



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Jhonatan Willian Souza Faria
Kamilla Nascimento

***ANÁLISE MECANICISTA DO PAVIMENTO
RÍGIDO REFERENTE AO PROJETO DE
PAVIMENTAÇÃO DO CORREDOR EIXO
NORTE, PARA IMPLANTAÇÃO DO BRT NO
DISTRITO FEDERAL***

Ouro Branco
Dezembro – 2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Jhonatan Willian Souza Faria

Kamilla Nascimento

***ANÁLISE MECANICISTA DO PAVIMENTO
RÍGIDO REFERENTE AO PROJETO DE
PAVIMENTAÇÃO DO CORREDOR EIXO NORTE,
PARA IMPLANTAÇÃO DO BRT NO DISTRITO
FEDERAL***

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João Del-Rei, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área: Pavimentação

Orientador: Tales Moreira de Oliveira

**Ouro Branco
Dezembro – 2014**

FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: ANÁLISE MECANICISTA DO PAVIMENTORÍGIDO REFERENTE AO PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO, DO CORREDOR EIXO NORTE, PARA IMPLANTAÇÃO DO BRT NO DISTRITO FEDERAL.

Autores: Jhonatan Willian Souza Faria
Kamilla Nascimento

Aprovada como parte das exigências para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof.Me. Tales Moreira de Oliveira – UFSJ
(Orientador)

Prof. Dr. Leandro Neves Duarte – UFSJ
(Co-orientador)

Prof. Dr.Heraldo Nunes Pitanga – UFSJ
(Avaliador Interno)

Ouro Branco-MG, 11 de Dezembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter nos iluminado durante nossa caminhada e nos dado saúde e força para superar as dificuldades.

A família, pelo amor, incentivo e apoio em todos os momentos.

A Universidade Federal de São João Del Rei, pela oportunidade e contribuição na nossa formação profissional.

A todos os professores, e em especial ao Professor Orientador Tales Moreira de Oliveira e ao Professor Co-orientador Leandro Neves Duarte, pela orientação, compreensão, dedicação e apoio na elaboração deste trabalho.

RESUMO

Realizou-se uma análise mecanicista do projeto de pavimentação do Corredor Eixo Norte, localizado em Brasília – Distrito Federal (DF), para implantação do Bus Rapid Transit (BRT), ou Transporte Rápido por Ônibus, nos trechos onde o pavimento é rígido. O BRT é uma das medidas voltadas a reverter o modelo atual de mobilidade urbana nas capitais brasileiras. O projeto alvo deste trabalho foi uma análise mecanicista do Trabalho de Conclusão de Curso proposto por MARTINS e FERREIRA(2014), em que propuseram um novo dimensionamento. Assim, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma análise mecanicista, visando verificar se o pavimento atende aos esforços solicitantes e se está bem dimensionado para o carregamento a ele imposto. Esta verificação foi feita para as tensões de tração atuantes na placa e para o tráfego. Os resultados obtidos afirmam a veracidade da hipótese inicial, uma vez que, tecnicamente, encontrou-se algumas distorções quanto a boa técnica de engenharia esperada para tal, concluindo-se que, estes, mesmo com a melhoria proposta por MARTINS e FERREIRA (2014), ainda encontram-se com resultados discrepantes para os parâmetros analisados, podendo comprometer os custos do projeto.

Palavras Chaves: Análise Mecanicista, Pavimentação, Verificação de Tensões.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS.....	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 <i>Objetivos Gerais</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 INTRODUÇÃO	3
2.2 SISTEMA BUS RAPID TRANSIT (BRT)	3
2.3 CONCEITOS E PARÂMETROS BÁSICOS EM PAVIMENTAÇÃO	4
2.3.1 <i>Terminologia dos Pavimentos</i>	4
2.3.2 <i>Classificação dos pavimentos</i>	6
2.4 AÇÕES	8
2.4.1 <i>Ações diretas</i>	8
2.4.1.1 <i>Área de contato entre pneumático e pavimento</i>	11
2.4.2 <i>Ações indiretas</i>	12
2.4.2.1 <i>Tensões combinadas</i>	16
2.5 FUNDAÇÃO DO PAVIMENTO RÍGIDO.....	17
2.5.1 <i>Tipos considerações de fundação</i>	17
2.5.2 <i>Determinação do Coeficiente de Recalque</i>	21
2.6 TEORIA DE WESTERGAARD.....	23
2.7 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO	27
2.7.1 <i>Dimensionamento de Pavimentos Rígidos: Método do PCA/84</i>	28
2.7.1.1 <i>Modelos de Ruína</i>	29
2.7.1.2 <i>Tipos de Pavimentos</i>	31
2.7.1.3 <i>Barras de Transferência</i>	32
2.7.2 <i>Dimensionamento de Pavimentos Rígidos: Métodos Mecanísticos</i>	32
2.7.2.1 <i>Programa Computacional EverFe</i>	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 BRT – CORREDOR EIXO NORTE.....	34
3.1.1 <i>Projeto de Pavimentação</i>	37
3.2 ANÁLISE DE TRÁFEGO	37
3.3 ANÁLISE GEOTÉCNICA.....	38
3.4 ANÁLISE ESTRUTURAL DO PAVIMENTO RÍGIDO.....	38
3.5 MODELAMENTO DO PAVIMENTO RÍGIDO	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 ANÁLISE DE TRÁFEGO	47
4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL.....	50
5 CONCLUSÃO.....	51
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de seção transversal do pavimento.	5
Figura 2: Estruturas dos pavimentos.	7
Figura 3: Distribuição de cargas nos pavimentos rígido e flexível.	7
Figura 4: Tipos de eixos: (a) eixo simples de rodagem simples; (b) eixo simples de rodagem dupla; (c) eixo tandem duplo; (d) eixo tandem triplo.	9
Figura 5: Veículos adotados pelo DNIT.	10
Figura 6: Reação à tendência de retração da placa de concreto.	14
Figura 7: Tendência de empenamento da placa de concreto durante o dia.	15
Figura 8: Tendência de empenamento da placa de concreto durante a noite.	15
Figura 9: Representação de uma fundação do tipo líquido denso sob um elemento de placa.	18
Figura 10: Representação da fundação tipo sólido elástico sob um elemento de placa.	20
Figura 11: relação entre o Índice de Suporte Califórnia (CBR) e o coeficiente de recalque (k) do subleito.	23
Figura 12: Posições e configurações analisadas por Westergaard em 1926.	24
Figura 13: Curvas de Fadiga.	30
Figura 14: Posições Crítica de Carga.	31
Figura 15: Tela inicial do Programa EverFe.	33
Figura 16: Esquema das estações - BRT - Corredor Eixo Norte - DF.	34
Figura 17: Subtrechos do Corredor Eixo Norte - BRT, DF – Brasília.	36
Figura 18: Aspecto da tela gráfica para inserção dos dados geométricos.	40
Figura 19: Aspecto da tela gráfica para inserção dos dados físicos do pavimento.	42
Figura 20: Aspecto da tela gráfica para inserção carregamento na placa.	43
Figura 21: Aspecto da tela gráfica para inserção dos dados das barras de transferência.	44
Figura 22: Aspecto da tela gráfica para definição da malha de elementos finitos.	45
Figura 23: Classificação das vias e parâmetros de tráfego.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação aproximada entre o tipo do solo do subleito e o coeficiente de recalque.....	22
Tabela 2: Equações para representação da curva de fadiga.....	30
Tabela 3: Espessuras das placas de concreto.....	37
Tabela 4: Densidade do subleito do projeto original.....	41
Tabela 5: Tensões máximas na base da placa de concreto.....	47
Tabela 6: Resultados para o Numero N.....	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, crescem o questionamento e o debate relacionados à mobilidade urbana quanto aos serviços prestados e sua eficiência para solucionar ou, ao menos, reduzir os congestionamentos nas grandes cidades. Uma das propostas trata-se da implantação de sistemas de transporte de ônibus de alta qualidade, conhecidos pela sigla em inglês BRT (Bus Rapid Transit).

A adoção e o funcionamento de Sistemas BRT têm vindo a expandir-se pelo mundo. Atualmente no Brasil, de acordo com a organização mundial BRT Data (www.brtdata.org, 2014), os corredores exclusivos para veículos de transporte coletivo transportam aproximadamente 11,5 milhões de passageiros por dia, com um total de 114 corredores, e muitos outros projetos continuam a ser implementados. Este reconhecimento do sistema como uma solução viável para oferecer serviço de transporte público de alta qualidade e a custos moderados é enfatizado pelo sucesso de implantações pioneiras, como é o caso de Curitiba (Brasil) e Bogotá (Colômbia) (BRANCO, 2013).

Geralmente o tipo de pavimento onde movimenta-se o BRT é do tipo rígido. A principal diferença estrutural entre pavimento rígido e pavimento flexível é a distribuição de tensões nas camadas subjacentes. O pavimento flexível, executado com concreto asfáltico, também conhecido como asfalto, funciona como camada de rolamento. Neste caso, quem absorve os esforços devidos ao tráfego é a fundação, normalmente composta por três camadas: base, sub-base e reforço do subleito. No pavimento de concreto de cimento, ou apenas pavimento de concreto, a camada de rolamento também funciona como estrutura, redistribuindo a tensão imposta à sub-base, que normalmente, é a única camada executada entre as placas de concreto e o subleito, (OLIVEIRA, 2000).

No Brasil, observou-se um aumento gradativo do uso de soluções de pavimentos rígidos em algumas rodovias e também em obras urbanas. Uma das principais vantagens desses pavimentos é a durabilidade. De acordo com Oliveira (2000), o concreto não deteriora com a ação da chuva, de óleos ou de combustíveis e não deforma a ponto de formar as trilhas de rodas.

Segundo Bezerra (2004), os métodos de dimensionamento podem ser concebidos de duas maneiras distintas: através de experiências de campo, com base na observação do desempenho de pavimentos ao longo do tempo (métodos empíricos), ou a partir da aplicação de uma teoria elástica de multicamadas, considerada adequada para a interpretação do comportamento mecânico do conjunto pavimento/subleito (métodos mecanísticos).

Atualmente, os modelos estruturais para análise de pavimentos rígidos estão mais avançados do que os modelos utilizados nos métodos da PCA. Vários programas de elementos finitos podem ser usados como modelos estruturais, porém a maior parte dos modelos de defeitos são equações de regressão derivadas empiricamente, com grande dispersão dos dados. Os principais tipos e defeitos a serem modelados nos pavimentos rígidos incluem: trincamento por fadiga, erosão, bombeamento e escalonamento nas juntas transversais, (GONDIM, 2008).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O trabalho proposto tem por objetivo desenvolver uma análise mecanicista do projeto de pavimentação do Corredor eixo Norte para implantação do BRT no Distrito Federal, dando continuidade ao Trabalho de Conclusão de Curso elaborado por MARTINS e FERREIRA (2014), no qual as mesmas apresentaram uma análise crítica do mesmo projeto e realizaram análise mecanístico do pavimento flexível.

Utilizar-se-á, para a realização das análises mecanicistas do pavimento rígido, o Método dos Elementos Finitos (MEF), que permite avaliar os efeitos de cargas de veículos em estruturas de pavimentos. O programa a ser utilizado será o EverFe, com o objetivo de apontar soluções para melhoria da descrição do comportamento mecânico e do dimensionamento estrutural do projeto em questão.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos relacionados ao objetivo geral, citam-se:

- i. Análise crítica mecanicista da superestrutura projetada para os pavimentos rígidos com auxílio do programa computacional EverFe;

- ii. Apresentar a importância da realização de uma análise crítica mecanicista na obtenção de projetos economicamente mais viáveis e com qualidade técnica empregada na sua confecção;
- iii. Aprofundar os conhecimentos relativos à subárea de Infraestrutura de Transportes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Introdução

A literatura descrita neste item pretende abranger tópicos relacionados aos conceitos e fundamentos da pavimentação e estreitar os laços no que se refere aos tópicos ligados à mecânica dos pavimentos, sobretudo abordando a identificação e avaliação das condições estruturais de um pavimento por meio da análise mecanicista, utilizando-se de programas computacionais aplicados em pavimentos rígidos.

2.2 Sistema Bus Rapid Transit (BRT)

O processo de urbanização tem tornado mais claros os problemas adquiridos pelo uso irrestrito dos automóveis quer em termos de desperdícios energéticos, encargos sociais, ambientais e econômicos, quer em termos de saturação viária. Uma vez que a necessidade de mobilidade é um imperativo urbano, torna-se necessário repensar o modelo de transporte das cidades de forma a torná-las mais sustentáveis. Assim, é possível evitar a tendência de crescente conflitualidade provocada pelo uso do transporte individual, o que causa consequências drásticas na degradação da qualidade de vida dos cidadãos. (BRANCO, 2013)

Castro (2008) cita que uma das principais estratégias de ação do ramo de transportes, visando aspectos técnicos, econômicos e ambientais, é a melhoria dos sistemas de transporte público com a implantação de sistemas de corredores de ônibus e desempenho, que têm recebido na literatura técnica a denominação de Bus Rapid Transit (BRT).

O BRT “Bus Rapid Transit” é um sistema de transporte coletivo que utiliza autocarros e os faz circular em faixas ou vias exclusivas, com o objetivo de promover um serviço rápido, eficaz, confortável e a custos moderados. Basicamente, um sistema BRT incorpora as melhores características de desempenho de modernos sistemas ferroviários e as concilia com

a flexibilidade do sistema de veículos de transporte coletivo rodoviário. Desta forma, torna-se um sistema integrado designado para melhorar a velocidade, confiabilidade e identidade do sistema convencional de autocarros, mas com custos acessíveis à grande maioria das cidades. (BRANCO, 2013).

2.3 Conceitos e Parâmetros Básicos em Pavimentação

2.3.1 Terminologia dos Pavimentos

Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre o semiespaço considerado teoricamente como infinito (a infraestrutura ou terreno de fundação), o qual é designado de subleito. O pavimento, por injunções de ordem técnico-econômicas, é uma estrutura de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocadas em contato, resultando daí um elevado grau de complexidade no que diz respeito ao cálculo de tensões e deformações, e atuantes nas mesmas resultantes das cargas impostas pelo tráfego (DNIT, 2006b).

De acordo com o Manual do DNIT (2006b), a definição dos diversos constituintes do pavimento, em seção transversal, é a que segue:

Pavimento: é a estrutura construída após a terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente em seu conjunto, a:

- i. Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego;
- ii. melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e conforto;
- iii. resistir aos esforços horizontais (desgaste), tomando mais durável a superfície de rolamento.

Subleito: é o terreno de fundação do pavimento;

Leito: superfície obtida pela terraplenagem ou obra-de-arte e conformada ao seu greide e perfis transversais;

Greide do leito: é o perfil do eixo longitudinal do leito;

Regularização: é a camada posta sobre o leito, destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente de acordo com as especificações; a regularização não constitui, propriamente uma camada do pavimento, sendo, a rigor, uma operação que pode ser reduzida em corte do leito implantado ou sobreposição a este, de camada com espessura variável;

Reforço do subleito: é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da de regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito;

Sub-base: é a camada complementar a base, quando, por circunstâncias técnico-econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização;

Base: é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento;

Revestimento: é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste.

A Figura 1 ilustra a seção transversal do pavimento.

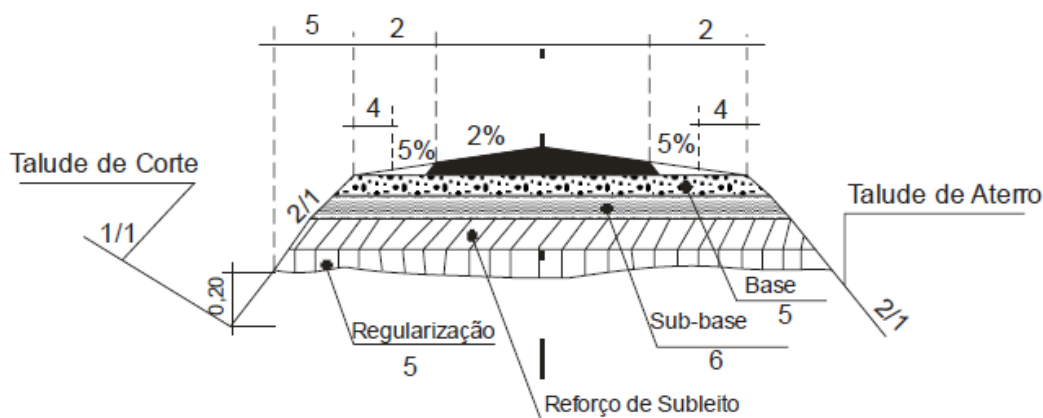


Figura 1: Esquema de seção transversal do pavimento.

Fonte: Manual de Pavimentação, DNIT, 2006b.

2.3.2 Classificação dos pavimentos

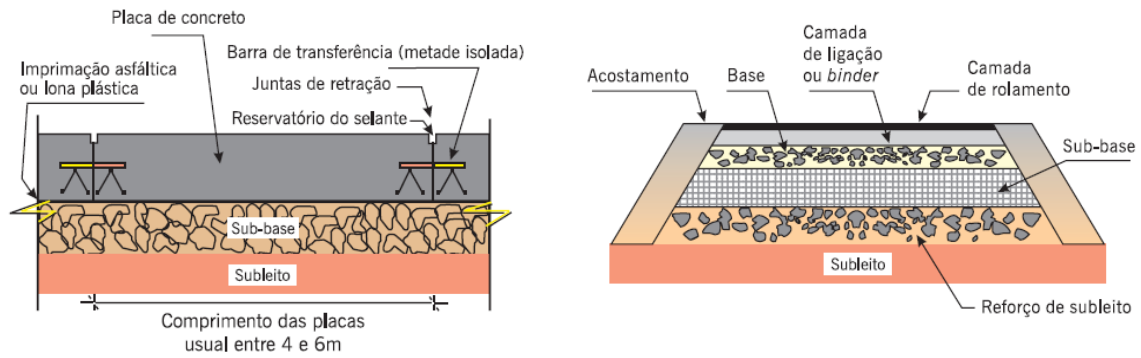
Os pavimentos são classificados em Flexíveis, semirrígidos e rígidos. As definições se encontram a seguir conforme Manual do DNIT (2006b):

Flexível: Aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.

Semirrígido: Caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias. Exemplo típico: pavimento constituído por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

Rígido: Aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: pavimento constituído por lajes de Concreto de Cimento Portland (CCP).

Cada um dos tipos de pavimento possui uma estrutura diferente, como mostra a Figura 2. Nos pavimentos rígidos as placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço [Figura 2(a)]. É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos. Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas [Figura 2(b)] (BERNUCCI et al, 2008).



(a) Pavimento Rígido (corte longitudinal) (b) Pavimento Flexível (corte transversal)

Figura 2: Estruturas dos pavimentos.

Fonte:BERNUCCI L.B. et al,2008 (Adaptado).

Cada um destes tipos de pavimento distribui a carga para o subleito de uma forma diferente, como mostra a Figura 3. O pavimento rígido, por exemplo, devido ao elevado Módulo de Elasticidade do Concreto de Cimento Portland (CCP), tende a distribuir a carga sobre uma área relativamente maior no subleito. A própria placa de concreto fornece a maior parte da capacidade estrutural do pavimento rígido. Já o pavimento flexível utiliza um maior número de camadas e distribui cargas para uma área menor do subleito (INTERACTIVE apud MARTINS; FERREIRA, 2014).

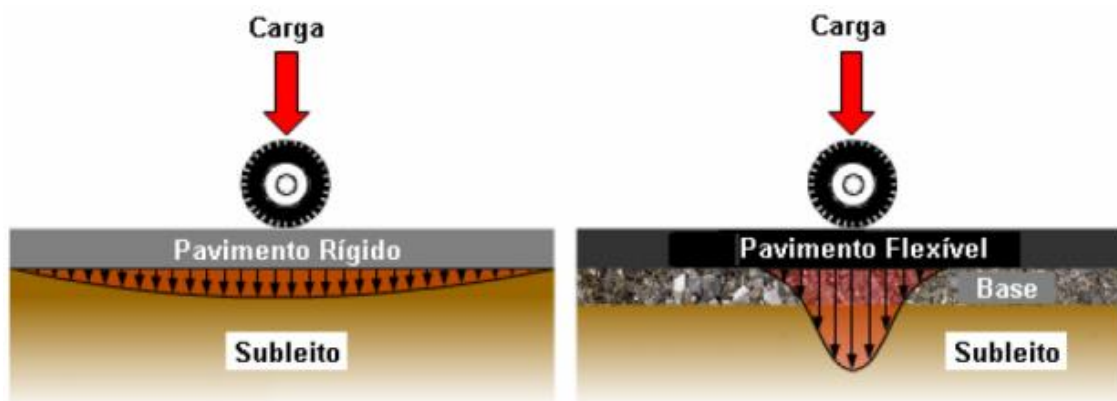


Figura 3: Distribuição de cargas nos pavimentos rígido e flexível.

Fonte: INTERACTIVE apud MARTINS; FERREIRA, 2014.

A análise mecanicista proposta neste trabalho se dará sobre a pavimentação existente no Corredor Eixo Norte, no Distrito Federal, da implantação do BRT, na classe de pavimentos rígidos.

2.4 Ações

Os pavimentos de concreto são submetidos a ações diretas e indiretas. As ações diretas constituem-se de forças ou pressões aplicadas à estrutura pelo tráfego de veículos, ou pelo carregamento distribuído e concentrado aplicado em pisos, que variam conforme a finalidade do pavimento. As ações indiretas são causadas por deformações impostas às placas (OLIVEIRA, 2000).

2.4.1 Ações diretas

Os veículos comerciais rodoviários (caminhões e ônibus) são aqueles que efetivamente interessam para situações de dimensionamento e análise de pavimentos. O tráfego rodoviário é composto por veículos que apresentam diversas configurações de eixos com relevantes diferenças de magnitude de cargas (GONDIM, 2008).

Para a realização de dimensionamentos de reforços e/ou estruturas novas de pavimentos, torna-se necessário o conhecimento de parâmetros, como a obtenção do tráfego, geralmente obtido pelo processo de contagens em campo, determinando-se o volume de veículos por dia e também as características do material do subleito, principalmente a obtenção de dados de capacidade de suporte e expansão (BERTI, 2009).

Nas rodovias, circulam diversos tipos de veículos, desde motocicletas, com algumas dezenas de quilos, e carros de passeio com algumas centenas, até carretas que podem chegar a 50 toneladas ou mais quando munidas de autorização especial de transporte. Para fins de dimensionamento estrutural, normalmente são desconsiderados os carros de passeio e as motocicletas, pois possuem peso muito inferior aos veículos de carga e de transporte coletivo. Verifica-se que, em rodovias de concreto, dimensionadas para a passagem de veículos comerciais, é permitido um número infinito de repetições de veículos leves, com danos estruturais desprezíveis ao pavimento (OLIVEIRA, 2000).

De acordo com Marques (2004), as rodas dos pneumáticos (simples ou duplas) que são acopladas aos eixos (conforme Figura 4) podem ser classificadas da seguinte forma:

- ✓ Eixos Simples: Um conjunto de duas ou mais rodas, cujos centros estão em um plano transversal vertical ou podem ser incluídos entre dois planos transversais verticais,

distantes de 100 cm, que se estendam por toda a largura do veículo. Pode-se ainda definir:

- i. EIXO SIMPLES DE RODAS SIMPLES: com duas rodas, uma em cada extremidade (2 pneus); e
 - ii. EIXOS SIMPLES DE RODAS DUPLAS: com quatro rodas, sendo duas em cada extremidade (4 pneus).
- ✓ Eixos Tandem: Quando dois ou mais eixos consecutivos, cujos centros estão distantes de 100 cm a 240 cm e ligados a um dispositivo de suspensão que distribui a carga igualmente entre os eixos (balancin). O conjunto de eixos constitui um eixo tandem. Pode-se ainda definir:
- i. EIXO TANDEM DUPLO: com dois eixos, com duas rodas em cada extremidade de cada eixo (8 pneus). Nos fabricantes nacionais o espaçamento médio de 1,36 m;
 - ii. EIXO TANDEM TRIPLO: com três eixos, com duas rodas em cada extremidade de cada eixo (12 pneus).

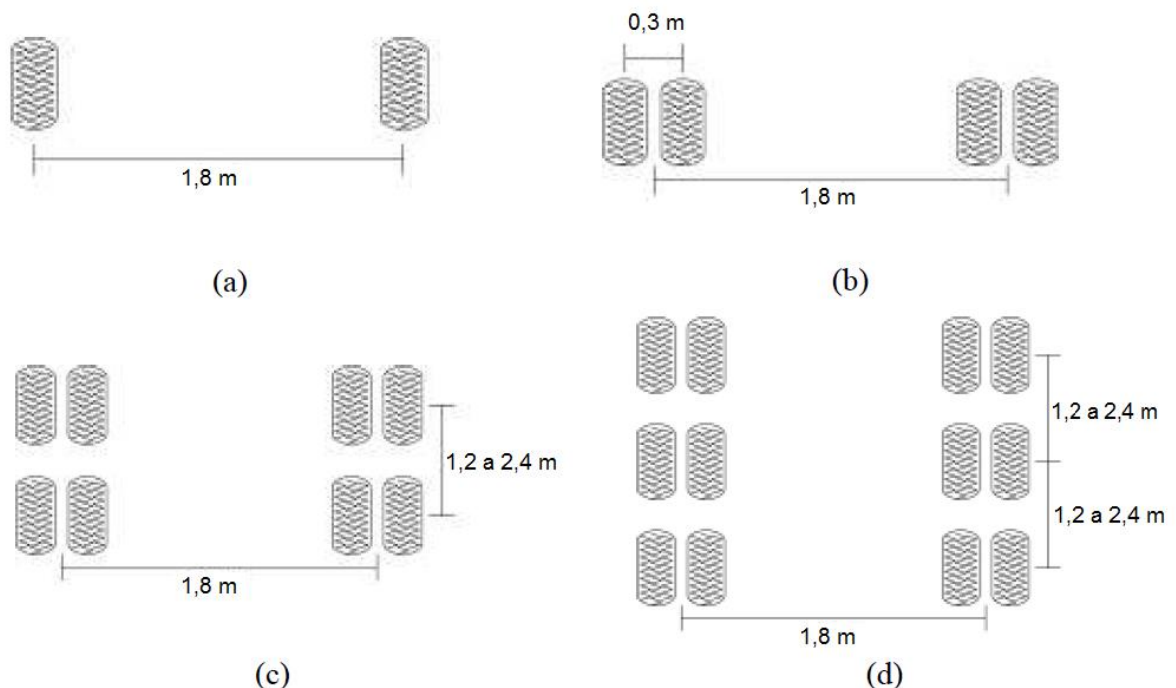


Figura 4: Tipos de eixos: (a) eixo simples de rodagem simples; (b) eixo simples de rodagem dupla; (c) eixo tandem duplo; (d) eixo tandem triplo.

Fonte: RHEINHEIMER, 2007.

O Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN, usando da competência que lhe confere o inciso I, do art. 12, da Lei 9.503, de 23 de setembro de 1997, que instituiu o Código de Trânsito Brasileiro - CTB, estabeleceu limites de dimensões e peso para veículos em trânsito livre (DNIT, 2006a).

Segundo o DNIT (2006a), o CONTRAN alterou a tolerância para o excesso de peso por eixo de 5% para 7,5%, através da Resolução nº 104 de 21/12/99.

A Figura 5 apresenta as configurações básicas, o número de eixos, Peso Bruto Total máximo e a classe de alguns veículos caracterizados como ônibus, adotado pelo DNIT.

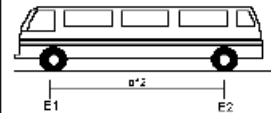
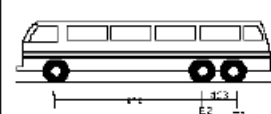

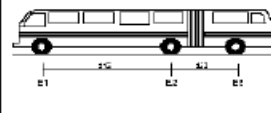
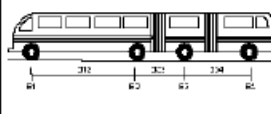
SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	2	16(16,8)	ÔNIBUS E1 = ES, RS, CM 6t ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ED, RD, CM 10t d12 ≤ 3,50m	2CB
	3	19,5(20,5)	ÔNIBUS TRUCADO E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t d12 > 2,40m 1,20 < d23 ≤ 2,40m	3CB
	4	25,5(26,8)	ÔNIBUS DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais, carga máxima 12 ton E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t 1,20 < d34 ≤ 2,40m	4CB
	3	26(27,3)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t d12, d23 > 2,40m	2SB1
	4	36(37,8)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t d12, d23, d34 > 2,40m	2IB2

Figura 5: Veículos adotados pelo DNIT.

Fonte: Manual de Estudos de Tráfego, DNIT, 2006a (Adaptado).

Um fator importante no dimensionamento de pavimentos é o número de solicitações em uma determinada área. Visto que nem todos os veículos trafegam na mesma posição, não é necessário considerar que o ponto mais crítico do pavimento será solicitado pelo número total

de repetições de força. Trabalhos estatísticos têm determinado a porcentagem de veículos que trafegam em cada posição do pavimento (OLIVEIRA, 2000).

2.4.1.1 Área de contato entre pneumático e pavimento

De acordo com MARQUES (2004), quando os pneus são novos, a área de contato é elíptica, tornando-se velhos, a área toma o formato retangular. Por isso, a área de contato pode ser expressa da seguinte forma:

$$A = \frac{P}{K \cdot p} \quad (2.1)$$

sendo:

A: Área de contato

P: Carga atuando sobre pneumático

p: Pressão de enchimento do pneumático

k: Fator que leva em consideração a rigidez do pneu (1 a 1,3)

De acordo com RODRIGUES E PITTA (1998), a área de contato do pneu e o pavimento ainda pode ser expressa por:

$$A = \frac{P_R}{q} \quad (2.2)$$

no qual:

P_R : carga atuante em um pneu, (em N) isto é, a carga total do eixo dividida pelo número de rodas;

q: pressão de enchimento dos pneus, (em Pa).

As dimensões básicas do pneu, L (comprimento) e W (largura), podem ser expressos por:

$$L = \sqrt[2]{\frac{A}{0,523}} \quad (2.3)$$

$$W = 0,6 \times L \quad (2.4)$$

2.4.2 Ações indiretas

A placa de concreto sofre ações devidas à retração, efeito térmico e empenamento, as quais provocam na estrutura o surgimento de tensões e deformações. Estas ações não são consideradas nos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos, porém, a fim de evitar a fissuração por retração, executam-se juntas transversais e, muitas vezes, adotam-se pavimentos armados (RHEINHEIMER, 2007).

- **Retração**

A retração é uma variação volumétrica de um material o qual, ao longo do tempo, tem seu volume reduzido. No concreto de cimento Portland, a retração está associada principalmente à perda de água para o ambiente externo. Normalmente, tanto a retração por secagem e a fluência são considerados conjuntamente segundo artigos, normas e recomendações. Isto porque ambos são aspectos de um mesmo fenômeno, a perda de água, com a diferença que, na retração, esta perda não é provocada pela ação de cargas externas (NUNES e FIGUEIREDO, 2007).

A retração no concreto pode ser classificada em diferentes tipos (NUNES e FIGUEIREDO, 2007; CAUDURO e PELISSER, 2012):

- a. Retração plástica**

Quando o concreto está ainda no seu estado fresco, ocorre a perda da água exsudada para a superfície, devido à evaporação da mesma, ou perda de água por sucção das formas, quando estas não estão impermeabilizadas, ou sucção do substrato. A remoção desta água forma uma série complexa de meniscos capilares que criam pressões capilares negativas que provocam contração volumétrica da pasta de cimento. Esta contração, uma vez restringida, seja pela presença de agregados de grandes dimensões, pela armadura ou qualquer outro fator, provocará tensões de tração e conseqüentemente, fissuração. Tensões de tração também surgem em decorrência de variações diferenciais de volume por toda a massa de concreto pelo fato de que os efeitos da retração não são uniformes por toda esta massa.

- b. Retração por Secagem**

Tal como a retração plástica, porém com o concreto já endurecido, a retração por secagem é provocada pela perda de água da pasta de cimento, como consequência das trocas de umidade com o meio ambiente.

c. Retração Autógena

A retração autógena é ocasionada pela hidratação do cimento Portland, sem qualquer influência externa. Ocorre pela soma de duas retrações: uma é chamada de contração de Le Chatelier, também conhecida como retração química, sendo a redução de volume dos materiais constituintes da pasta de cimento, considerando que o cimento anidro e a água tem um volume maior do que o composto de cimento hidratado; a outra retração é chamada de autossecagem, é responsável pelo maior percentual da retração autógena, ocorre quando o processo de hidratação do cimento succiona a água adsorvida para a hidratação, provocando uma tensão capilar no interior dos poros que gera a aproximação das partículas de cimento hidratado

d. Retração por Carbonatação

A reação dos produtos de hidratação do cimento com o anidrido carbônico do ar tem como consequência a ocorrência de retração. O concreto exposto a carbonatação perde água e comporta-se como se tivesse exposto a uma umidade relativa mais baixa do que a umidade em que está exposto. Uma característica da retração por carbonatação é a sua irreversibilidade. Atribui-se isto a mudanças nas características adesivas do C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado).

A formação de fissuras ocorre porque, devido à retração, há uma tendência de encurtamento da placa das bordas para o centro. Porém, como a face inferior da placa está apoiada sobre a camada de base, surge uma força contrária (conforme apresentado na Figura 6), gerando esforços de tração na placa. Caso não houvesse esse atrito, não haveria, efetivamente, a ocorrência de fissuras, apenas a redução de volume da peça (RHEINHEIMER, 2007).

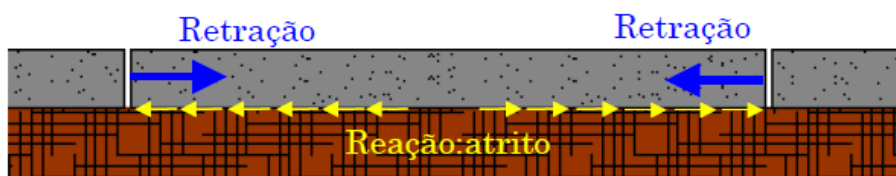


Figura 6: Reação à tendência de retração da placa de concreto.

Fonte: OLIVEIRA, 2000.

A fim de se reduzir a fissuração por retração, utilizam-se os procedimentos de cura, evitando a perda de água para o ar nas primeiras idades do concreto. Se não for realizada uma cura adequada, o material pode retrair antes de atingir a resistência mínima para resistir aos esforços introduzidos pelo fenômeno. Outra maneira de evitar a fissuração é restringir as dimensões da peça para que a deformação atinja, no máximo, um valor que introduza tensões inferiores a capacidade do material (OLIVEIRA, 2000).

- **Dilatação térmica**

A dilatação térmica é um fenômeno semelhante à retração, pois se caracteriza por variações de volume. Nesse caso, as mudanças nas dimensões da peça são causadas por variações de temperatura. Quando há um acréscimo na temperatura, a placa tende a aumentar de volume, sofrendo uma ação contrária de compressão devida ao atrito, ao passo que, quando há uma queda na temperatura, ela tende a se retrair, sendo tracionada pela força de atrito.

De acordo com Medina e Motta (2005), uma variação lenta de 10°C na temperatura, ocorrendo uniformemente na placa, pode causar tensões da ordem de 2,5MPa no centro e 2,1MPa na borda, para um concreto com $E=21000\text{MPa}$, $\mu = 0,15$ e $\alpha t = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$.

- **Empenamento**

Com as variações de temperatura ocorrentes durante o dia e a noite, as placas de concreto sofrem efeitos diferenciais de dilatação e compressão térmica. Durante o dia, com a ação do calor, a placa é aquecida primeiramente em sua face superior, sendo que a inferior permanece com uma temperatura menor. Este diferencial de temperatura induz a movimentação da placa, conforme a Figura 7. Entretanto, o peso próprio atua no sentido inverso, impedindo esta movimentação, e assim surgem esforços de tração na face inferior e compressão na superior.

Já no período noturno, ocorre o fenômeno contrário (Figura 8), criando um gradiente de temperaturas, provocando assim o efeito de empenamento da placa (OLIVEIRA, 2000).

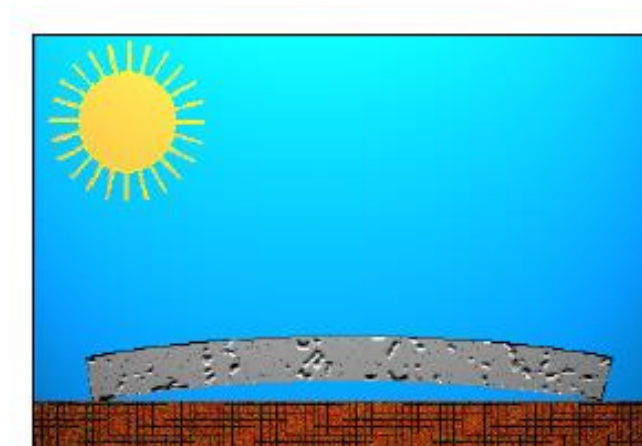


Figura 7: Tendência de empenamento da placa de concreto durante o dia.

Fonte: OLIVEIRA, 2000.

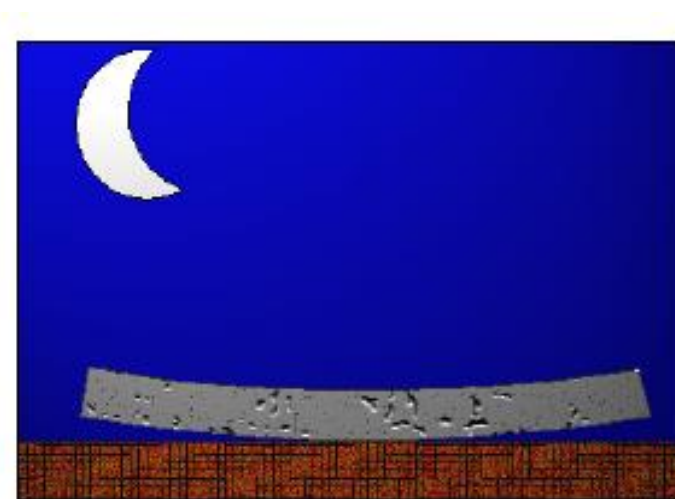


Figura 8: Tendência de empenamento da placa de concreto durante a noite.

Fonte: OLIVEIRA, 2000.

O efeito da temperatura no pavimento de concreto tem sido estudado desde a década de 1920. Westergaard (1926; 1927), na sua análise das tensões de pavimento de concreto, assumiu que a distribuição da temperatura através da espessura da laje seria linear. No início dos anos 1930, os gradientes de temperatura não lineares começaram a ser comprovadas por dados experimentais apresentados por vários pesquisadores (SIDDIQUE Z. Q; HOSSAIN M.; MEGGERS D., 2005). Liang e Niu (1998) apud RAIA (2010), de forma analítica, verificaram

a influencia da temperatura com a profundidade e propõem que o cálculo do empenamento ou das tensões causadoras desse efeito seja manipulado com modelo não linear.

Tensões por empenamento em pavimentos de concreto variam de acordo com o gradiente de temperatura entre o topo e a base da placa. A menos que medições reais em campo sejam feitas, pode-se admitir um gradiente de temperatura máximo de 2,5 a 3,5°F/in (0,055 a 0,077°C/mm) durante o dia e cerca de metade destes valores à noite, para países de clima temperado (Huang, 2004).

No país, Silva (2001) e Severi (2002) apud GONDIM (2008), mediram, no Rio de Janeiro e São Paulo, respectivamente, gradientes de temperatura em placas de concreto. No Rio de Janeiro, foi medido um gradiente máximo positivo de 0,083°C/mm e negativo de 0,074°C/mm para uma placa de 15cm de espessura sobre uma camada de concreto asfáltico de 5cm. Em São Paulo, os gradientes térmicos positivos na placa de 150mm de espessura apresentaram variação durante o ano entre 0,061°C/mm e 0,069°C/mm. Na placa de 250mm, os gradientes foram de 0,067°C/mm a 0,078°C/mm durante a primavera e verão, e de 0,045°C/mm durante o outono e inverno.

2.4.2.1 Tensões combinadas

De acordo com Huang (2004), apesar das tensões devido ao empenamento serem excessivas a ponto de causar fissuras no concreto quando combinadas com as tensões devido ao carregamento, elas geralmente não são consideradas no projeto da espessura da placa, pelas seguintes razões principais:

- Juntas e armaduras são usadas para alívio e controle das tensões por empenamento. Tensões por empenamento são aliviadas quando o concreto sofre fissuras. Minúsculas fissuras não afetarão a capacidade de suporte de carga dos pavimentos, enquanto a transferência de carga através das mesmas puder ser mantida;
- Quando o critério de fadiga é utilizado no projeto, não é prático combinar carregamento e empenamento pela temperatura. Um pavimento pode ser submetido a milhões de repetições de carga durante o período de projeto, mas o número de tensões reversas devido ao empenamento é bastante limitado;

- Tensões de empenamento podem ser adicionadas ou subtraídas das tensões de carregamento para se obter as tensões combinadas. Se o projeto for determinado pela tensão na borda, tensões por empenamento devem ser acrescidas às tensões por carregamento durante o dia e subtraídas durante a noite. Devido ao efeito compensatório e ao fato de que um grande número de caminhões pesados trafegam durante a noite, não se tornará muito crítico se as tensões pelo empenamento forem ignoradas.

2.5 Fundação do pavimento rígido

O pavimento de concreto tem a característica de absorver os momentos impostos pelo carregamento e transmitir à fundação esforços de baixa intensidade, não exigindo, portanto, grande capacidade de suporte do subleito. Apesar de não exigir solo de grande resistência mecânica, os pavimentos rígidos podem apresentar problemas quando construídos sobre solos expansivos, ou sobre camadas espessas de argila mole, ou seja, a ocorrência de variações bruscas nas características do subleito também pode prejudicar o comportamento do pavimento (OLIVEIRA, 2000).

Desde o tempo de Westergaard na década de 1920, convencionou-se utilizar o termo “fundação” como sinônimo de subleito quando se trata de pavimentos rígidos (GONDIM, 2008).

2.5.1 Tipos considerações de fundação

De acordo com Huang (2004), três tipos diferentes de fundação podem ser assumidos: líquido denso, sólido elástico e em camadas. Quase todos os programas computacionais que utilizam o método de elementos finitos para calcular tensões-deformações em pavimentos de concreto, em uso atualmente, são baseados em fundação do tipo líquido denso. Este tipo de fundação, baseada na teoria de Westergaard, tem como vantagem a redução do tempo de processamento para resolução dos problemas, porém, com o avanço tecnológico dos computadores pessoais, pode-se utilizar com facilidade modelos de fundações mais realísticas, do tipo sólido elástico ou em camadas.

Huang (2004) descreve os tipos de fundação da seguinte forma:

- **Fundação líquido denso**

A modelagem do solo de subleito como um líquido denso, também chamada de fundação Winkler, tem relação força-deflexão caracterizada como uma mola elástica. O termo líquido não significa que a fundação seja um líquido sem cisalhamento, apenas que a deformação da fundação embaixo da placa está de acordo com os princípios de Archimedes, ou seja, a placa é colocada em um número infinito de molas e o volume total deslocado é proporcional à carga total aplicada. A rigidez de uma fundação tipo líquido denso é definida por:

$$k = p/w \quad (2.5)$$

onde k é o módulo de reação do subleito, p é a pressão unitária ou força por unidade de área e w é a deflexão vertical. Para a água, $k=62,4 \text{ pcf} = 0,036 \text{ pci}$ ($9,8\text{kN/m}^3$); para os subleitos usuais, k pode variar de 50 a 800 pci ($13,6$ a 217 MN/m^3).

Na Figura 9, mostra-se a representação da modelagem tipo líquido denso, que consiste em substituir o solo do subleito por um grande número de molas sob um elemento de placa retangular, com comprimento $2a$ e largura $2b$, e quatro idênticas molas nos cantos. A força em cada mola é igual à unidade de pressão p multiplicada pela área $a \times b$. Da Equação 2.5, $p=k_w$, a força no nó i (F_{wi}) é relacionada à deflexão no nó i (w_i) por:

$$F_{wi} = k_{ab}w_i \quad (2.6)$$

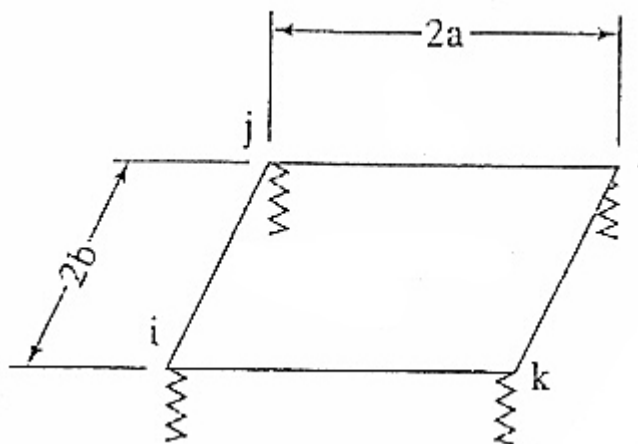


Figura 9: Representação de uma fundação do tipo líquido denso sob um elemento de placa.

Fonte: Huang, 2004.

A Equação 2.6 pode ser aplicada diretamente quando o nó se encontra localizado no canto da placa. Se o nó se encontrar nas bordas ou no interior da placa, uma superposição de dois ou quatro elementos adjacentes é necessária para obtenção da relação força-deslocamento. A Equação 2.3 indica que a força vertical no nó i depende apenas da deflexão vertical no nó i , sendo independente da deflexão nos outros nós e, então a matriz de rigidez de uma fundação do tipo líquido denso é a matriz diagonal com valor igual a 0 em todos os pontos, exceto nos próprios nós, onde são relacionadas a força vertical F_{wi} com a deflexão vertical w_i .

- **Fundação sólido elástico**

A representação do solo do subleito como um sólido elástico é mais realística que a do líquido denso, porque a deflexão em qualquer ponto nodal depende não apenas da força no próprio nó mas também das forças em todos os outros nós. Este tipo de modelagem também é chamada de fundação de Boussinesq, visto que a seguinte equação de Boussinesq para deflexão da superfície é usada para determinação da matriz de rigidez:

$$w_{i,j} = \frac{P_j(1-\nu_f^2)}{\pi E_f d_{i,j}} \quad (2.7)$$

Nesta equação, w_{ij} é a deflexão no nó i devido à força do nó j , P_j é a força no nó j , ν_f é o coeficiente de Poisson da fundação, E_f é o módulo de elasticidade da fundação e d_{ij} é a distância entre os nós i e j . A matriz de flexibilidade da fundação é definida como a deflexão de um dado nó devido a forças em todos os nós, inclusive ele mesmo. Se $i \neq j$, o coeficiente de flexibilidade pode ser obtido diretamente da equação 2.7, assumindo $P_j=1$. Se $i = j$, então $d_{i,j}=0$ e a equação 2.7 não pode ser aplicada. Neste caso, torna-se necessário distribuir a carga unitária concentrada sobre um quarto de área como uma pressão uniforme de $1/(4ab)$ e então integrar numericamente.

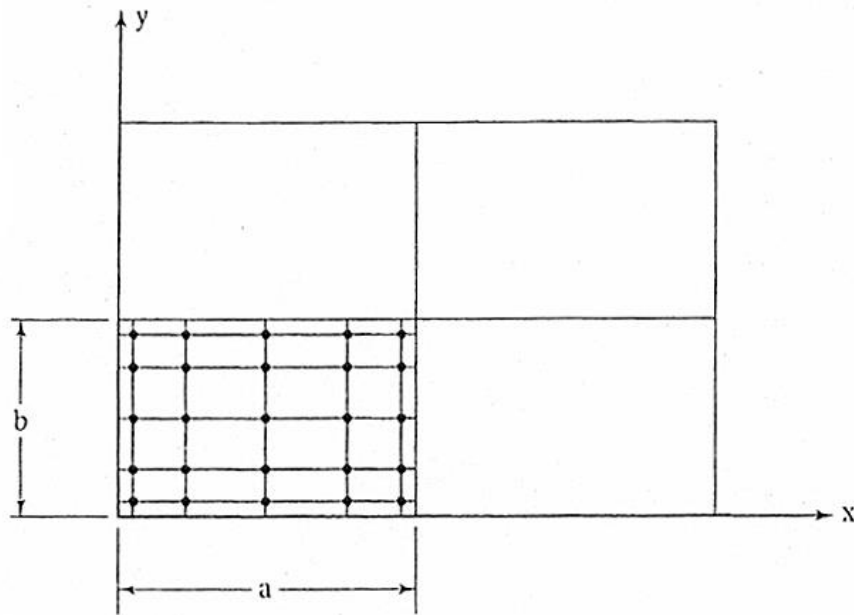


Figura 10: Representação da fundação tipo sólido elástico sob um elemento de placa.

Fonte: Huang, 2004.

Para o total de n nós na fundação, a matriz de flexibilidade de uma fundação do tipo sólido elástico pode ser escrita por:

$$\begin{Bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \cdot \\ W_i \\ \cdot \\ W_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdot & g_{1i} & \cdot & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \cdot & g_{2i} & \cdot & g_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g_{i1} & g_{i2} & \cdot & g_{ii} & \cdot & g_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g_{n1} & g_{n2} & \cdot & g_{ni} & \cdot & g_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{w1} \\ F_{w2} \\ \cdot \\ F_{wi} \\ \cdot \\ F_{wn} \end{Bmatrix}$$

Onde g_{ij} é o coeficiente de flexibilidade. Se $i \neq j$, então g_{ij} pode ser determinado por:

$$g_{i,j} = \frac{(1-\nu_f^2)}{\pi E_f d_{i,j}} \quad (2.8)$$

Se $i=j$, então g_{ij} , para cada elemento finito precisa ser integrado numericamente e depois superposto em todos os elementos adjacentes. Pode-se ver que a matriz de flexibilidade de uma fundação do tipo sólido elástico é muito mais usual, porque a deflexão em um dado nó é afetada pela força em qualquer outro nó. O inverso da matriz de flexibilidade leva à matriz de rigidez da fundação.

- **Fundação em camadas (fundação não homogênea)**

A representação do solo de subleito e também da sub-base conjuntamente como uma fundação em camadas é também chamada de fundação de Burmister, porque a teoria das camadas de Burmister é usada para formar a matriz de flexibilidade. Na teoria de Burmister, a carga é distribuída sobre uma área circular, mas pode facilmente ser convertida para uma carga concentrada, levando o raio de contato a um valor próximo a zero. O procedimento para fundação em camadas é o mesmo para fundação sólido elástico, exceto que a relação entre deflexão e força para a camada de fundação é computada por outra equação, ao invés da Equação 2.7.

2.5.2 Determinação do Coeficiente de Recalque

Muitos dos métodos de dimensionamento de pavimentos de concreto utilizam a modelagem da fundação como líquido denso. Portanto, o parâmetro mais utilizado para representação da resposta estrutural do solo, ou do conjunto subleito-sub-base, é o Coeficiente de Recalque (OLIVEIRA, 2000).

De acordo com o Manual do DNIT (2005), o coeficiente de Recalque é determinado em uma prova de carga estática, conforme a norma DNIT 055/2004-ME, que se baseia na norma ASTM-D 1196 (1977) e em diretrizes específicas do United States Army Corps of Engineers. A faixa de variação dos valores do coeficiente de recalque, em relação aos diversos tipos de solo (classificação AASHTO-BPR), está mostrada na Tabela 1, que pode ser usada na avaliação previa de k para cálculos preliminares de custos, por exemplo.

Tabela 1: Relação aproximada entre o tipo do solo do subleito e o coeficiente de recalque

Tipos de Solo(AASHTMO M145)	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: Manual de Pavimentos Rígidos, DNIT, 2005.

Para a determinação do coeficiente de recalque, admite-se lançar mão de uma correlação entre os valores do coeficiente de recalque do solo do subleito e os valores obtidos para o Índice de Suporte Califórnia (CBR) deste subleito, devendo-se, entretanto, tomar as precauções necessárias e, especialmente, considerar a experiência regional (DNIT, 2005).

Na Figura 11, apresenta-se a relação entre o Índice de Suporte Califórnia (CBR) e o coeficiente de recalque (k) do subleito.

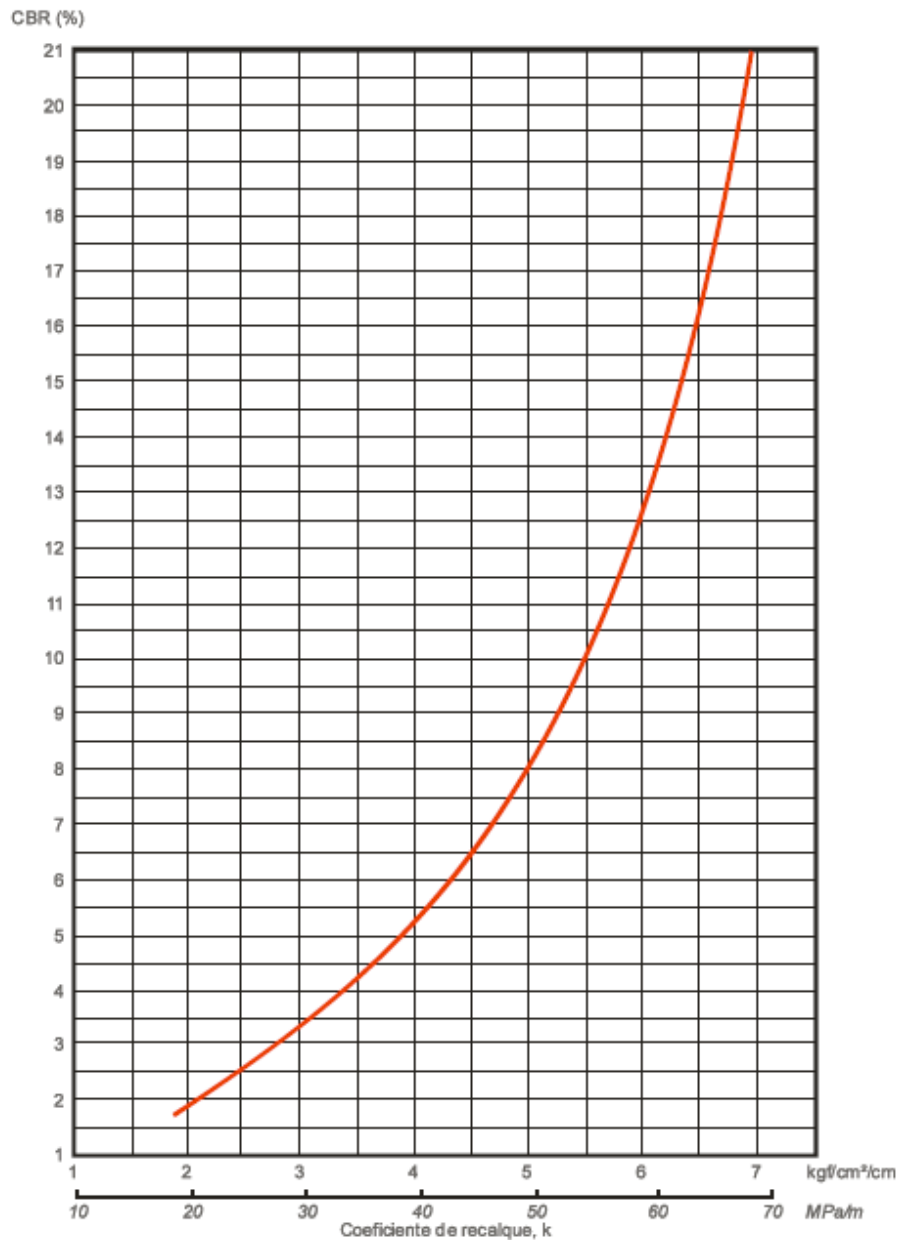


Figura 11: relação entre o Índice de Suporte Califórnia (CBR) e o coeficiente de recalque (k) do subleito.

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos, DNIT, 2005.

2.6 Teoria de Westergaard

De acordo com ANDRADE (2007), a teoria de Westergaard para pavimentos de concreto rígido baseia-se na determinação do coeficiente de reação combinada ou correlação K_c do solo, e o cálculo da tensão de tração, para uma placa carregada por uma força P produzida pelos veículos que passam. A via é considerada como uma placa homogênea, isotrópica e

elástica, com módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν , com espessura h constante. Os casos estudados estão ilustrados na Figura 12.

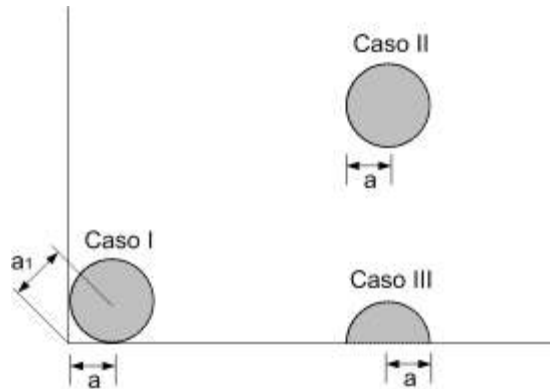


Figura 12: Posições e configurações analisadas por Westergaard em 1926.

Fonte: RHEINHEIMER, 2007.

- **Caso I: Carregamento no canto da placa**

Segundo Medina e Motta (2005), ao aplicar-se um carregamento de roda no canto da placa, surgem tensões de tração no topo desta. A deflexão nas proximidades do canto da placa pode ser expressa pela equação:

$$z_c = \frac{P}{k\lambda^2} \left(1,1e^{-\frac{x}{\lambda}} - \frac{a_1}{\lambda} 0,88e^{-\frac{2x}{\lambda}} \right) \quad (2.9)$$

No qual:

z_c : deslocamento máximo para força no canto da placa;

a_1 : distância do canto da placa ao eixo de aplicação da carga (conforme Figura 2.12);

λ : raio de rigidez relativa;

P: força aplicada;

x: distância do ponto considerado ao canto da placa;

k: módulo de reação da fundação.

O raio de rigidez relativa λ é a distância entre o ponto de aplicação da força e o ponto de momento nulo, e pode ser expresso pela equação:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (2.10)$$

No qual:

ν : coeficiente de Poisson;

E: módulo de elasticidade do concreto;

h: espessura da placa.

A tensão na face superior da placa provocada pela carga aplicada no canto é expressa pela equação:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a}{\lambda} \right)^{0,6} \right] \quad (2.11)$$

onde:

σ_c : tensão no topo da placa.

- **Caso II: Carregamento no interior da placa**

Westergaard apresenta, para uma carga aplicada no interior da placa, as tensões segundo a Equação 2.9 e os deslocamentos verticais segundo a equação abaixo.

$$\sigma_i = \frac{3(1+\nu)P}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{\lambda}{a} + 0,6159 \right) \quad (2.12)$$

onde:

a: raio da área circular em que a força do pneu é distribuída (Figura 2.12);

σ_i : tensão de tração máxima para força no interior da placa.

$$z_i = \frac{P}{8k\lambda^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2\lambda} \right) - 0,673 \right] \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right\} \quad (2.13)$$

onde:

z_i : deslocamento máximo para força no interior da placa.

- **Caso III: Carregamento na borda da placa**

Westergaard apresentou, durante a evolução de seus trabalhos, diversas formulações que expressam a tensão devido ao carregamento na extremidade. Em 1948 apresentou soluções generalizadas para tensões e deslocamentos máximos produzidos por cargas circulares e semicirculares aplicadas a borda da placa, diferindo significativamente das formulações apresentadas anteriormente, considerando, para carga circular tangente a borda, a Equação 2.14 para tensão e a Equação 2.15 para deformação.

$$\sigma_{b(\text{circular})} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1,84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1,18(1+2\nu)a}{\lambda} \right] \quad (2.14)$$

onde:

$\sigma_{b(\text{circular})}$: tensão de tração máxima para força no bordo da placa e área circular.

$$z_{b(\text{circular})} = \frac{\sqrt{2+1,2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0,76+0,4)a}{\lambda} \right] \quad (2.15)$$

onde:

$z_{b(\text{circular})}$: deslocamento máximo para força no bordo da placa e área circular.

Para carga semicircular, considera-se seu bordo paralelo a extremidade da placa, obtendo-se as Equações 2.16 para tensão e 2.17 para deformação.

$$\sigma_{b(\text{semi-circular})} = \frac{0,803P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{\lambda}{a} \right) + 0,282 \left(\frac{\lambda}{a} \right) + 0,650 \right] \quad (2.16)$$

onde:

$\sigma_{b(\text{semi-circular})}$: tensão de tração máxima para força no bordo da placa e área semicircular.

$$z_{b(\text{semi-circular})} = \frac{\sqrt{2+1,2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0,323+0,17\nu)a}{\lambda} \right] \quad (2.17)$$

onde:

$Z_{b(\text{semi-circular})}$: deslocamento máximo para força no bordo da placa e área circular.

Westergaard foi o primeiro a apresentar um desenvolvimento lógico para determinação de esforços em pavimentos rígidos. Seus trabalhos constituem a base dos métodos utilizados atualmente para dimensionamento de pavimentos de concreto (OLIVEIRA,2000).

PICKETT e RAY (1951) apud OLIVEIRA (2000), propuseram um método gráfico, através de cartas de influência, para determinar as tensões, os momentos e os deslocamentos verticais, simplificando a aplicação das expressões de Westergaard. Os mesmos autores construíram ábacos equivalentes às cartas de influência, para eixos simples e tandem duplo, típicos dos Estados Unidos.

2.7 Dimensionamento do Pavimento

O dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico visa assegurar que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não irá causar o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de vida do projeto, como também garantir que as espessuras das camadas de sua estrutura, bem como suas características, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (acúmulo excessivo de deformação permanente), considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais (FRANCO, 2007).

Para pavimentos flexíveis, os métodos de dimensionamento consideram a equivalência entre um eixo padrão e as cargas de eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, através do cálculo do Número N, que é o número de repetições de um eixo padrão (eixo simples de rodas duplas) de 80 kN, na faixa de projeto, durante o período do projeto. Para pavimentos de concreto, os métodos de dimensionamento consideram o efeito dos danos de cada tipo de eixos, isoladamente (GONDIM, 2008).

2.7.1 Dimensionamento de Pavimentos Rígidos: Método do PCA/84

O método de dimensionamento da Portland Cement Association de 1984 (PCA/84) surge com o reconhecimento de algumas deficiências nos procedimentos anteriores de projeto por ele mesmo emanados, a saber: a prática de uso de barras de transferência de cargas em juntas não era estruturalmente considerada no método anterior; o emprego de acostamentos pavimentados em concreto muito contribuía para um melhor desempenho dos pavimentos; existia outro modo de ruptura que não aquele por fadiga, incorrendo em dano funcional para os pavimentos conforme fora verificado na AASHTO Road Test (BALBO, 2003).

O método PCA (1984), aplica-se tanto a pavimento de concreto simples e com barras de transferência, quanto aos dotados de armadura distribuída, descontínua ou contínua, sem função estrutural, e emprega um modelo de análise estrutural por elementos finitos (DNIT, 2005).

O método PCA (1984) se baseia em quatro pontos:

- Estudos teóricos clássicos sobre o comportamento de placas e análises computacionais com elementos finitos;
- Ensaios de laboratório e modelos de comportamento de juntas, sub-bases e acostamento;
- Pistas experimentais (AASHTO) e estudos específicos (TRB e ASCE);
- Observações do comportamento em serviço

Segundo o Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005), o método é aplicável no dimensionamento de:

- Pavimentos de concreto simples, nos quais não há nenhuma espécie de aço, sob nenhuma forma, e têm a entrosagem de agregados como única maneira de transferência de carga entre placas (no Brasil, de 4,5m a 6,0m de comprimento);
- Pavimentos de concreto simples com barras de transferência, dotados de sistema artificial de transmissão de cargas formados por barras curtas de aço liso, postadas na

meia-seção das juntas transversais e que podem ter comprimentos de placa de até 9,0m a 12m;

- Pavimentos de concreto com armadura distribuída descontínua, que contam com barras de aço sob a forma de armadura distribuída, que se detém antes de cada junta transversal, nas quais é obrigatória a adoção de barras de transferência, armadura esta que não tem função estrutural, ou seja, não contribui para aumentar a resistência da placa à flexão, agindo com a exclusiva função de manter as fissuras fortemente ligadas, que por acaso se formem entre duas juntas transversais seguidas, fato comum nesse tipo de pavimento, cujas placas são de grande comprimento, de até 30,0m(embora 12,0m a 15,0m sejam mais adotados);
- Pavimentos de concreto com armaduras distribuídas contínuas, nos quais não há juntas transversais de retração e a armadura, bastante pesada, faz com que se tenha boa transmissão de carga nas fissuras; o comprimento das placas é igual à extensão viária construída (não há exemplos de utilização dessa forma de pavimentos de concreto no Brasil).

2.7.1.1 Modelos de Ruína

a. Fadiga

A fadiga é um processo de modificações progressivas e permanentes que ocorre nos materiais sob tensões repetidas. Portanto, é associada às ações dinâmicas ou aos carregamentos cíclicos. Essas modificações podem ser danosas, resultando em aumento progressivo de fissuras internas, que implica na perda de rigidez da estrutura. A deterioração pode evoluir a eventuais fraturas do material, caso a repetição seja suficientemente grande. Uma peça é capaz de romper por fadiga, sem que o nível de tensões ultrapasse a resistência do material (OLIVEIRA, 2000).

O dimensionamento pelo método PCA (1984) é feito com base em fatores de fadiga, que consiste em uma relação entre tensões e o tipo de carga. Essa relação é produzida pela passagem da carga que tangencia a borda longitudinal.

O critério de fadiga está mostrado na Figura 13.

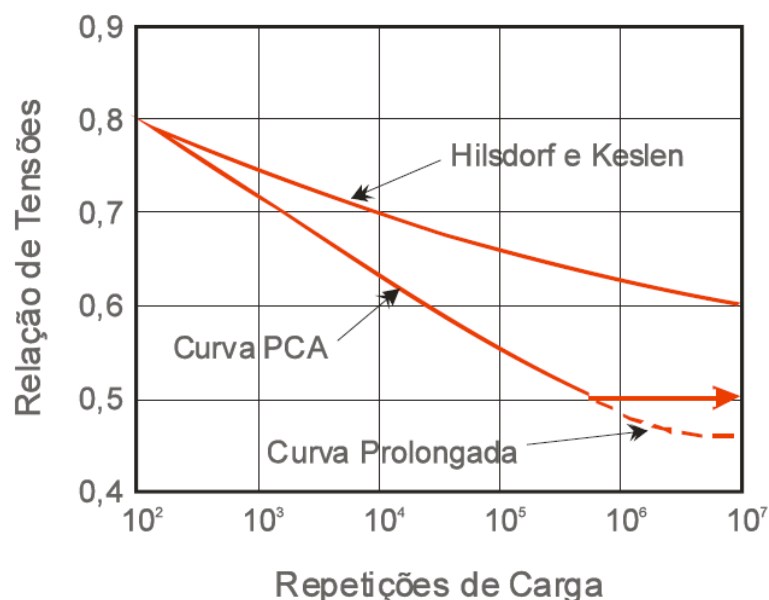


Figura 13: Curvas de Fadiga.

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos, DNIT (2005).

As equações que descrevem a curva de fadiga estão apresentadas na Tabela 2 .

Tabela 2:Equações para representação da curva de fadiga

Relação de Tensões (R_T)	Equação
Menor que 0,45	$N = \text{ilimitado}$
De 0,45 a 0,55	$N = [4,2577 / (R_T - 0,4325)]^{3,268}$
Maior de 0,55	$\text{Log}N = (0,9718 - R_T) / 0,0828$

Fonte: Pitta, 1998.

b. Erosão

A erosão é a perda de material do topo da camada imediatamente sob a placa de concreto. Ocorre devido à ação combinada da água e da passagem de forças elevadas (OLIVEIRA, 2000). O critério de dano por erosão é intimamente ligado às condições climáticas regionais e à eficiência da drenagem, não sendo esses fatores cobertos pelo método (DNIT, 2005).

O critério de erosão depende da correlação entre os valores calculados das deformações verticais do canto da placa e das pressões verticais exercidas na interface entre a placa e a sua

fundação. Criou-se como parâmetro de erosão o conceito de potência, taxa de trabalho ou fator de erosão (P), que mede o poder que uma certa carga tem para produzir uma certa deformação vertical à placa. Este fator é o produto da pressão vertical na interface (p), pela deformação vertical (w), dividido pelo raio de rigidez relativa (l_c) da bacia de deformação da fundação, por unidade de área (DNIT, 2005).

2.7.1.2 Tipos de Pavimentos

- Pavimentos com juntas transversais de retração:

A posição crítica da carga de projeto é próxima ou tangente à borda longitudinal e a meio caminho entre duas juntas, no que se refere às tensões de tração por flexão, ilustrado na Figura 14. Na análise de erosão, a deformação crítica é a que se dá no canto da placa, mostrado na Figura 14, quando a carga tangencia ao mesmo tempo a borda longitudinal livre do pavimento e a junta transversal (DNIT, 2005).

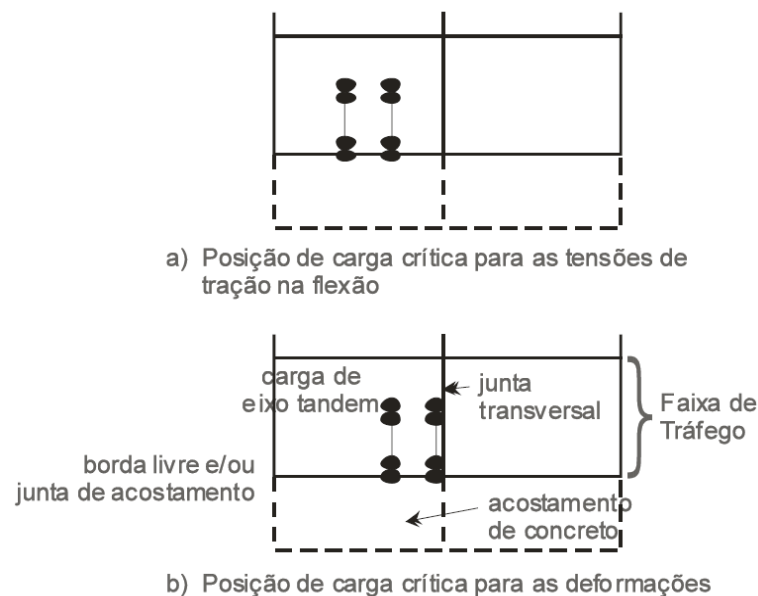


Figura 14: Posições Crítica de Carga.

Fonte: Manual de Pavimentos Rígidos, DNIT (2005).

- Pavimentos continuamente armados:

O emprego deste tipo de pavimento no Brasil é desconhecido, e deverá ser raro, mesmo no futuro, e por isto, deixar-se-á de se tratar do mesmo no presente trabalho.

2.7.1.3 Barras de Transferência

Comparando-se pavimentos com e sem barras de transferência, verifica-se que a contribuição destas barras pode ser tão grande a ponto de trazer uma economia de até 5 cm na espessura na placa, no caso de cotejo com pavimentos sem acostamento de concreto e sem sub-base, para tráfego pesado (DNIT, 2005).

2.7.2 Dimensionamento de Pavimentos Rígidos: Métodos Mecanísticos

Modelos fechados para o cálculo de tensões críticas em pavimentos de concreto simples, baseados em modelagem numérica, são alternativas para o dimensionamento dessas estruturas de maneira mais aberta, tendo em vista muitos dos fatores e das limitações discutidas sobre os métodos tradicionais. Recordemos, ressaltando, que o método da PCA (1984) é um modelo fechado, baseado em análise numérica, no que tange ao cálculo de tensões, para dimensionamento estrutural (BALBO, 2004).

O dimensionamento mecanístico é importante para verificar as espessuras previamente estabelecidas por outros métodos, considerando o tráfego, os materiais constituintes das camadas no que se refere às propriedades mecânicas e espessuras e a característica do subleito, através de cálculo de tensões atuantes e deformações obtidas e sua consequente comparação com as condições previamente estabelecidas (BERTI, 2009).

Neste trabalho, a análise mecanicista será realizada com auxílio do software EverFe 2.25, o qual será descrito a seguir.

2.7.2.1 Programa Computacional EverFe

EverFE 2.25 foi idealizado tendo como base o método dos elementos finitos. Ele utiliza um modelo de interligação entre os elementos que compõem a estrutura, que no caso são o cimento e o agregado, para estabelecer transferência de carga entre eles. Foi desenvolvido pelas Universidades de Maine e Washington (EUA).

O software é capaz de executar análises em três dimensões (3D), lineares ou não lineares, para pavimentos simples ou com juntas, e possui elementos que buscam uma semelhança com o concreto e as várias interações entre as partes constituintes do pavimento. Dentro do mesmo software, são realizados o pré-processamento, a solução e o pós-processamento. A

visualização das análises é realizada por uma interface gráfica ou pela utilização do banco de dados gerado durante o processamento (RAIA, 2010).

O software EverFe 2.25 incorpora capacidades gráficas para visualização da composição do pavimento, possibilitando a realização de geometrias complexas, com uma ou várias placas, com ou sem juntas, várias camadas e vários outros fatores, tais como efeitos de temperatura. O subleito é modelado como um liquido denso, sendo que a versão atual assume que a fundação e a placa são linearmente elásticas. O modelamento para a perda de contato entre a placa e suporte, quando não aderidas, tem grande significado para o estudo do empenamento da placa (RAIA, 2010).

A tela inicial do referido programa computacional pode ser visualizada na Figura 15:

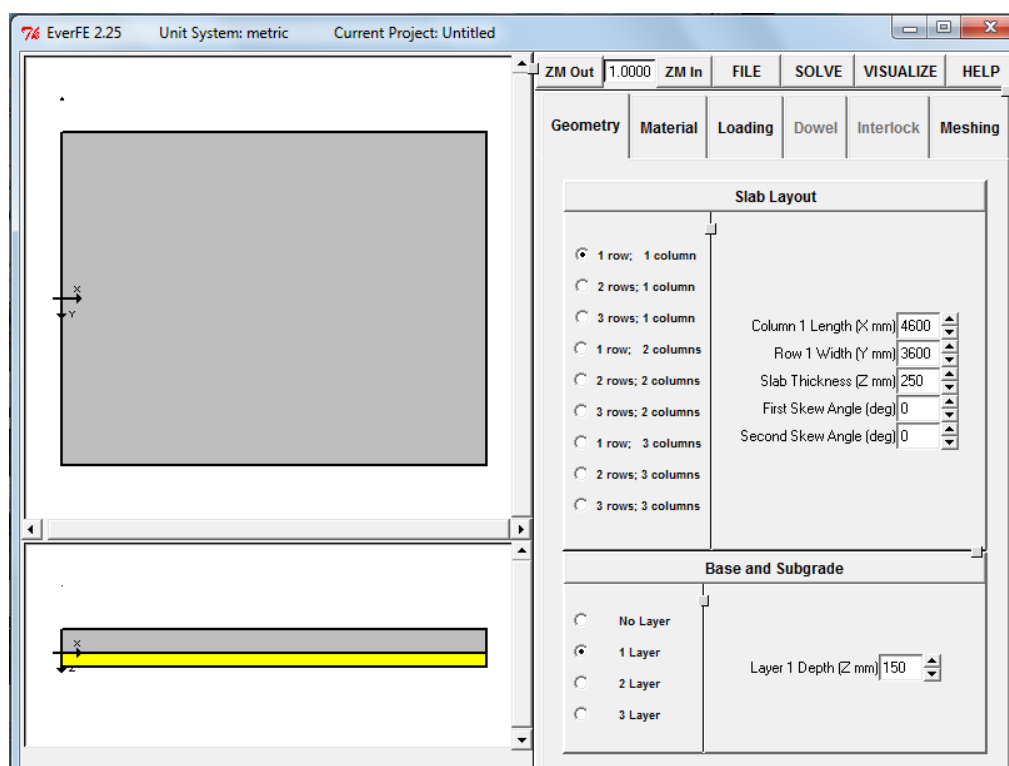


Figura 15: Tela inicial do Programa EverFe

Fonte: Programa Computacional, EverFe

De acordo com o Manual do software, de suas características importantes incluem:

- Simula até nove placas de concreto;
- Mais de três camadas elásticas (aderidas ou não a placa de concreto);

- Análise de respostas frente à ação de carregamentos rodoviários e diferenciais térmicos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 BRT – Corredor Eixo Norte

O projeto do Corredor Eixo Norte, de propriedade do Departamento de Estradas e Rodagem do Distrito Federal (DER-DF), objeto deste estudo, consiste na implantação de um subsistema de transporte, concebido para o modal BRT (Bus Rapid Transit) com operação regulada por sistema de planejamento, gestão e controle operacional centralizado do DF (ITS), circulando em faixa exclusiva e preferencial, com a utilização de veículos modernos, estações localizadas no canteiro central com embarque em nível e pagamento antecipado nas estações, conforme ilustração da Figura 16.

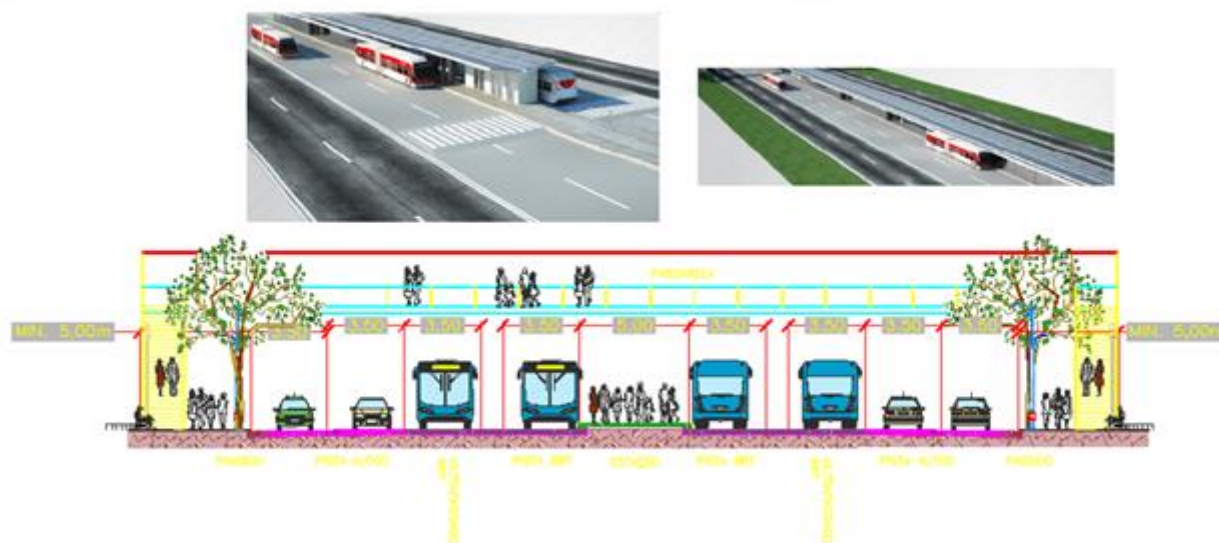


Figura 16:Esquema das estações - BRT - Corredor Eixo Norte - DF.

Fonte: Edital de Pré-Qualificação n° 001/2014, DER-DF (2013).

O Corredor Eixo Norte objetiva dotar as populações das cidades de Planaltina, Sobradinho, Sobradinho II, Varjão, Planaltina de Goiás, Formosa e as populações residentes na divisa norte/nordeste do Distrito Federal de um sistema de transporte moderno, confortável, rápido e confiável, a custos reduzidos. A população a ser atendida corresponde a, aproximadamente, 300 mil habitantes, que representam cerca de 12% da população do DF.

O modelo operacional proposto compõe-se de um serviço básico “tronco-alimentado flexível” com integração, aberta e temporal, entre linhas alimentadoras e troncais, e pelas linhas de transporte público coletivo que atendem aos usuários das cidades do Eixo Norte e do Entorno Norte/Nordeste com destino ao Plano Piloto. O serviço contará com linhas troncais e expressas, que farão a ligação entre as cidades de Planaltina do DF e Sobradinho ao Plano Piloto. Contará ainda com linhas circulares internas ou alimentadoras/distribuidoras, que atenderão às demandas de uma mesma região e alimentarão as linhas troncais, propiciando a máxima mobilidade e acessibilidade da população.

O Corredor Eixo Norte foi subdividido em Subtrechos que estão assim relacionados:

Os Subtrechos 1, 3, 5, 6 e 7, compõem o Eixo Principal (Avenida Independência/BR-020/DF-003), com a seguinte configuração:

- Subtrecho1 (7,82 km): inicia-se no Terminal de Planaltina, seguindo em faixa exclusiva de ônibus integrada ao sistema viário local até a BR-020, por onde segue em faixa exclusiva segregada até a interseção com a Via Contorno Estância (Subtrecho 2);
- Subtrecho3 (12,94 km): segue com faixa segregada pela BR-020 a partir do último ponto até a interseção com a Rua Um, em Sobradinho (Subtrecho B);
- Subtrecho5 (6,50 km): continua do ponto anterior até o Balão do Colorado, pela BR-020, na mesma configuração;

O Eixo Principal operará em paralelo ao sistema rodoviário/viário da BR-020/DF-003, cujo volume médio diário de tráfego alcança 99.199 veículos na altura do Balão do Torto, sendo de veículos de pequeno porte a predominância destes, (92%).

Conectados a este, encontram-se outros 7tramos, quais sejam:

- Subtrecho A (2,38 km): trecho compartilhado com tráfego misto ligando o futuro Terminal de Mestre D’Armas à BR-020, através da DF-128;
- Subtrecho 2 (3,00 km): liga o Terminal de Mestre D’Armas à BR-020 pela Via Contorno Estância, com previsão de implantação de faixa exclusiva para ônibus, adjacente ao sistema viário local;

- Subtrecho B (4,74 km): interno a Sobradinho, configura-se como uma ligação entre o corredor principal e o Terminal de Sobradinho através da implantação de faixa exclusiva adjacente ao sistema viário local, nas Ruas Um, Três e Quatro;
- Subtrecho C (6,84 km): estrutura a ligação entre o Subtrecho B e a DF-150 com o prolongamento da faixa exclusiva integrada ao sistema viário local pela Rua Quatro e pela via interna de Sobradinho II (DF-420), interligando com o futuro Terminal de Sobradinho II até a altura do cemitério desta cidade, a partir do qual o tráfego se dá por meio de alimentadores até a interseção com a DF-150. Neste trecho será implantado 2,84 km de BRT;
- Subtrecho 4 (6,84 km): trecho atendido por alimentadores, da interseção com a DF-420 (Posto Contagem) até a BR-020 (Balão do Colorado);
- Subtrecho D (2,04 km): trecho compartilhado na DF-007, da interseção com a DF-003 (Balão do Torto) até a interseção com a DF-002 (Eixo Rodoviário Norte), na ponte do Bragueto;
- Subtrecho E (7,70 km): trecho compartilhado com tráfego misto na DF-002, da ponte do Bragueto até a Rodoviária do Plano Piloto.

A Figura 17, a seguir, ilustra a divisão por subtrechos do Corredor Eixo Norte.

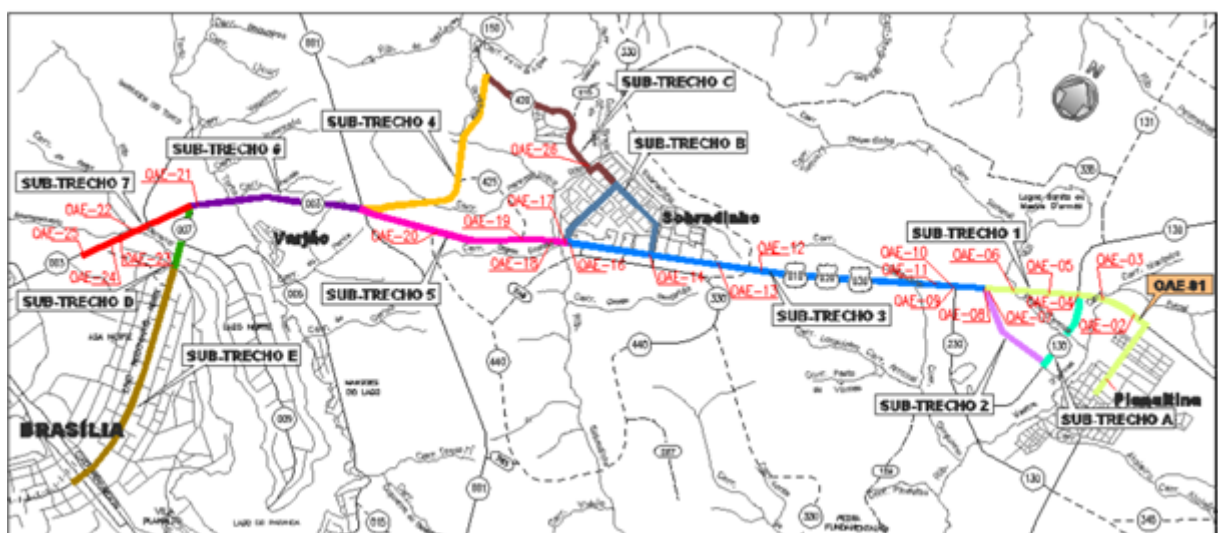


Figura 17: Subtrechos do Corredor Eixo Norte - BRT, DF – Brasília.

Fonte: Edital de Pré-Qualificação n° 001/2014, DER - DF (2013).

3.1.1 Projeto de Pavimentação

Em toda a extensão deste trabalho será considerado o dimensionamento proposto por MARTINS e FERREIRA(2014).

O Corredor Norte terá as faixas exclusivas executadas em pavimento rígido, respeitando a seguinte estrutura:

- Pavimento Rígido de Concreto de Cimento Portland, executado com equipamento de forma deslizante;
- Concreto Cimento Portland Rolado;
- Solo de Subleito.

A estrutura final de pavimentação é a representada na Tabela3, abaixo:

Tabela 3: Espessuras das placas de concreto

Região	Trecho	Espessura da Placa de Concreto, H (cm)
S1	B	22
S2	C1	20
S2	C2, 4	20
Pla	1a	22
MD	2 e A	20
Bg	D	24
S1-Pla	3, 1b	25
S2-S1	5	25
DF-S2	6	25
DF	7	24

Fonte: MARTINS e FERREIRA (2014).

3.2 Análise de Tráfego

Buscou-se avaliar o estudo de tráfego, porém os resultados apresentados no relatório alvo desta análise mecanicista não apresenta parâmetros suficientes para aferição dos cálculos

e, portanto os valores foram assumidos como corretos, bem como o dimensionamento da superestrutura obtido por MARTINS e FERREIRA (2014).

3.3 Análise Geotécnica

Os dados geotécnicos apresentados foram obtidos por MARTINS e FERREIRA(2014), no qual as mesmas realizaram análise mecânica do pavimento flexível do mesmo projeto. Ainda buscou dados relativos ao subleito do PROJETO DE PAVIMENTACAO (2013).

3.4 Análise Estrutural do Pavimento Rígido

De acordo com o projeto original, o tipo de pavimento rígido é não armado, sem acostamento, com barra de transferência, armadura distribuída e barra de ligação para controle de fissuras e formação das juntas. Para o seu dimensionamento, utilizou-se da metodologia da PCA (1984), de acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT, usual no Brasil.

Para o cálculo do pavimento, usou-se como ônibus tipo, o urbano articulado, com três eixos e os seguintes pesos por eixos:

- Eixo simples dianteiro = 6 tf;
- Eixo simples intermediário = 10 tf;
- Eixo simples traseiro = 10 tf.

Quanto ao concreto utilizado no dimensionamento, adotou-se aquele que possui módulo de ruptura à tração na flexão de 4,5 MPa, referente à idade de 28 dias.

A análise do dimensionamento se deu por trechos, onde realizou-se uma análise mecanicista das tensões de tração atuantes na parte inferior das placas de concreto, verificando se atende à tensão de tração que o concreto suporta (f_{cm}) e ao tráfego, de acordo com o dimensionamento proposto por MARTINS e FERREIRA (2014), tendo as barras de ligação diâmetro de 12,5cm, comprimento de 76cm e espaçamento de 92,53cm e as espessuras das placas de concreto apresentadas na Tabela 3.

3.5 Modelamento do Pavimento Rígido

Os dados utilizados no modelamento foram obtidos através da proposta apresentada por MARTINS e FERREIRA (2014), e através do PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO (2013). A sistemática na condução e inserção de dados, no software EverFe 2.25, seguiu os seguintes passos:

- determinação da geometria da placa, Figura 18;
- identificação das camadas inferiores a placa, Figura 19;
- aplicação do carregamento mecânico, Figura 20;
- definição das características das barras de transferência, Figura 21;
- geração da malha de elementos finitos, Figura 22;

A análise mecanicista será para uma placa de concreto com dimensões de 5,8x7,0m, com espessuras variadas conforme apresentado na proposta de MARTINS e FERREIRA (2014) . A base do projeto original é composta por uma camada de 10cm de brita graduada simples e 10cm de concreto rolado. A fim de uma proposta, a base será considerada composta apenas pela camada de concreto rolado. A Figura 18 mostra a alimentação do software com os dados considerados.



Figura 18: Aspecto da tela gráfica para inserção dos dados geométricos.

Fonte: Adaptado do Software EverFe 2.25.

Foi adotado a placa de concreto aderida a base que possui espessura de 10cm. O subleito foi definido com uma profundidade de 2m, já que o software não tem a opção de considerá-lo como semi-infinito.

Os dados geotécnicos foram retirados do PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO (2013) conforme apresentado na Tabela 4. A Figura 19 mostra a alimentação do software com os dados considerados.

Tabela 4: Densidade do subleito do projeto original

Trecho	Densidade (Kg/m³)
1	1383,71
2	1327,75
3	1415,82
5	1410,00
6	1362,00
7	1416,29
B	1395,90
C	1412,63

O valor do K é correlacionado ao CBR do subleito. Para este projeto foi adotado como sendo de 10% ao longo de todos os trechos. Logo, conseguiu-se um valor de $K=0,144\text{Mpa/mm}$.

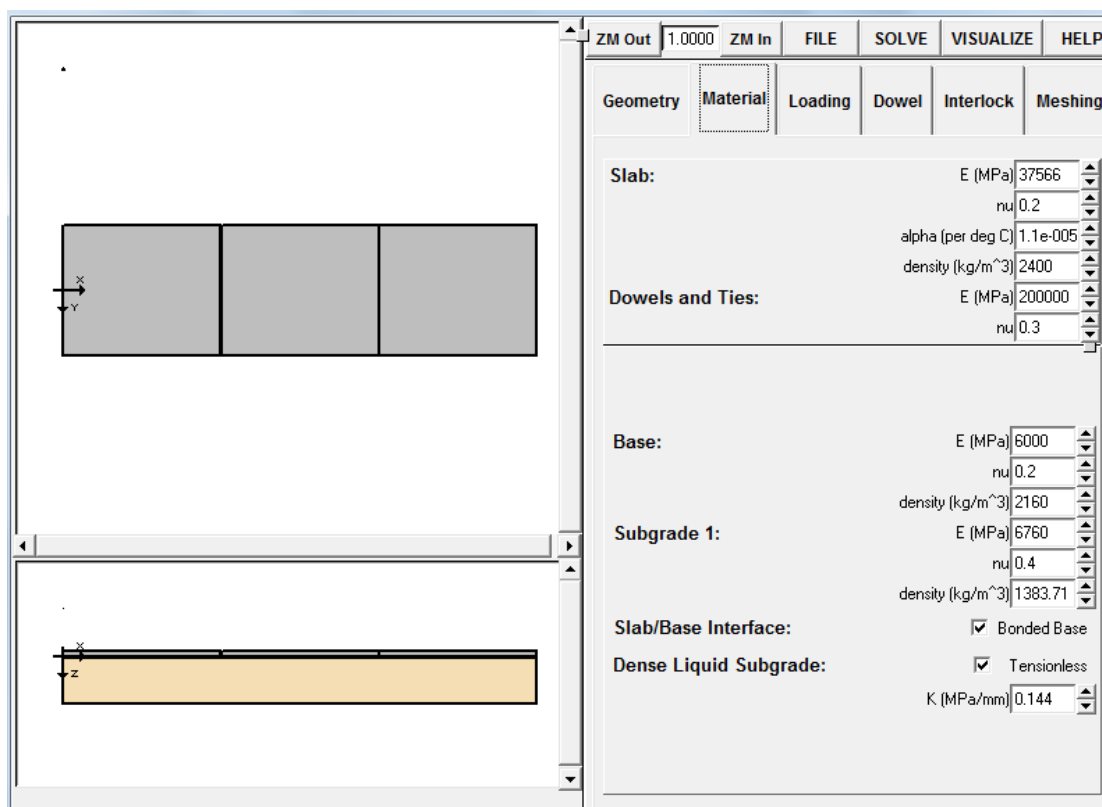


Figura 19: Aspecto da tela gráfica para inserção dos dados físicos do pavimento.

Fonte: Adaptado do Software EverFe 2.25.

Para o veículo tipo considerado no projeto do pavimento, o eixo mais carregado será o eixo simples de roda dupla (ESRD), que possui carregamento de 10tf. As dimensões do pneu foram calculadas pelas formulações apresentadas por RODRIGUES e PITTA (1998), com pressão de enchimento igual a 0,7 Mpa.

Serão considerados 3 hipóteses de carregamentos na placa, sendo:

- **CASO I:** carregamento no centro da placa de concreto;
- **CASO II:** carregamento próximo a junta entre placas;
- **CASO III:** carregamento no bordo livre da placa de concreto.

Os diferenciais térmicos não serão considerados nesta análise. A Figura 20 mostra a alimentação do software com os dados considerados.

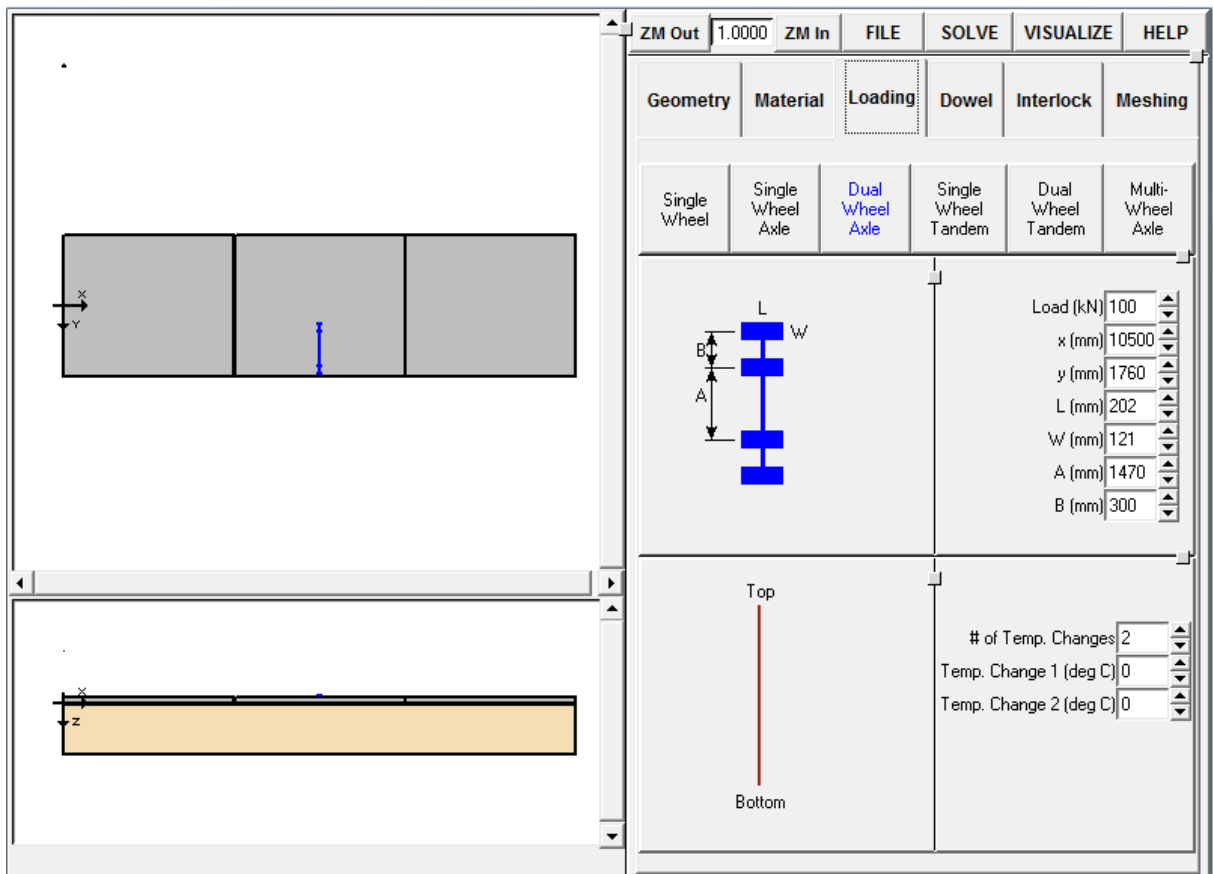


Figura 20: Aspecto da tela gráfica para inserção carregamento na placa.

Fonte: Adaptado do Software EverFe 2.25.

A barra de transferência será adotada conforme proposta por MARTINS e FERREIRA (2014). A Figura 21 mostra a alimentação do software com os dados considerados.

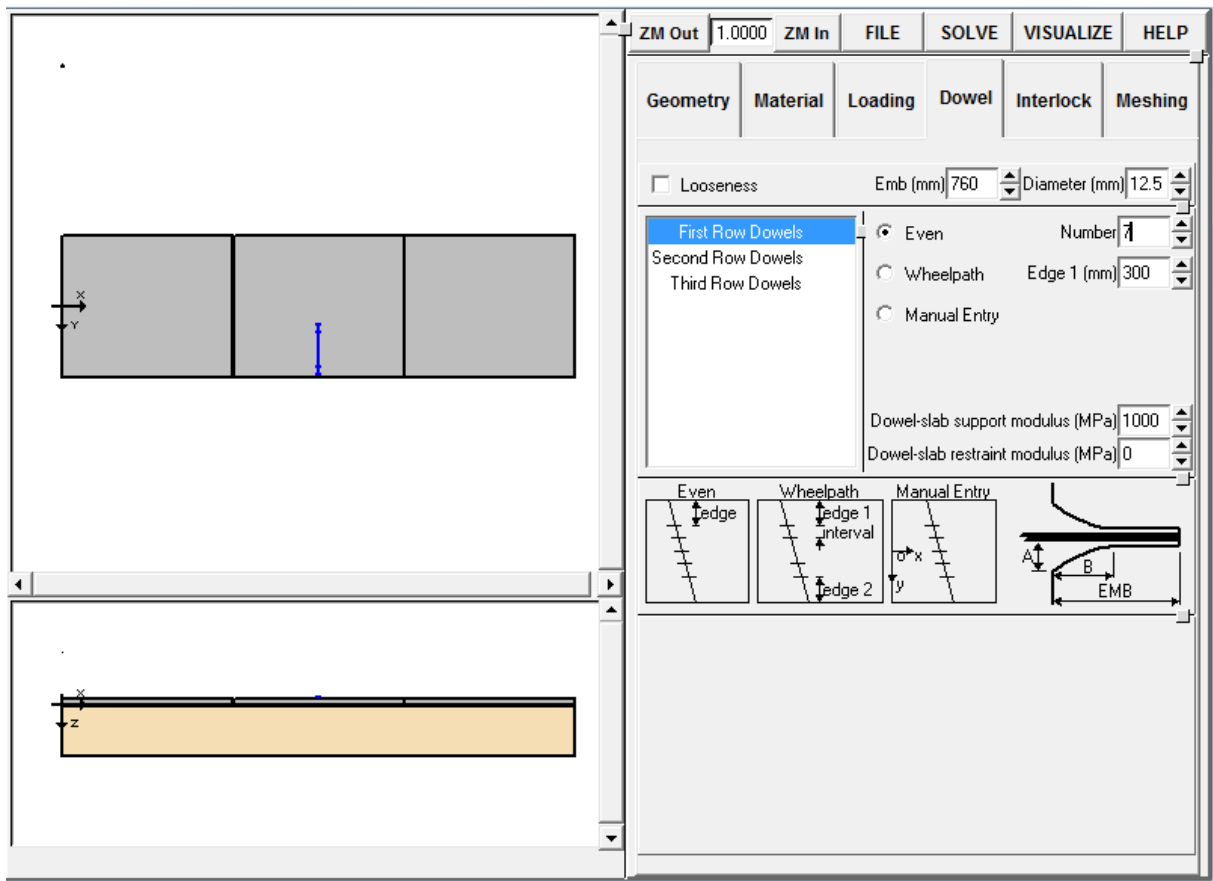


Figura 21: Aspecto da tela gráfica para inserção dos dados das barras de transferência.

Fonte: Adaptado do Software EverFe 2.25.

A figura 22 mostra a malha de elementos finitos ao longo da espessura e superfície, utilizada pelo software para os cálculos de tensão e deformação. O número de elementos na direção x para cada coluna e na direção y para cada linha, na placa, são especificados de forma independente.

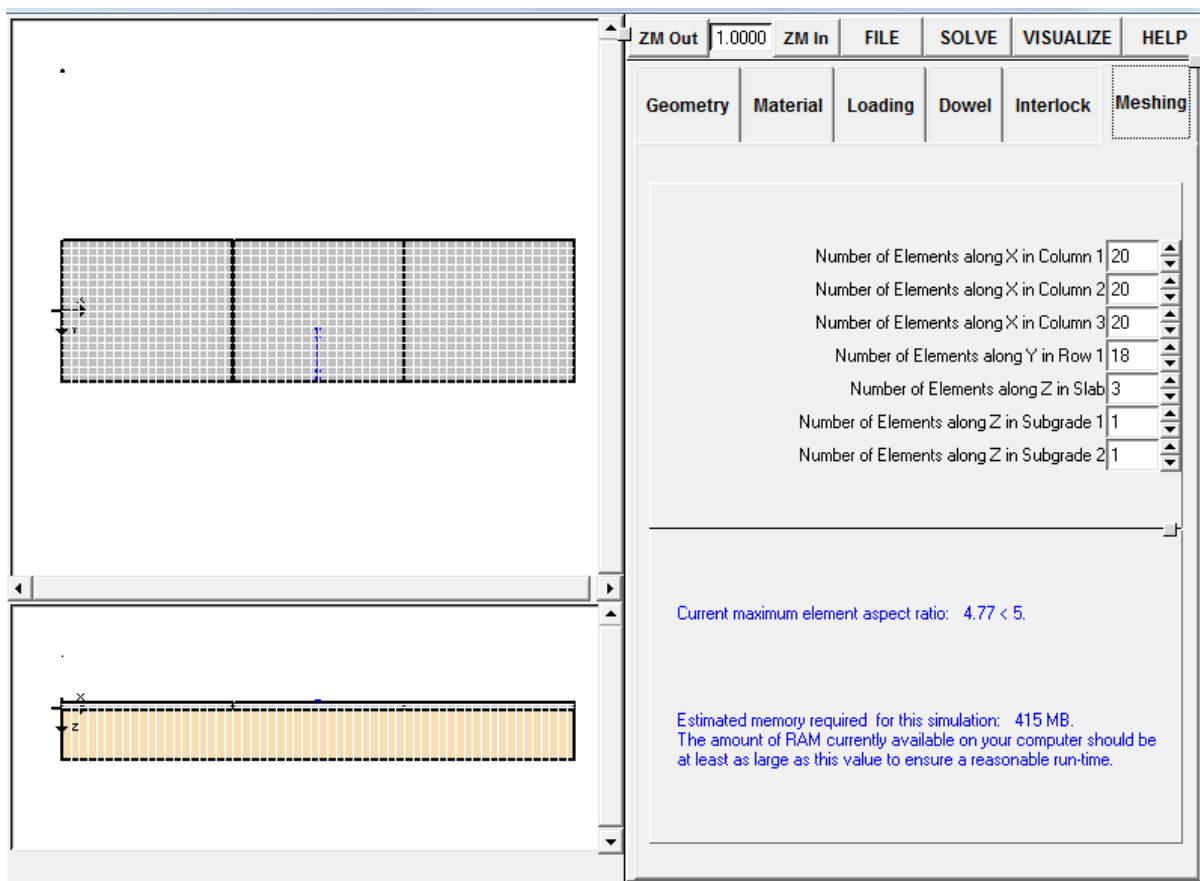


Figura 22: Aspecto da tela gráfica para definição da malha de elementos finitos.

Fonte: Adaptado do Software EverFe 2.25.

Foram analisados as máximas tensões obtidas na base da placa de concreto, devido ao carregamento do eixo mais carregado do veículo tipo adotado. As análises se deram para cada caso de carregamento e para cada trecho do BRT.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um dos danos mais notórios presentes no pavimento rígido ao longo de sua vida útil são trincas que surgem desde o fundo da laje ou a partir da superfície por fadiga. Essas fissuras se devem devido ao surgimento de tensões de tração críticas na laje em determinados locais do pavimento. A análise mecanicista proposta no presente trabalho teve como objetivo verificar se, de acordo com o dimensionamento proposto por MARTINS e FERREIRA (2014), as tensões de tração atuantes na parte inferior do concreto atendem à tensão máxima de tração que o concreto suporta (f_{ctm}), e também ao tráfego previsto, definido em função do número

equivalente de operações do eixo padrão rodoviário de 8,2tf durante o período de projeto (número N).

Os valores das tensões de tração atuantes na parte inferior das placas de concreto, considerando-se a espessura de cada trecho, foram obtidas a partir do software EverFe e comparados ao módulo de ruptura à tração na flexão de 4,5 MPa , de acordo com o projeto.

Para obtenção da tensão crítica em cada trecho, o eixo com maior carregamento, no caso, de 10 tf, foi posicionado nas posições mais solicitadas, ou seja, no bordo livre da placa, no centro da placa e tangenciando a junta, obtendo-se assim três valores de tensão para cada trecho, sendo a tensão crítica do trecho a maior dentre eles. Os resultados obtidos pelo programa EverFe são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Tensões máximas na base da placa de concreto

Região	Trecho	Espessura da Placa de Concreto, H (cm)	Tensões (MPa)		
			Caso I	Caso II	Caso III
S1	B	22	0,253	0,193	0,373
S2	C1	20	0,268	0,196	0,407
S2	C2, 4	20	0,268	0,196	0,407
Pla	1a	22	0,253	0,193	0,373
MD	2 e A	20	0,267	0,196	0,406
Bg	D	24	0,238	0,188	0,355
S1-Pla	3, 1b	25	0,232	0,188	0,347
S2-S1	5	25	0,231	0,185	0,346
DF-S2	6	25	0,231	0,185	0,346
DF	7	24	0,239	0,188	0,355

4.1 Análise de tráfego

Para verificação do número N, adotou-se a seguinte formulação, de acordo com ANGUAS (2004):

$$\text{Log (N)} = 2,81 \times \text{SR}^{-1,22} \quad (4.1)$$

em que:

$$\text{SR} = \frac{S}{\text{MR}} \quad (4.2)$$

sendo:

SR: Relação de esforços

s: Máxima tensão de tração encontrada na base da placa de concreto

MR: Módulo de ruptura que corresponde à resistência à tração na flexão (f_{ctm}).

Com os valores obtidos através do software EverFe 2.25, calculou-se o número N com a tensão obtida na base da placa. Os resultados para essa análise encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados para o Número N

Trecho	Máxima Tensão (MPa)	Numero N
B	0,373	$4,29 \times 10^{58}$
C1	0,407	$5,17 \times 10^{52}$
C2, 4	0,407	$5,17 \times 10^{52}$
1a	0,373	$4,29 \times 10^{58}$
2 e A	0,406	$7,44 \times 10^{52}$
D	0,355	$1,9 \times 10^{62}$
3, 1b	0,347	$1,09 \times 10^{64}$
5	0,346	$1,83 \times 10^{64}$
6	0,346	$1,83 \times 10^{64}$
7	0,355	$1,9 \times 10^{62}$

Os valores do número N, calculado através do método semi-empírico, é muito maior quando comparado ao especificado em projeto de acordo com MARTINS e FERREIRA (2014), ou seja, $N = 5 \times 10^7$.

O número N nos diz quantas repetições de carga padrão (8,2 tf) o pavimento irá receber ao longo de sua vida útil, ou seja, o período para o qual é projetado. Logo, elevados valores de N corresponderá a um pavimento capaz de suportar maiores carregamentos durante o período de projeto.

De acordo com MARTINS e FERREIRA (2014), considerando-se o refinamento do projeto, utilizou-se do número “N” recomendado pela IP-02 - Classificação das vias - da PMSP, Figura 23, como referência, tendo em vista que o tráfego considerado para a cidade de São Paulo é superior ao previsto para o Distrito Federal.

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto (anos)	Volume inicial faixa mais carregada		Equivalente Por veículo	N	N característico
			VEÍCULO LEVE	CAMINHÃO / ÔNIBUS			
Via local Residencial	LEVE	10	100 A 400	4 A 20	1,50	$2,70 \times 10^4$ A $1,40 \times 10^5$	10^5
Via coletora Secundária	MÉDIO	10	401 A 1500	21 A 100	1,50	$1,40 \times 10^5$ A $6,80 \times 10^5$	5×10^5
Via coletora principal	MEIO PESADO	10	1501 A 5000	101 A 300	2,30	$1,4 \times 10^6$ a $3,1 \times 10^6$	2×10^6
Via arterial	PESADO	12	5001 A 10000	301 A 1000	5,90	$1,0 \times 10^7$ a $3,3 \times 10^7$	2×10^7
Via arterial Principal/ expressa	MUITO PESADO	12	> 10000	1001 A 2000	5,90	$3,3 \times 10^7$ a $6,7 \times 10^7$	5×10^7
Faixa Exclusiva de Ônibus	VOLUME MÉDIO	12		< 500		$3 \times 10^{6(1)}$	10^7
	VOLUME PESADO	12		> 500		5×10^7	5×10^7

N = valor obtido com uma taxa de crescimento de 5% ao ano, durante o período de projeto.

Figura 23: Classificação das vias e parâmetros de tráfego.

Fonte: IP-02 - Classificação das vias - Instrução de Projeto da PMSP (2004).

Considerando-se a metodologia utilizada para análise mecanicista de tráfego, ou seja, a razão entre a tensão de tração na flexão produzida no pavimento pela passagem do carregamento e a resistência característica à tração na flexão do concreto, há um número limite de aplicações de carga, acima do qual o concreto romperá por efeito de fadiga.

Pelas análises mecanicistas feitas para o tráfego em cada trecho, notou-se que o número “N” resultou em um valor muito maior ao especificado em projeto. Com isso, pode-se concluir que o pavimento suportará um número de passadas do eixo padrão, maior do que referido ao período de projeto.

4.2 Análise estrutural

As maiores tensões, foram encontradas no caso III - carregamento no bordo livre da placa de concreto. A presença de barras de transferência dispostas nos demais bordos, faz com que as tensões nestas áreas sejam distribuídas entre as placas, fazendo com que as mesmas, comportem-se conjuntamente e colaborem com a resistência ao carregamento. Já no caso III, o bordo encontra-se livre, por isso, as maiores tensões são verificadas nesta região.

Em pavimentos rígidos, as tensões de tração na flexão produzidas pelo carregamento solicitante estão diretamente ligadas às espessuras da placa de concreto. A placa de concreto, quando submetida a ciclos reiterados de carregamento, pode sofrer ruptura após um certo número de repetições de cargas, ainda que a tensão máxima produzida seja inferior à resistência do material ao esforço. Pela análise de tensões em cada trecho apresentada na Tabela 5, o pavimento está submetido à tensões muito inferiores a que o concreto suportaria. Além disso, como já mencionado, pavimento suportará um número de passadas do eixo padrão, maior do que foi dimensionado, não ocorrendo ruptura por fadiga.

Pelo dimensionamento através da PCA 1984, calculado por MARTINS e FERREIRA (2014), foram definidas espessuras de placas entre 20 a 25cm. Através das análises realizadas pelo programa EverFe 2.25, pode-se constatar que o pavimento poderia ter menores espessuras que as calculada pelo método proposto.

Para fazer esse nível de refinamento nos dados, seria necessário a inclusão de diferenciais de temperatura na análise mecanicista, visto que, devido a esta variação de temperatura atuante entre a base e o topo da placa, gerariam tensões de tração e seriam acrescidas a base da placa de concreto. Estas tensões são significantes a nível de dimensionamento, e, para isso, é necessária a obtenção destes dados referentes a região em que será implantada o projeto.

5 CONCLUSÃO

A utilização de análises mecanicistas tem grandes vantagens sobre o método da PCA 1984, sendo as principais delas o uso de modelagem mais realista e possibilidade de consideração de efeito dos gradientes térmicos nas tensões, que podem ser significativamente maiores que aquelas encontradas quando da ação de cargas rodoviárias.

Na análise do estudo de previsão do tráfego estimado para o Corredor Eixo Norte segundo MARTINS e FERREIRA (2014), verificou-se que os dados encontram-se discrepantes para o período de projeto considerado, pois o pavimento suportaria um número muito maior de passadas do eixo padrão. Entretanto, de acordo com MARTINS e FERREIRA (2014), o projeto não deixou claro o período de tráfego adotado para o dimensionamento, sendo este parâmetro apenas uma estimativa.

De acordo com a IP-02 da Prefeitura Municipal de São Paulo, o valor do número de passadas do eixo padrão é bastante inferior ao verificado para cada trecho do dimensionamento proposto por MARTINS e FERREIRA (2014), tendo em vista que espera-se que a megametrópole de São Paulo apresente um tráfego maior.

As tensões de tração geradas na parte inferior da placa de concreto pela passagem do carregamento são muito inferiores à tensão de tração que o concreto suporta. Por este fato, e também pelo fato do pavimento suportar um tráfego maior do que referido ao período de projeto, conclui-se que não ocorrerá ruptura por fadiga, podendo seu dimensionamento ainda ser melhorado.

Maiores espessuras oneram os custos dos pavimentos, já que a pavimentação compreende em obras que, geralmente, tem grandes orçamentos, tornando inviáveis para muitos órgãos municipais ou até estaduais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Terminologia e Classificação de Pavimentação – NBR 7207, 1982.

ANDRADE, F. A. H. **Definición Moderna de los Parámetros para El Diseño de Pavimentos**. 2007. 241f. Trabajo de Averiguación Técnica (Licenciatura em Ingeniería Civil)- Escuela Politécnica Del Ejército, Sangolquí, 2007.

ANGUAS, P. G. **Conceptos Mecanicistas em Pavimentos**. 2004. 52f. Publicación Técnica N° 258 (Secretaría de Comunicaciones Y Transportes) – Instituto Mexicano Del Transporte, Sanfandila, 2004.

BALBO J. T. **Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples**. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2004.

BALBO, J.T.**Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. Oficina de texto, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008. 504 p.

BERTI, C. **Dispositivos de retorno em Rodovias- Estudos de Pavimentação**. 2009. 114f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)- Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2009.

BEZERRA NETO, R. S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

BRANCO, S.P. V. M. **Estudo e aplicação de sistemas BRT- Bus Rapid Transit**. 2013. 148f. Dissertação (Mestranda em Engenharia Civil)- Departamento de Engenharia Civil- Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2013.

CASTRO, C. F. C. **Avaliação de fatores intervenientes nas emissões veiculares em corredores de ônibus**. 2008. 164p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CAUDURO, F. e PELISSER, F. **Estudo da Retração Autógena em Pasta de Cimento Portland com Adição de Resíduo do Polimento do Porcelanato**. 2012. 11f. Artigo (Bacharelado em Engenharia Civil)- Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2012.

DAVIDS, B. **EverFE Theory Manual**. 2003. University of Maine. EverFe version 2.23.

DNIT (2005).**Manual de Pavimentos Rígidos. Publicação IPR-714**. Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes, Rio de Janeiro.

DNIT (2006)a.**Manual de Estudos de Tráfego. Publicação IPR-723**. Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes, Rio de Janeiro, 2006 [a].

DNIT (2006)b.**Manual de Pavimentação. Publicação IPR-719**. Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes, Rio de Janeiro, 2006 [b].

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPsv**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GRECO, J. A. S. Notas de Aula – Conceitos Básicos sobre Pavimentação. UFMG, 2010.

GLOBAL BRT DATA- Disponível em: < <http://www.brtdata.org> >. Acesso em 20 de agosto de 2014.

GONDIM, Y. C. **Dimensionamento de pavimentos de concreto utilizando o programa computacional KENSLABS 2004 e comparação com o método da PCA 1984**. 2008. 281 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

HORONJEFF, Robert. *Planning and Design of Airports*. 1ed. New York. USAID, 1966.

HUANG, Y. H. **Pavements Analysis and Design**. 2ed, Prentice Hall, New Jersey, E.U.A. 2004.

MARQUES, Prof. Geraldo Luciano de Oliveira. **Dimensionamento de Pavimentos – Método do DNER**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia – Departamento de Transportes e Geotecnia – TRN 032 – Pavimentação – UFJF, notas de aula, 2004.

MARTINS, J. A. P; FERREIRA, M. A. **Análise crítica do projeto de pavimentação, referente ao corredor Eixo Norte, para implantação do BRT no Distrito Federal**. 2014. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)- Campus Alto Paraopeba, Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, 2014.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed. 574p. Rio de Janeiro, 2005.

NUNES, N.L.; FIGUEIREDO, A.D. **Retração do Concreto de Cimento Portland**. Boletim Técnico. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007. 59 p.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto**, 2000. 218f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2000.

PITTA, M. R. **Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto pelo Método PCA (1984)**. ET-97, 3ª edição, publicação Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1998.

PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO - Volume 1, Tomo 2 - Projetos e Documentos para Concorrência BRT - Corredor Eixo Norte, 2013.

QUIRINO, M. E. P. **Recuperação de pavimentos flexíveis em áreas de taxiamento de aeronaves – Um estudo de caso da pista fox-2 do Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG.** Monografia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

RAIA, F. **Estudo Experimental dos Efeitos da Temperatura em Pavimento de Concreto Instrumentado.** 2010 253f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RHEINHEIMER, V. **Utilização de Ensaio Não Destrutivos no Controle Tecnológico de Execução de Pavimentos de Concreto Tipo Fast Track.** 2007. 266f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

RODRIGUES, P. P. F; PITTA, M. R.. **Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Estruturalmente Armados.** São Paulo, ABCP, 1998.

SIDDIQUE, Z.;HOUSSAIN, M.; MEGGERS, D. **Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavement.** In: Transportation Reserch Synposium. Ames, Iowa. 2005.