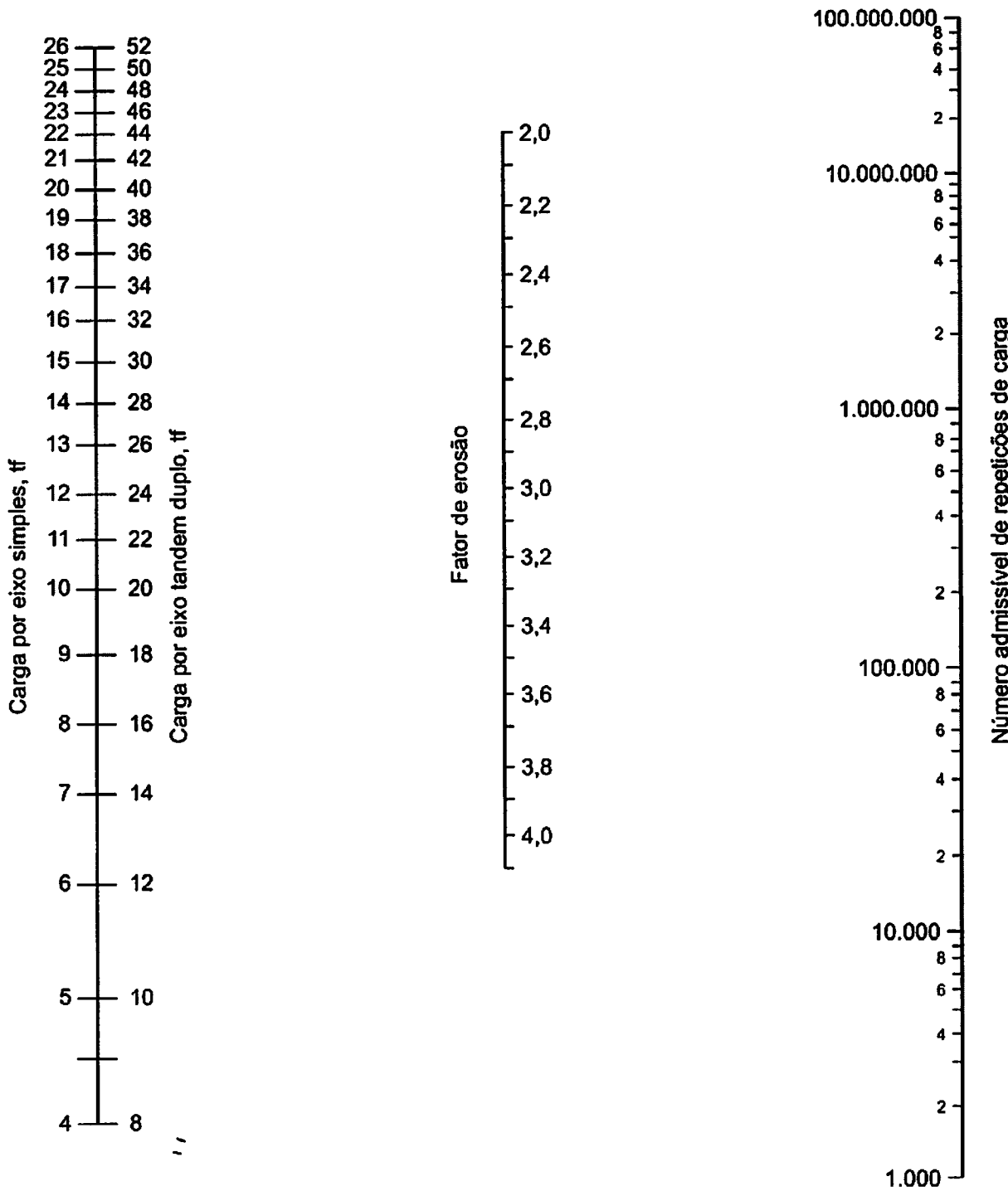
As figuras 3.12 e 3.13 são usadas para encontrar as repetições admissíveis para cada carga por eixo.

Figura 3.41 - Análise de fadiga - Número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga
(com ou sem acostamento de concreto)



Fonte: DNIT, 2005

Figura 3.42 - Análise de erosão - Número de repetições admissíveis de carga com base no fator de erosão
(sem acostamento de concreto)



Fonte: DNIT, 2005

3.2. BREVE ROTEIRO DE CÁLCULO DO TRÁFEGO

Neste trabalho, o tráfegonão será estudado, porque o foco é o comparativo entre procedimentos de cálculos do pavimento de concreto simples. Mas abaixo, um breve processo de cálculo para encontrar as frequências totais das classes de veículos a serem adotados no dimensionamento, que será demonstrado na Aplicação dos Métodos na página 59.

Considerações de cálculo (fórmulas retiradas da ABCP de 1989):

- ✓ V_0 = volume diário de veículos;
- ✓ t = Taxa de crescimento de tráfego em progressão aritmética;
- ✓ P = Período de projeto;
- ✓ P_{ji} = Porcentagem de veículos.

Equação 3.1 - Tráfego médio diário final (V_p)

$$V_p = V_0 * (1 + P \times t) = \text{veículos /dia}$$

Equação 3.2 - Tráfego médio diário durante o período de projeto (V_m)

$$V_m = \frac{V_0 + V_p}{2} = \text{veículos /dia}$$

Equação 3.3 - Número total de veículos durante o período de projeto (V_t)

$$V_t = 365 \times P \times V_m = \text{veículos}$$

Equação 3.4 - Número de solicitações de eixo por classes de veículo (N)

$$N = \frac{\text{Porcentagem} \times V_t \times F_E}{100} = \text{eixos}$$

Equação 3.5 - Frequência das cargas por eixo por classe de veículo (N_{ji})

$$N_{ji} = P_{ji} \times N / 100$$

Com o cálculos das frequências na fórmula 6, faz-se então o somatório das frequências de cada carga por eixos totais dos veículos a ser usado no dimensionamento.

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

Para o dimensionamento de pavimentos rígidos seguem abaixo os dados iniciais para os cálculos do tráfego a ser adotado nos projetos de dimensionamento do métodos PCA/66, bem como, também serão utilizados no método PCA/84 para a realização do comparativo entre os mesmos.

Vamos considerar para este dimensionamento os seguintes dados necessários, o volume diário (V_0) de 3000 veículos, uma taxa de crescimento de tráfego em progressão aritmética de 7,5 % e o período de projeto de 20 anos.

Dados de projeto:

- ✓ $V_0 = 3000$ veículos/dia
- ✓ Taxa anual de crescimento do tráfego em progressão aritmética (t) = 7,5%
- ✓ Período de Projeto (P) = 20 anos

Na tabela 4.1 está especificado a quantidade de veículos por tipo, em porcentagem, que trafegam durante um dia, além do fator de eixo (F_E) de cada tipo de veículo.

Tabela 4.3 - Distribuição percentual do tráfego por classe de veículo conforme o DNER:

Tipo de Veículo	Fator de Eixo (F_E)	Porcentagem (%)
Carros de passeio	2	50
Ônibus	2	5
Caminhões leves	2	12
Caminhões médios	2	15
Caminhões Pesados	2	15
Reboques e Semirreboques	3	3

Fonte: ABCP, 1989

Com os dados anteriormente descritos, calcula-se o número de solicitações de eixos por tipo de veículo a partir das equações 3.1, 3.2 e 3.3 da página 58:

$$\text{Tráfego médio final} \Rightarrow V_p = 3000 \times (1 + 20 \times 0,075) = 7500 \text{ veículos / dia}$$

$$\text{Tráfego médio diário} \Rightarrow V_m = \frac{3000 + 7500}{2} = 5.250 \text{ veículos/dia}$$

$$\text{Número total de veículos} \Rightarrow V_t = 365 \times 20 \times 5250 = 38.325.000 \text{ veículos}$$

Na tabela 4.2, mostra o número de solicitações de eixos por classe de veículos divididos em carros de passeio (C_p), ônibus (O), caminhões leves (C_L), caminhões médios (C_m), caminhões pesados (C_p), reboques e semi-reboques (R). Para se calcular essas solicitações utiliza-se a equação 3.4, em que se multiplica a porcentagem pelo número total de cada tipo de veículo e esse resultado multiplica-se pelo fator de eixo como mostra abaixo. As solicitações dos carros de passeio e dos caminhões leves não são levados em consideração nos cálculos da frequência por não gerarem nenhum efeito satisfatório sobre o pavimento.

$$NO = \frac{5 \times 38.325.000 \times 2}{100} = 3.832.500 \text{ eixos}$$

$$NCm = \frac{15 \times 38.325.000 \times 2}{100} = 11.497.500 \text{ eixos}$$

$$NCp = \frac{15 \times 38.325.000 \times 2}{100} = 11.497.500 \text{ eixos}$$

$$NR = \frac{3 \times 38.325.000 \times 3}{100} = 3.449.250 \text{ eixos}$$

Tabela 4.4 - Solicitações de eixos

Tipo de veículo	Sigla	Número de solicitações de eixos por classe de veículo
Carros de Passeio	C	0
Ônibus	O	3.832.500
Caminhões Leves	C_L	0
Caminhões Médios	C_m	11.497.500
Caminhões Pesados	C_p	11.497.500
Reboques e Semi-reboques	R	3.449.250

Fonte: Autor

A partir das solicitações obtidas encontramos as frequências de cada tipo de veículo pelo produto entre o número de solicitações de eixos por classe de veículo e a porcentagem de cada carga de eixo do tipo de veículo utilizando a equação 3.5. Nas tabelas 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 estão as frequências de cargas por eixo independente de cada tipo de veículo encontradas a partir desses resultados.

Tabela 4.5 - Carros de passeio (C)

Carros de passeio (C)	0	eixos
Cargas por eixo (tf)	Porcentagem (P_C) %	Frequência ($F_C = P_C * NC / 100$)
Eixos Simples		
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0

Fonte: Autor

Tabela 4.6 - Ônibus (O)

Ônibus (O)	3.832.500	eixos
Cargas por eixo (tf)	Porcentagem (P_O) %	Frequência ($F_O = P_O * NO / 100$)
Eixos Simples		
9	3	114.975
8	18	689.850
7	11	421.575
6	14	536.550
5	32	1.226.400
4	16	613.200
3	5	191.625
2	1	38.325

Fonte: Autor

Tabela 4.7 - Caminhões leves (C_L)

Caminhões leves (C_L)	0	eixos
Cargas por eixo (tf)	Porcentagem (PC_L) %	Frequência ($F_L = PC_L * NC_L / 100$)
Eixos Simples		
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0

Fonte: Autor

Tabela 4.8 - Caminhões médios (C_m)

Caminhões médios (C_m)	11.497.500	eixos
Cargas por eixo (tf)	Porcentagem (PC _m) %	Frequência ($N_{ji} = PC_m * NC_m / 100$)
Eixos Simples		
12	2	114.975
11	2	229.950
10	4	459.900
9	9	1.034.775
8	7	804.825
7	3	344.925
6	3	344.925
5	5	574.875
4	9	1.034.775
3	18	2.069.550
2	32	3.679.200
1	6	804.825

Fonte: Autor

Tabela 4.9 - Caminhões pesados (C_p)

Caminhões pesados (C_p)	11.497.500	eixos
Cargas por eixo (tf)	Porcentagem (PC _p) %	Frequência ($FC_p = PC_p * NC_p / 100$)
Eixos Simples		
6	1	229.950
5	13	1.494.675
4	16	2.989.350
3	8	459.900
2	3	574.875
Eixos tandem duplos		
22	1	114.975
21	3	229.950
20	1	114.975
19	8	229.950
18	1	229.950
17	5	689.850
16	3	574.875
15	1	229.950
14	2	229.950
13	1	459.900
12	1	344.925
< 12	6	1.264.725
Eixos tandem triplos		
28	2	229.950
26	2	229.950
24	1	229.950
< 12	2	459.900

Fonte: Autor

Tabela 4.10 - Reboques e Semi-reboques (R)

Reboques e Semi-reboques (R)	3.449.250	eixos
Cargas por eixo (tf)	Porcentagem (PR) %	Frequência ($F_{CP} = PR * NR / 100$)
Eixos Simples		
13	3	103.478
12	5	103.478
11	6	68.985
10	5	172.463
9	8	275.940
8	7	241.448
7	4	137.970
6	2	68.985
5	4	206.955
4	14	482.895
3	13	448.403
2	11	379.418
1	2	206.955
Eixos tandem duplos		
21	1	34.493
20	1	34.493
19	1	34.493
18	1	34.493
17	2	68.985
16	1	34.493
< 16	4	137.970
Eixos tandem triplos		
27	3	103.478
26	1	34.493
<20	1	34.493

Fonte: Autor

Na tabela 4.9, na página 64, encontra-se o somatório das frequências dos tipos de veículos para cada por eixo anteriormente calculados nas tabelas 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Com o somatório das frequências das cargas por eixo, temos o primeiro dado importante para o dimensionamento do pavimento de concreto simples que serão logo mais encontrados pelos métodos da *Portland Cement Association* de 1966 e a sua atualização de 1984.

Tabela 4.11 - Somatório das frequências dos tipos de veículos para cada carga por eixo

Resumo	
Carga por eixo (tf)	Frequência no período de projeto (eixos)
Eixo simples	
13	103.478
12	218.453
11	298.935
10	632.363
9	1.425.690
8	1.736.123
7	904.470
6	1.180.410
5	3.502.905
4	5.120.220
3	3.169.478
2	4.671.818
1	1.011.780
Eixos tandem duplos	
22	114.795
21	264.443
20	149.468
19	264.443
18	264.443
17	758.835
16	609.368
< 16	2.667.420
Eixos tandem triplos	
28	229.950
27	103.478
26	264.443
< 20	494.393

Fonte: Autor

Como neste trabalho está sendo feito um estudo, os dados são fictícios e a partir deles será feito o dimensionamento das placas pelos métodos estudados.

4.1. MÉTODO PCA 1966

Para o dimensionamento do pavimento de concreto nessa versão utiliza-se o formulário-tipo do quadro 4.1 para a espessura-tentativa possível a ser adotada para as placas de concreto.

No método PCA/66 tem-se, para calcular a espessura da placa de concreto, os dados para o exemplo que será desenvolvido nesse trabalho são os seguintes:

- ✓ A espessura da sub-base: 20 cm;
- ✓ O coeficiente de recalque da base (Tabela 3.2, pg. 40): $k = 65 \text{ MPa/m}$;
- ✓ A resistência característica de tração na flexão (pg. 38): $F_{ctM,28} = 4,5 \text{ MPa}$;
- ✓ O fator de segurança de cargas (Quadro 3.1, pg. 42): $FSC = 1,10$;
- ✓ Período de Projeto: 20 anos e;
- ✓ A frequência de tráfego durante o período de projeto lançados no quadro 4.1 para espessura-tentativa estudada, que foi calculada anteriormente e se encontra na Tabela 4.9 da página 64 deste trabalho.

A partir desses dados podemos dimensionar a placa de concreto através do roteiro abaixo:

- a) Lança-se as cargas por eixo e as cargas por eixo corrigidas, respectivamente, nas colunas 1 e 2 do quadro 4.1.
- b) Primeiramente escolhe-se o tipo de solo a ser adotado, assim, na tabela 3.2 (pg. 40) encontra-se o coeficiente de recalque da base, com esse valor e a espessura sub-base temos o coeficiente de recalque do sistema, k_{ab} , (topo) no figura 3.3 (sub-base granular, pg. 43). Quando não se tem o valor do coeficiente de recalque ele pode se encontrado a partir do CBR na figura 3.1 (pg. 41).
- c) Com o k_{ab} encontrado na letra (b) de 80 MPa/m , a espessura-tentativa de 20 cm e as cargas por eixos encontra-se, através das figuras 3.7, 3.8 e 3.9, as tensões de tração na flexão de cada carga por eixo lançadas na coluna 3 do quadro 4.1.

- d) Na coluna 4 do quadro 4.1, tem-se as relações de tensões que são encontradas dividindo as tensões na placa de cada carga por eixo pela resistência característica à tração na flexão do concreto ($F_{ctM,k} = 4,5 \text{ MPa}$).
- e) Utilizando a tabela 3.1 (pg. 39), com as relações de tensões, encontram-se os valores das repetições admissíveis dispostas na coluna 5 dos quadros 4.1, 4.2, e 4.3 para cada uma das solicitações de cargas.
- f) Na coluna 6, do quadro 4.1, estão os valores das repetições previstas (frequência) encontradas na tabela 4.9 da página 64.
- g) Enfim, na coluna 7 do quadro 4.1 obtém-se o consumo de resistência à fadiga para todas as cargas por eixo encontradas com a divisão das repetições previstas pelas repetições admissíveis e multiplicando por 100 para ser expresso em porcentagem.
- h) Com esses valores em porcentagem temos o consumo de resistência a fadiga para cada eixo no período de projeto estimado de 20 anos. Somando os valores da coluna 7 temos o valor total do consumo de resistência a fadiga no período de projeto estimado.
- i) O somatório é: $C_{RF \text{ total}} = C_{RF \text{ ES}} + C_{RF \text{ ETD}} + C_{RF \text{ ETT}}$.

No quadro 4.1, para a espessura de 20 cm adotada no dimensionamento encontrou-se um C_{RF} de 0% que é suficiente para o período de 20 anos. No entanto não é satisfatório por ser um valor que em termos técnicos a placa está superdimensionada gerando gastos desnecessários. Como foi dito anteriormente o C_{RF} limite máximo para um período de projeto deve ser igual a 100 % ou abaixo. Quanto mais próximo o C_{RF} de 100 % mais viável se torna. Sendo assim, um novo cálculo como uma nova espessura-tentativa é necessário e como o C_{RF} é muito abaixo a 100 % tenta-se uma espessura inferior.

Com os mesmos dados de projeto, no quadro 4.2 utilizou-se a espessura de 19 cm e executados todos os procedimentos ditos anteriormente conduziu um C_{RF} de 82,40 %. E para confirmar se a espessura-tentativa de 19 cm é ou não a mais viável e econômica, uma nova tentativa com uma espessura de 18,5 cm foi feita no quadro 4.3 obtendo um C_{RF} de 374,63 % excedendo o limite máximo, ou seja, a espessura-tentativa de 19 cm é a mais viável para as condições impostas no exemplo.

Período de Projeto = 20 Anos $K_{ab} = \underline{80}$ Mpa/mEspessura-tentativa = 20 cm $F_{ctM,28} = \underline{4,5}$ MpaEspessura sub-leito = 20 cmFSC = 1,10

Quadro 4.14 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (20 cm)

CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)						
Carga por Eixo (tf)	Carga por Eixo*FSC (tf)	Tensão na Placa (Kgf/cm ²)	Relação de tensões (col. 3/ $F_{ctM,28}$)	Repetições Admissíveis	Repetições Previstas	Consumo de Resistência à Fadiga (Col. 6/Col. 5) x 100
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
EIXO SIMPLES						
13	14,30	22,00	0,49	ilimitado	103.478	0,00
12	13,20	20,75	0,46	ilimitado	218.453	0,00
11	12,10	19,00	0,42	ilimitado	298.935	0,00
10	11,00	18,00	0,40	ilimitado	632.363	0,00
9	9,90	18,00	0,40	ilimitado	1.425.690	0,00
8	8,80	18,00	0,40	ilimitado	1.736.123	0,00
7	7,70	18,00	0,40	ilimitado	904.470	0,00
6	6,60	18,00	0,40	ilimitado	1.180.410	0,00
5	5,50	18,00	0,40	ilimitado	3.502.905	0,00
4	4,40	18,00	0,40	ilimitado	5.120.220	0,00
3	3,30	18,00	0,40	ilimitado	3.169.478	0,00
2	2,20	18,00	0,40	ilimitado	4.671.818	0,00
1	1,10	18,00	0,40	ilimitado	1.011.780	0,00
EIXO TANDEM DUPLOS						
22	24,20	22,25	0,49	ilimitado	114.975	0,00
21	23,10	21,00	0,47	ilimitado	264.443	0,00
20	22,00	20,00	0,44	ilimitado	149.468	0,00
19	20,90	19,25	0,43	ilimitado	264.443	0,00
18	19,80	18,00	0,40	ilimitado	264.443	0,00
17	18,70	18,00	0,40	ilimitado	758.835	0,00
16	17,60	18,00	0,40	ilimitado	609.368	0,00
< 16	17,60	18,00	0,40	ilimitado	2.667.420	0,00
EIXO TANDEM TRIPLOS						
28	10,27	18,00	0,40	ilimitado	229.950	0,00
27	9,90	18,00	0,40	ilimitado	103.478	0,00
26	9,53	18,00	0,40	ilimitado	264.443	0,00
< 20	7,33	18,00	0,40	ilimitado	494.393	0,00
CRF (%)						0,00

Fonte: Autor

Período de Projeto = 20 Anos $K_{ab} = \underline{80}$ Mpa/mEspessura-tentativa = 19 cm $F_{ctM,28} = \underline{4,5}$ MpaEspessura sub-leito = 20 cmFSC = 1,10

Quadro 4.15 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (19 cm)

CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)						
Carga por Eixo (tf)	Carga por Eixo*FSC (tf)	Tensão na Placa (Kgf/cm ²)	Relação de tensões (col. 3/ $F_{ctM,28}$)	Repetições Admissíveis	Repetições Previstas	Consumo de Resistência à Fadiga (Col. 6/Col. 5)x100
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
EIXO SIMPLES						
13	14,30	23,50	0,52	300.000	103.478	34,49
12	13,20	22,00	0,49	ilimitado	218.453	0,00
11	12,10	20,25	0,45	ilimitado	298.935	0,00
10	11,00	19,00	0,42	ilimitado	632.363	0,00
9	9,90	18,00	0,40	ilimitado	1.425.690	0,00
8	8,80	18,00	0,40	ilimitado	1.736.123	0,00
7	7,70	18,00	0,40	ilimitado	904.470	0,00
6	6,60	18,00	0,40	ilimitado	1.180.410	0,00
5	5,50	18,00	0,40	ilimitado	3.502.905	0,00
4	4,40	18,00	0,40	ilimitado	5.120.220	0,00
3	3,30	18,00	0,40	ilimitado	3.169.478	0,00
2	2,20	18,00	0,40	ilimitado	4.671.818	0,00
1	1,10	18,00	0,40	ilimitado	1.011.780	0,00
EIXO TANDEM DUPLOS						
22	24,20	23,75	0,53	240.000	114.975	47,91
21	23,10	22,50	0,50	ilimitado	264.443	0,00
20	22,00	22,00	0,49	ilimitado	149.468	0,00
19	20,90	20,50	0,46	ilimitado	264.443	0,00
18	19,80	19,50	0,43	ilimitado	264.443	0,00
17	18,70	18,00	0,40	ilimitado	758.835	0,00
16	17,60	18,00	0,40	ilimitado	609.368	0,00
< 16	17,60	18,00	0,40	ilimitado	2.667.420	0,00
EIXO TANDEM TRIPLOS						
28	10,27	18,00	0,40	ilimitado	229.950	0,00
27	9,90	18,00	0,40	ilimitado	103.478	0,00
26	9,53	18,00	0,40	ilimitado	264.443	0,00
< 20	7,33	18,00	0,40	ilimitado	494.393	0,00
C_{RF} (%)						82,40

Fonte: Autor

Período de Projeto = 20 Anos $K_{ab} = \underline{80}$ Mpa/mEspessura-tentativa = 18,5 cm $F_{ctM,28} = \underline{4,5}$ MpaEspessura sub-leito = 20 cmFSC = 1,10

Quadro 4.16 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (18,5 cm)

CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)						
Carga por Eixo (tf)	Carga por Eixo*FSC (tf)	Tensão na Placa (Kgf/cm ²)	Relação de tensões (col. 3/ $F_{ctM,28}$)	Repetições Admissíveis	Repetições Previstas	Consumo de Resistência à Fadiga (Col. 6/Col. 5)x100
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
EIXO SIMPLES						
13	14,30	24,50	0,54	180.000	103.478	57,49
12	13,20	23,00	0,51	400.000	218.453	54,61
11	12,10	21,50	0,48	ilimitado	298.935	0,00
10	11,00	20,00	0,44	ilimitado	632.363	0,00
9	9,90	18,00	0,40	ilimitado	1.425.690	0,00
8	8,80	18,00	0,40	ilimitado	1.736.123	0,00
7	7,70	18,00	0,40	ilimitado	904.470	0,00
6	6,60	18,00	0,40	ilimitado	1.180.410	0,00
5	5,50	18,00	0,40	ilimitado	3.502.905	0,00
4	4,40	18,00	0,40	ilimitado	5.120.220	0,00
3	3,30	18,00	0,40	ilimitado	3.169.478	0,00
2	2,20	18,00	0,40	ilimitado	4.671.818	0,00
1	1,10	18,00	0,40	ilimitado	1.011.780	0,00
EIXO TANDEM DUPLOS						
22	24,20	25,00	0,56	100.000	114.975	114,98
21	23,10	24,00	0,53	240.000	264.443	110,18
20	22,00	23,00	0,51	400.000	149.468	37,37
19	20,90	22,00	0,49	ilimitado	264.443	0,00
18	19,80	20,50	0,46	ilimitado	264.443	0,00
17	18,70	19,50	0,43	ilimitado	758.835	0,00
16	17,60	18,50	0,41	ilimitado	609.368	0,00
< 16	17,60	18,50	0,41	ilimitado	2.667.420	0,00
EIXO TANDEM TRIPLOS						
28	10,27	18,00	0,40	ilimitado	229.950	0,00
27	9,90	18,00	0,40	ilimitado	103.478	0,00
26	9,53	18,00	0,40	ilimitado	264.443	0,00
< 20	7,33	18,00	0,40	ilimitado	494.393	0,00
CRF (%)						374,63

Fonte: Autor

4.2. MÉTODO PCA 1984

O método PCA/84 é a atualização do PCA/66, que utiliza novos dados, tabelas, quadros e parâmetros de dimensionamento levando em consideração não só o consumo de fadiga do concreto, mas também o consumo de erosão, através da água ligada ao transito de cargas pesadas, gerados nas juntas transversais e nas laterais causando escalões nas juntas transversais e fazendo com que haja vazios entre as placas e as subcamadas. Essas consequências não podem ser previstas na versão anterior.

No método PCA/84 tem-se, para calcular a espessura da placa de concreto, os mesmos dados para o dimensionamento, e outros dados exclusivos do PCA/84 que são a adoção ou não de acostamento e barras de transferências já que para cada um tem-se tabelas específicas de dados (neste trabalho foram retiradas do DNIT unicamente as tabelas usadas nesse dimensionamento).

Então, usando os mesmos dados do método anterior, sabe-se que:

- ✓ A espessura da sub-base: 20 cm;
- ✓ O coeficiente de recalque da base (Tabela 3.2, pg. 40): $k = 65 \text{ Mpa/m}$;
- ✓ A resistência característica de tração na flexão (pg. 38) : $F_{ctM,28} = 4,5 \text{ MPa}$;
- ✓ O fator de segurança de cargas (Quadro 3.2, pg. 53): $FSC = 1,10$;
- ✓ Período de Projeto: 20 anos;
- ✓ Pavimento com acostamento de concreto;
- ✓ Pavimento sem junta de transferência;
- ✓ A frequência de tráfego durante o período de projeto lançados no quadro 4.4 para espessura-tentativa estudada, que foi calculada anteriormente e se encontra na tabela 4.9 da página 64 deste trabalho.
- ✓ Pelo figura 3.3 (sub-base granular) encontrou-se o coeficiente de recalque do sistema: $k = 80 \text{ MPa/m}$

A partir desses dados podemos dimensionar a placa de concreto através do roteiro abaixo:

- a) Lança-se as cargas por eixo e as cargas por eixo corrigidas, respectivamente, nas colunas 1 e 2 do quadro 4.4.
- b) Na coluna 3, do quadro 4.4, estão os valores das repetições previstas (frequência) encontradas na tabela 4.9 da página 64.
- c) Com o k_{ab} e a espessura-tentativa de 20 cm encontra-se através dos quadros 3.3 e 3.4, as Tensões Equivalentes, na página 54, encontrados nos campos 8, 11 e 14 do quadro 4.4, para os eixos simples, eixos tandem duplos e eixos tandem triplos respectivamente.
- d) Através do k_{ab} e a espessura de 20 cm, determinam-se os valores dos Fatores de Erosão, nos quadros 3.5 e 3.6, transportados para os campos 10, 13 e 16 para os eixos simples, eixos tandem duplos e eixos tandem triplos respectivamente.
- e) Calcula-se os Fatores de Fadiga, dos campos 9, 12 e 15 do formulário-tipo do quadro 16, dos eixos simples, eixos tandem duplos e eixos tandem triplos dividindo as Tensões equivalentes pela resistência de projeto de 4,5 MPa/m.
- f) Utilizando o ábaco da figura 3.12 (Análise de Fadiga), com as cargas por eixo corrigido e os Fatores de Fadiga encontra-se, para os tipos de eixo, as Repetições admissíveis da Análise de Fadiga levadas para a coluna 4 do quadro 4.4. Para os eixos tandem triplos são considerados apenas um terço da carga corrigida e isso se aplica para simplificação de cálculos porque já que as tensões anteriores formam um conjunto de 3 eixos, ou seja, pelo próprio eixo tandem triplo.
- g) Utilizando o ábaco da figura 3.13 (Análise de Erosão), com as cargas por eixo corrigido e os Fatores de Erosão encontra-se, para os tipos de eixo, as Repetições admissíveis da Análise de Erosão levadas para a coluna 6 do quadro 4.4. Para os eixos tandem triplos são considerados apenas um terço da carga corrigida e isso se aplica para simplificação de cálculos porque já que as tensões anteriores formam um conjunto de 3 eixos, ou seja, pelo próprio eixo tandem triplo.

- h) Dividindo-se as repetições esperadas pelas repetições admissíveis são encontrados os valores em porcentagem da resistência à fadiga consumida e o dano por erosão tanto para a Análise de Fadiga quanto para a Análise de Erosão colocados nas colunas 5 e 7, respectivamente no quadro 4.4.
- i) Enfim, soma-se a coluna 5 do quadro 4.4 obtém-se o consumo de resistência à fadiga, pela Análise de Fadiga, para todas as cargas por eixo. A mesma coisa para a coluna 7 do quadro 4.4 encontra-se o consumo de resistência à fadiga, pela Análise de Erosão.

No quadro 4.4, para a espessura de 20 cm adotada no dimensionamento encontrou-se um C_{RF} pela de Análise de Fadiga de 28,60 % que é suficiente para o período de 20 anos, mas o C_{RF} pela de Análise de Erosão foi de 360,64 % excedeu os 100 %. Com isso vemos que o a espessura-tentativa não passa por ter um C_{RF} superior à 100 %, ou seja, a espessura da placa de concreto não será suficiente para o período de 20 anos.

Com o C_{RF} limite máximo de 100 % ultrapassado exige-se que a sua espessura-tentativa seja aumentada até que igual ou abaixo do limite e dentro do período de projeto. Quanto mais próximo o C_{RF} do limite mais econômico será. Sendo assim, um novo cálculo como uma nova espessura-tentativa é necessário e como o C_{RF} é excedeu a 100 % tenta-se uma espessura superior.

Adotando-se os mesmos dados do projeto com a espessura de 20 cm no quadro 4.4, utilizou-se a espessura de 23 cm no quadro 4.5 e o resultado foi na Análise de Fadiga um C_{RF} de 0,0 % e na Análise de Erosão foi um C_{RF} de 98,48 %. E para que seja confirmado se a espessura-tentativa de 23 cm é ou não a mais viável e econômica, uma nova tentativa com uma espessura superior ainda de 24 cm foi feita no quadro 4.6 obteve-se na Análise de Fadiga um C_{RF} de 0,00 % e na Análise de Erosão um C_{RF} de 41,31 % ficando muito abaixo do limite máximo, ou seja, a espessura-tentativa de 23 cm é a mais viável para as condições impostas no exemplo e está próxima da excelência por ter uma proximidade muito grande de 100 %.

Período de Projeto = 20 Anos $K_{ab} = \underline{80}$ Mpa/mEspessura-tentativa = 20 cm $F_{ctM,28} = \underline{4,5}$ MpaEspessura sub-leito = 20 cmFSC = 1,10

Juntas com BT = Não

Acostamento = Sim

Quadro 4.17 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (20 cm)

CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20) ANOS						
Carga por Eixo (tf)	Carga por Eixo*FSC (tf)	Número de Repetições Previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Repetições Admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	Repetições Admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
EIXO SIMPLES						
(8) Tensão Equivalente	1,340	(9) Fator de Fadiga	0,298	(10) Fator de Erosão	2,580	
13	14,30	103.478	440.000	23,52	260.000	39,80
12	13,20	218.453	4.300.000	5,08	440.000	49,65
11	12,10	298.935	ilimitado	0,00	820.000	36,46
10	11,00	632.363	ilimitado	0,00	1.700.000	37,20
9	9,90	1.425.690	ilimitado	0,00	5.900.000	24,16
8	8,80	1.736.123	ilimitado	0,00	30.000.000	5,79
7	7,70	904.470	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
6	6,60	1.180.410	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
5	5,50	3.502.905	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
4	4,40	5.120.220	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
3	3,30	3.169.478	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
2	2,20	4.671.818	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
1	1,10	1.011.780	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
EIXO TANDEM DUPLOS						
(11) Tensão Equivalente	1,130	(12) Fator de Fadiga	0,251	(13) Fator de Erosão	2,640	
22	24,20	114.975	ilimitado	0,00	490.000	23,46
21	23,10	264.443	ilimitado	0,00	670.000	39,47
20	22,00	149.468	ilimitado	0,00	870.000	17,18
19	20,90	264.443	ilimitado	0,00	1.400.000	18,89
18	19,80	264.443	ilimitado	0,00	2.000.000	13,22
17	18,70	758.835	ilimitado	0,00	3.700.000	20,51
16	17,60	609.368	ilimitado	0,00	9.400.000	6,48
< 16	17,60	2.667.420	ilimitado	0,00	9.400.000	28,38
EIXO TANDEM TRIPLOS						
(14) Tensão Equivalente	0,870	(15) Fator de Fadiga	0,193	(16) Fator de Erosão	2,640	
28	10,27	229.950	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
27	9,90	103.478	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
26	9,53	264.443	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
<20	7,33	494.393	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
TOTAL (%)			28,60	TOTAL (%)	360,64	

Fonte: Autor

Período de Projeto = 20 Anos

$K_{ab} = \underline{80}$ Mpa/m

Espessura-tentativa = 23 cm

$F_{ctM,28} = \underline{4,5}$ Mpa

Espessura sub-leito = 20 cm

FSC = 1,10

Juntas com BT = Não

Acostamento = Sim

Quadro 4.18 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (23 cm)

CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20) ANOS						
Carga por Eixo (tf)	Carga por Eixo*FSC	Número de Repetições Previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Repetições Admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	Repetições Admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
EIXO SIMPLES						
(8) Tensão Equivalente	1,110	(9) Fator de Fadiga	0,247	(10) Fator de Erosão	2,420	
13	14,30	103.478	ilimitado	0,00	580.000	17,84
12	13,20	218.453	ilimitado	0,00	1.000.000	21,85
11	12,10	298.935	ilimitado	0,00	2.300.000	13,00
10	11,00	632.363	ilimitado	0,00	7.000.000	9,03
9	9,90	1.425.690	ilimitado	0,00	26.500.000	5,38
8	8,80	1.736.123	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
7	7,70	904.470	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
6	6,60	1.180.410	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
5	5,50	3.502.905	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
4	4,40	5.120.220	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
3	3,30	3.169.478	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
2	2,20	4.671.818	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
1	1,10	1.011.780	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
EIXO TANDEM DUPLOS						
(11) Tensão Equivalente	0,950	(12) Fator de Fadiga	0,211	(13) Fator de Erosão	2,510	
22	24,20	114.975	ilimitado	0,00	1.600.000	7,19
21	23,10	264.443	ilimitado	0,00	2.200.000	12,02
20	22,00	149.468	ilimitado	0,00	3.200.000	4,67
19	20,90	264.443	ilimitado	0,00	8.000.000	3,31
18	19,80	264.443	ilimitado	0,00	12.000.000	2,20
17	18,70	758.835	ilimitado	0,00	38.000.000	2,00
16	17,60	609.368	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
<16	17,60	2.667.420	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
EIXO TANDEM TRIPLOS						
(14) Tensão Equivalente	0,720	(15) Fator de Fadiga	0,160	(16) Fator de Erosão	2,530	
28	10,27	229.950	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
27	9,90	103.478	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
26	9,53	264.443	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
<20	7,33	494.393	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
TOTAL (%)			0,00	TOTAL (%)		
				98,48		

Fonte: Autor

Período de Projeto = 20 Anos $K_{ab} = \underline{80}$ Mpa/mEspessura-tentativa = 24 cm $F_{ctM,28} = \underline{4,5}$ MpaEspessura sub-leito = 20 cmFSC = 1,10Juntas com BT = NãoAcostamento = Sim

Quadro 4.19 - Cálculo da espessura de pavimento de concreto (24 cm)

CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20) ANOS						
Carga por Eixo (tf)	Carga por Eixo*FSC	Número de Repetições Previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Repetições Admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	Repetições Admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
EIXO SIMPLES						
(8) Tensão Equivalente	1,050	(9) Fator de Fadiga	0,233	(10) Fator de Erosão	2,370	
13	14,30	103.478	ilimitado	0,00	1.550.000	6,68
12	13,20	218.453	ilimitado	0,00	2.900.000	7,53
11	12,10	298.935	ilimitado	0,00	9.300.000	3,21
10	11,00	632.363	ilimitado	0,00	40.000.000	1,58
9	9,90	1.425.690	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
8	8,80	1.736.123	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
7	7,70	904.470	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
6	6,60	1.180.410	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
5	5,50	3.502.905	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
4	4,40	5.120.220	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
3	3,30	3.169.478	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
2	2,20	4.671.818	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
1	1,10	1.011.780	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
EIXO TANDEM DUPLOS						
(11) Tensão Equivalente	0,900	(12) Fator de Fadiga	0,200	(13) Fator de Erosão	2,480	
22	24,20	114.975	ilimitado	0,00	2.000.000	5,75
21	23,10	264.443	ilimitado	0,00	2.950.000	8,96
20	22,00	149.468	ilimitado	0,00	5.350.000	2,79
19	20,90	264.443	ilimitado	0,00	9.500.000	2,78
18	19,80	264.443	ilimitado	0,00	21.000.000	1,26
17	18,70	758.835	ilimitado	0,00	100.000.000	0,76
16	17,60	609.368	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
<16	17,60	2.667.420	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
EIXO TANDEM TRIPLOS						
(14) Tensão Equivalente	0,680	(15) Fator de Fadiga	0,151	(16) Fator de Erosão	2,500	
28	10,27	229.950	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
27	9,90	103.478	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
26	9,53	264.443	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
<20	7,33	494.393	ilimitado	0,00	ilimitado	0,00
TOTAL (%)				0,00	TOTAL (%)	41,31

Fonte: Autor

5 COMPARATIVO DOS MÉTODOS PCA

Dentre os métodos estudados da *Portland Cement Association* apesar de uma ser a versão atualizada do outro e terem suas semelhanças, podemos destacar características distintas entre eles que fazem deles opções, a escolha do tipo de projeto, lugar ou a escolha de quem fará o dimensionamento.

Antes de se ver as diferenças vamos as semelhanças, os dois métodos tem procedimentos iniciais que são fundamentais para o projeto da placa de concreto como:

- ✓ As propriedades do concreto que será utilizado na execução da via.
- ✓ A fundação ou suporte de fundação do pavimento e;
- ✓ O tráfego, no qual será usado para o dimensionamento da espessura.

Com o estudos de Westergaard, no PCA/66 e no PCA/84 tem-se os mesmos gráficos para a escolha do suporte de fundação é importante para que se tenha o coeficiente de recalque e o tráfego é essencial para que o dimensionamento fique o mais próximo da realidade. Nos dois métodos estudados considera-se como dado, para a saber o grau de desintegração do pavimento no período de projeto, o consumo de resistência à fadiga. A resistência característica à tração na flexão ($F_{ctM,k}$), é um fator que nos dois métodos tem a mesma função que é quando o concreto aos 28 dias tenha alcançado sua resistência na qual foi dimensionado.

O Consumo de Resistência à Fadiga (C_{RF}) é igual para os dois, com um limite máximo de 100 % e quanto mais próximo mais econômico será o projeto. Outro ponto que se deve entender é que nesses processos o fator de segurança para as cargas é essencial para que os cálculos estejam a favor da segurança.

Enfim, vamos as diferenças existentes entre os métodos da PCA que independentemente do tipo de método escolhido os dois são usados atualmente para o dimensionar os pavimentos rígidos ou “pavimento verde”.

Como foi visto neste trabalho no estudo sobre dimensionamento da espessura do pavimento, foram executados vários cálculos teóricos nos dois métodos obtendo diversos resultados nos quais podem ser comparados para vermos qual é melhor para ser usado.

No método PCA/66 diferentemente do PCA/84 usa-se consumo de resistência à fadiga para o dimensionamento da espessura. O cálculo depende de vários dados encontrados em tabelas gráficos e ábacos expostos aqui neste trabalho. Os ábacos através das cargas por eixo, espessura-tentativa e o coeficiente de recalque do sistema obtém-se as tensões e dividindo essas tensões pela resistência à tração na flexão encontramos as repetições admissíveis.

Pelo PCA/84 é diferenciado o processo para dimensionar a espessura. Além de usar o consumo de resistência fadiga que ocorre pelo tráfego, entende-se também que as águas pluviais geram desgaste no pavimento que é denominado como análise de erosão. Ao contrário da versão anterior que usa ábacos para encontrar a tensão de cada eixo, neste método as tensões para todos os eixos são encontrados através de quadros, que com o uso da espessura-tentativa e do coeficiente de recalque do sistema, temos as tensões equivalentes de cada tipo de eixo. O diferencial desse método é a análise de erosão que também usa-se quadros para se encontrar os fatores de erosão que além de encontrarmos o consumo de fadiga na análise de fadiga, encontra-se também o consumo de fadiga na análise de erosão, ou seja, neste método entende-se que o pavimento não só efeitos pelo tráfego mas por ações naturais. Nesse método houve atualizações e melhorias na forma de encontrar o consumo de fadiga usando quadros com valores fixos para cada espessura, não esquecendo na introdução do dano por erosão.

No estudo aqui apresentado destes métodos pôde-se ver que em uma via que possui os mesmos dados do tráfego avaliou-se que no PCA/66 dimensionado com uma espessura de 20cm considerando somente o tráfego houve uma redução da espessura para 19 cm que se encaixava melhor reduzindo custos. Já no PCA/84 com a mesma espessura inicial considerando a fadiga e a erosão ocorreu um aumento da espessura.

Como pode-se ver os dois tipos atendem as necessidades, mas o que se pode entender é que a adoção de qualquer método depende do local onde será executado, como por exemplo um local onde tem um número alto de chuvas o PCA/66 pode não ser uma escolha viável por não levar em consideração essa possibilidade.

6 CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil é diversificado e abençoado com uma variação muito grande de climas e comportamentos da natureza, lugares como o Nordeste que tem um clima mais quente.

No nosso estado de Goiás, por exemplo, localizado no centro-oeste do País é privilegiado pela abundância em água em praticamente todo o território. Por tais características as chuvas são sempre presentes e na maioria das vezes bem intensas dependendo do período, então como se pode ver a água esta presente no nosso dia a dia e as vias das cidades e estradas estão sempre em contato com água, gerando uma degradação acelerada dos pavimentos asfálticos principalmente se sua execução não é de qualidade o que leva a buracos e trincas na sua camada superficial fazendo com que a água penetre para suas subcamadas de sustentação levando a perda do material das mesmas. Com todo esses acontecimentos decorrentes de uma má execução em conjunto com a água causam para o tráfego custos elevados de manutenção de veículos e transtornos para as pessoas.

Vimos que a pavimentação em concreto é bastante extensa dividindo-se em vários métodos de aplicação e tipos de pavimentos rígidos para as diversas área de uso pelo seu tráfego e no Brasil tem-se uma diversificação de tráfegos muito grande, ou seja, a pavimentação rígida atende todas as essas necessidades.

Uma solução paralela para a pavimentação apesar de um custo inicial cerca de 30 % a mais que o pavimento asfáltico é o pavimento de concreto que foi estudado neste trabalho. Pelas características do território de Goiás o método PCA/84 é mais viável economicamente e executivamente falando por ter a Análise de Erosão que visa justamente o deteriorização do pavimento pela ação da água. O PCA/66 não seria interessante sua execução por levar em consideração apenas a Análise de Fadiga causada pela ação do tráfego.

Neste trabalho pudemos ver a projeção de um período de 20 anos, comparando os métodos da *Portland Cement Association* de 1966 e de 1984. Apesar de que a versão de 1966 ter sugerido uma espessura de 19 cm como a mais adequada, por ser mais econômica, que a versão de 1984 com uma espessura de 23 cm, para o tráfego estudado teria uma boa execução

em regiões mais quentes e com menos influência pluvial, mas por não ter em sua metodologia o dano por erosão que seria muito importante.

Conclui-se que os dois casos são executáveis variando de projetos, dados, tráfegos e as solicitações que lhes serão impostos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balbo. **Pavimentos de Concreto**. 1ª reimpressão 2012. São Paulo: Oficina dos Textos, 2009.

Baptista. **Pavimentação: Revestimentos, pavimentos rígidos e conservação dos pavimentos**. 1975. Porto Alegre: Globo, 1970.

Senço. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ª ed. 2008. São Paulo: Pini, 2007.

ABCP (Pavimento de Concreto); Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/aplicacoes/pavimento-de-concreto>>; Acesso em: outubro de 2013

ACPA (American Concrete Pavement Association); Disponível em: <<http://www.pavement.com/>>

Vias Concretas - 16º Encontro Técnico - DER/PR. **Pavimentação com Sustentabilidade**; Disponível em: <ABCP>; Acesso em: outubro de 2013

Departamento de Estradas de Rodagem (DER/SP). **Pavimento de concreto de cimento Portland aplicado com formas deslizantes**; Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/130572828/ET-DE-P00-039-A>>; Acesso em: outubro de 2013

DNIT 068/2004 - ES. **Pavimento rígido - Execução de camada superposta de concreto do tipo *whitetopping* por meio mecânico**; Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT068_2004_ES.pdf>; Acesso em: outubro de 2013

TCC - **Mapeamento das Condições dos Pavimentos Rígidos de Determinadas Vias da Cidade de São Paulo**, 2011; Disponível em: <<http://engenharia.anhembi.br/tcc-11/civil-21.pdf>>; Acesso em: outubro de 2013

UFC **Pavimentos de Concreto-Cimento por Jorge Soares**; Disponível em: <http://www.det.ufc.br/jsoares/super/10_Pavimentos_de_concreto.pdf>; Acesso em: outubro de 2013

Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos - ABEDA. **Programa asfalto na universidade**; Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/petengcivil/Arquivos/Materiais/aula1-Introducao.pdf>>; Acesso em: outubro de 2013

DNIT. **Manual de pavimentos rígidos, 2005**; Disponível em: <<http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/Manual%20de%20Pav%20Rigidos%202005.pdf>>; Acesso em: outubro de 2013

UFPR - Universidade Federal do Paraná. **Introdução à Pavimentação - Prof. Mário Henrique Furtado Andrade**; Disponível em: <<http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/MOduLo%201%20-%20Introducao.pdf>> Acesso em: outubro de 2013

Encontro Nacional Betão estrutural - BE2012 FEUP. **Reabilitação Estrutural de Pavimentos em Betão Pré-esforçado**; Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~be2012/Indice/BE2012/pdf-files/PJM15.pdf>>; Acesso em: outubro de 2013. Portal do Concreto; Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/pavimentos.html>>; Acesso em: outubro de 2013

José Luis Azevedo Rodrigues. **Conceção de pavimentos rígidos**. Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Vias de Comunicação. 2011

Sérgio Valmir Sian. Recuperação de Pavimento Asfáltico com Aplicação de Whitetopping - TCC. 2007.

ACPA. Vantagens e Benefícios do Whitetopping e do Inlay na Reabilitação de Pavimentos. 2012

ABCP. Curso de Tecnologia de Pavimentos de Concreto.

ABCP. Pavimentos de Concreto: Estágio Atual no Brasil. 2007