

DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO MECANICISTA PARA PAVIMENTO RIGIDO EMPREGADO EM PARADAS DE ÔNIBUS

DIMENSIONING AND MECHANICAL VERIFICATION FOR RIGID FLOORING USED IN BUS STOPS

SILVA, Claudioni Francisco da ¹

RESUMO

A implantação de um corredor metropolitano de ônibus exige elementos que potencializam a malha urbana. Alguns dos benefícios esperados com a implantação de corredores de ônibus são: eficiência, qualidade, segurança, maior velocidade operacional, ampliação da acessibilidade e mobilidade, requalificação urbana das áreas do entorno.

O presente estudo tem por objetivo apresentar de maneira sucinta a implantação de paradas de ônibus em pavimento rígido de Concreto de Cimento Portland (CCP).

Estas regiões caracterizam-se por receber esforços de cargas estáticas, devido aos veículos que se mantêm estacionados e frequentes esforços horizontais de frenagem e aceleração devido às manobras executadas pelos ônibus, além de derrames de derivados de petróleo, tornando os pavimentos asfálticos impróprios para esta situação. Sera abordado também neste texto que é de grande relevancia a caracterização geometrica das placas de CCP , bem como elementos de transição horizontal, transversal e padrao de guia PMSP para a concepção destas paradas de ônibus.

Palavras-chave: Dimensionamento; Mecanicista; Normas.

ABSTRACT

The implementation of a metropolitan bus corridor requires elements that enhance the urban network. Some of the benefits expected from the implementation of bus corridors are: efficiency, quality, safety, increased operational speed, increased accessibility and mobility, urban upgrading of surrounding areas. The present study has the objective of presenting succinctly the implantation of bus stops on rigid Portland cement concrete pavement (CCP). These regions are characterized by the efforts of static loads, due to the vehicles that remain stationed and frequent horizontal braking and acceleration efforts due to the maneuvers executed by the buses, in addition to spills of petroleum products, making the asphaltic pavements unsuitable for this situation . It will also be approached in this text that it is of great relevance the geometric characterization of the CCP plates, as well as elements of horizontal, transverse transition and standard of PMSP guide for the design of these bus stops.

Keywords: Scaling; Mechanicist; standards

¹Graduado em Engenharia Civil Universidade Paulista-SP, claudioni.engenharia@gmail.com

RESUMEN

La implementación de un bus corredor metropolitano requiere elementos que mejoran el tejido urbano. Algunos de los beneficios esperados de la implementación de los carriles bus son: la eficiencia, la calidad, la seguridad, la mayor velocidad de funcionamiento, la expansión de la accesibilidad y la movilidad, la regeneración urbana de las áreas circundantes. Este estudio tiene como objetivo presentar brevemente la aplicación de las paradas de autobús en el pavimento duro de hormigón de cemento Portland (PCC). Estas regiones se caracterizan por la recepción de los esfuerzos de las cargas estáticas debidas a los vehículos aparcados y permanecen fuerzas horizontales frecuentes de frenado y aceleración debida a las operaciones llevadas a cabo por autobús, y productos de petróleo derrames, haciéndolos no aptos para pavimentos asfálticos esta situación . También se tratarán en este texto que es de gran importancia la caracterización geométrica de las placas de CCP y elementos de transición horizontales, MGSP cruz de guía y norma para el diseño de estas paradas de autobús.

Palabras-clave: Dimensionamiento; Mecanicista; Normas.

INTRODUÇÃO

O Brasil foi um dos primeiros países a utilizar o pavimento de concreto já no início do século XX. Seu uso foi intensificado até a década de 1970, diminuindo a partir daí por problemas de conjuntura econômica e financeira. Nos anos 90, o produto voltou a ser utilizado por garantir durabilidade e economia às gestões públicas. O que mudou nos últimos anos é a forma de execução da pavimentação, que adotou modernas técnicas que garantem excelência em conforto de rolamento, como se vê em outros países.

Esta escolha se confirma, uma vez que os índices operacionais e de confiabilidade do sistema vêm cumprindo adequadamente as funções para as quais foram projetadas, atingindo todas as metas de desempenho esperadas ao longo dos anos.

Especialistas apontam que o tempo mínimo para manutenção corretiva em um pavimento de concreto é em torno de 20 anos comparados aos seis anos de vida útil do pavimento flexível. A escolha pelo tipo de pavimento de concreto também é impulsionada por conta das concessões à iniciativa privada dos corredores de ônibus e estradas, que, com a adoção do pavimento de concreto, acabam por tornar o empreendimento economicamente mais viável.

METODOS

Para o dimensionamento do pavimento rígido, serão utilizada a metodologia da PCA “Portland Cement Association”, versão 1984, compilada no ET-97 “Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto pelo Método da PCA/1984” da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

A análise mecanicista sera por meio do softwar de elementos finitos EverFE 2.24

De acordo com Batezini al.(2013, p. 109)

O EverFE é um programa de análise 3D por elemento finitos utilizado para simulação de carregamentos e cálculo das tensões e deformações de sistemas de placas de concreto submetido ao carregamento por eixos de veículos quanto por variações climáticas.

DESENVOLVIMENTO

O presente estudo tem por objetivo analisar uma implantação de parada de ônibus com faixa exclusiva para ônibus. De acordo com a experiência do projetista a disposição geométrica das placas de CCP devem seguir o seguinte critério, adotar no mínimo 27 metros de pavimento em CCP, 5 placas de 5 metros cada e mais 2 metros de transição longitudinal. Devido aos esforços de frenagem ocasionada pela chegada do ônibus na parada e adotar 17 metros para a partida, 3 placas de 5 metros e mais 2 metros para transição longitudinal. A Figura 1 nos mostra estas disposições.

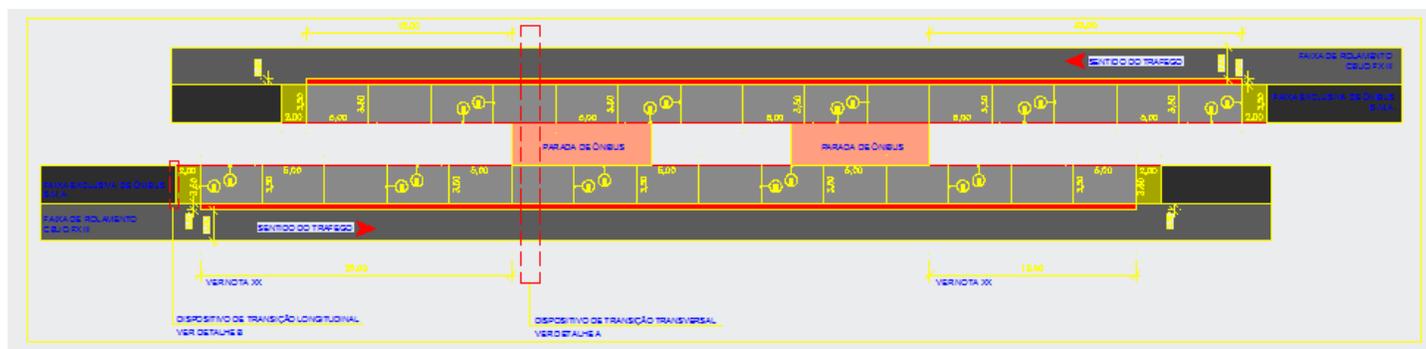


Figura 1 - Disposição das Placas



DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CCP

Parâmetros de Projeto

Período de Projeto

Para dimensionamento do pavimento de concreto foi considerado período de projeto igual a 20 anos.

Módulo de Reação

Segundo o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), para o dimensionamento da espessura do PRCS, o parâmetro relativo ao suporte do subleito é o Módulo de Reação (k), também denominado de Coeficiente de Recalque ou Módulo de Westergaard (a denominação correta é módulo de reação, de acordo com Balbo (2003), ao invés de coeficiente de recalque, como é chamado pelo DNIT). Este parâmetro é determinado em uma Prova de Carga Estática, conforme a norma DNIT 055/2004 – ME, onde são correlacionadas as pressões verticais transmitidas ao subleito por meio de uma placa rígida (com 76 cm de diâmetro, pelo menos) e os deslocamentos verticais correspondentes. De acordo com a norma DNIT 055/2004 – ME, o módulo de reação (k) é calculado pela equação 1:

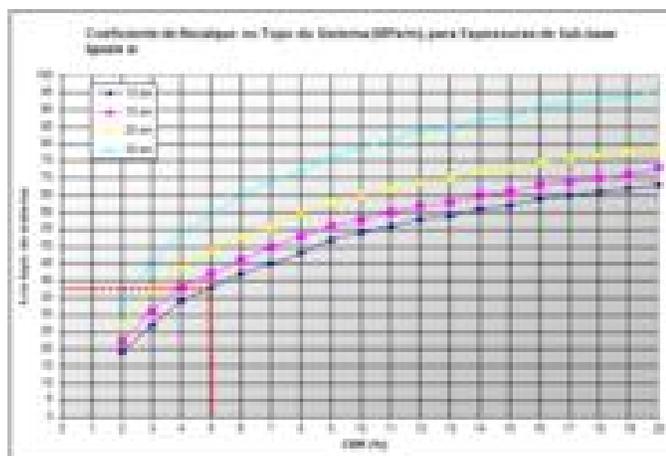
$$k = \frac{P}{w} \quad (1)$$

Onde:

em que P é pressão transmitida à fundação (subleito ou sub-base) e W é o deslocamento vertical da área carregada. Westergaard (1926)

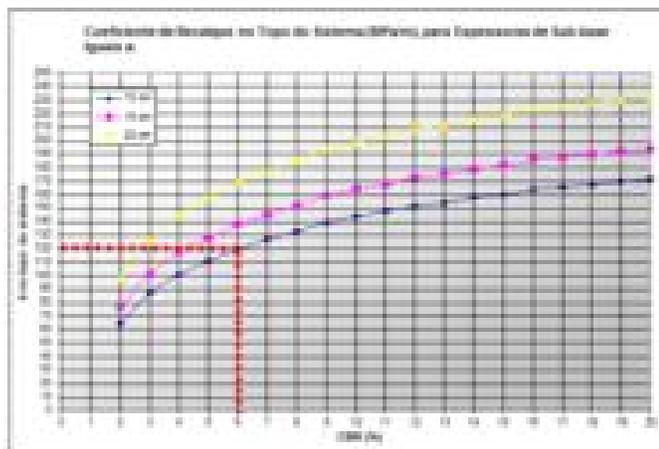
Para o presente estudo, adotando-se $CBR_p \geq 5\%$ para o subleito, obtém-se, no topo do subleito, “ k ” da ordem de 34 MPa/m. Com a introdução da camada de sub-base de material granular com espessura total de 10,0 cm e base em Concreto Compactado à Rolo com espessura de 10,0 cm, obtém-se novo coeficiente de recalque na ordem de 120 MPa/m.

Sub-base Granular		Coeficiente de Recalque no Topo do Sistema (MPa/m), para Espessuras de Sub-base Iguais a			
Valores de Suporte do Subleito	k (MPa/m)	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm
2	16	19	22	27	33
3	24	27	31	37	45
4	30	34	38	44	54
5	34	38	42	49	59
6	39	42	46	53	65
7	41	45	50	56	69



Sub-base de Concreto Rolado

Valores de Suporte do Subleito		Coeficiente de Recalque no Topo do Sistema (MPa/m), para Espessuras de Sub-base Iguais a		
CBR (%)	k (MPa/m)	10 cm	15 cm	20 cm
2	16	65	77	98
3	24	87	101	126
4	30	101	118	145
5	34	111	128	158
6	38	120	138	169
7	41	127	145	177



Características do Concreto

O Concreto de Cimento Portland que será empregado na implantação do pavimento deverá atender aos mesmos requisitos considerados para o dimensionamento da estrutura do pavimento. Na tabela 01 a seguir são apresentados os requisitos mínimos de resistência adotados para o dimensionamento, da Placa em Concreto de Cimento *Portland* e base em Concreto Compactado à Rolo:

Tabela 01 - Requisitos Mínimos de Resistência para o Concreto

Camada	Descrição	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência de tração na Flexão aos 28 dias $f_{ct,M,k}$ (MPa)
Placa	Concreto de Cimento Portland	28.000	4,5
Base	Concreto Compactado à Rolo	15.000	1,5

O concreto deve ainda apresentar desempenho satisfatório quanto à trabalhabilidade, que deve ser função do método construtivo, à impermeabilidade, à durabilidade e à resistência à abrasão.

De acordo com Método da PCA/1984

O dimensionamento do pavimento de concreto de cimento *Portland* para as paradas de ônibus, segundo método da PCA/1984, aplica-se a pavimentos de concreto simples com juntas, e barras de transferência e em pavimentos de concreto continuamente armado, onde a armadura não apresenta função estrutural.

O cálculo da espessura da placa é função do comportamento desta com relação à ruína por erosão ou por fadiga. A metodologia de cálculo e os conceitos utilizados no dimensionamento são apresentados no Estudo Técnico da ABCP ET-97 – Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto Pelo Método da PCA/1984.

O método é baseado no cálculo do consumo da resistência à fadiga da placa de concreto de cimento Portland e consumo da resistência à erosão do sistema de apoio que ocasionaria o escalonamento entre as placas.

O fator de erosão foi introduzido ao método proposto em 1984, pois os danos causados devido à erosão não poderiam ser previstos nem medidos pelo modelo de fadiga.

Os efeitos da erosão se manifestam sob a forma de deformações verticais, principalmente nos cantos e nas bordas longitudinais livres, bombeamento de finos do subleito sob ação de cargas, erosão do solo da fundação e consequente descalçamento da placa, o que pode conduzir o pavimento à ruína precocemente.

Para o dimensionamento da estrutura de pavimento de CCP pelo critério da PCA/84 foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Fator de segurança de cargas igual a 1,2;
- Confinamento lateral e em meio-fio;
- Pavimento sem acostamentos de concreto;
- Juntas transversais com barras de transferência.

Na Tabela 1 a seguir apresenta-se a memória de cálculo do dimensionamento para estrutura com placa de concreto de cimento Portland com espessura de 22 cm.

Tabela 1 - Resultados do Dimensionamento pelo Método da PCA

Projeto:	Parada de ônibus
Espessura:	<u>22</u> cm
K _{SISTEMA} :	<u>120</u> MPa/m
Resistência Caract. à tração na flexão, f _{ct} Mk:	<u>4,5</u> MPa
Juntas com BT:	sim <u>X</u> não _____
Acostamento de concreto:	sim _____ não <u>X</u>
Período de projeto:	<u>20</u> anos
Fator de segurança de cargas	F _{sc} : <u>1,2</u>

Cargas por eixo (t)	Cargas por eixo x FSC	Número de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSAO	
			Número de repetições admissíveis	Consumo de fadiga (%)	Número de repetições admissíveis	Danos por erosão
1	2	3	4	5	6	7

EIXO SIMPLES	8 - Tensão equivalente:	<u>1,29</u>
	9 - fator de fadiga	<u>0,286</u>
	10 - fator de erosão:	<u>2,68</u>

			fadiga		erosão	
3	3,60	1.773.606	ilimitado	-	ilimitado	-
6	7,20	7.094.426	ilimitado	-	ilimitado	-
5	6,00	1.773.606	ilimitado	-	ilimitado	-
10	12,00	7.094.426	ilimitado	-	8.000.000	88,7%

TOTAL	0,0%	TOTAL	88,7%
--------------	-------------	--------------	--------------

Dessa forma, adotou-se estrutura com placa de CCP na espessura de 22 cm, uma vez que ao fim da vida útil o dano por erosão previsto é de 88,7%, atendendo ao período de projeto e parâmetros adotados.

Verificação Mecanicista

Para a complementação do estudo, foi realizada a verificação mecanicista da estrutura do pavimento rígido empregando-se modelagem por elementos finitos, com auxílio do programa EverFE 2.24, que foi desenvolvido pelas Universidades de *Maine* e *Washington*, ambas dos EUA. As dimensões das placas seguiram o comprimento de 5,00 m e a largura de 3,50 m, em conformidade com o sentido do tráfego e projeto geométrico. O carregamento estabelecido para análise simula um ônibus articulado, classe 2B1, sendo composto por um Eixo Simples de Roda Simples e dois Eixos Simples de Roda Dupla (ESRD), distantes 2,40 m, com carregamento de 110 kN, situação mais crítica com 5% acima da carga máxima legal. O diferencial térmico utilizado foi de 12° C, conforme recomendado na IP-07/2004 da PMSP, com seu eixo de projeto (ESRD) posicionado em meia distância da placa de CCP e próximo à borda livre da placa, situação em que ocasiona maiores tensões na fibra inferior da placa de CCP, que retrata a condição crítica de análise.

De acordo com Balbo al. *Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples* (p. 17)

Como se referiu, o método da PCA (1984) sutilmente abandonou esta questão. O método da AASHTO (1986), embora não de modo explícito, considera tal questão por tratar-se de um modelo de desempenho, [...] programas de elementos finitos para a análise numérica de estruturas de pavimentos: ILLI 2000 (2D), EVERFE (3D), dentre outros. Todos eles permitem a consideração explícita dos gradientes térmicos em placas de concreto, dentre outras inúmeras facilidades de simulação.

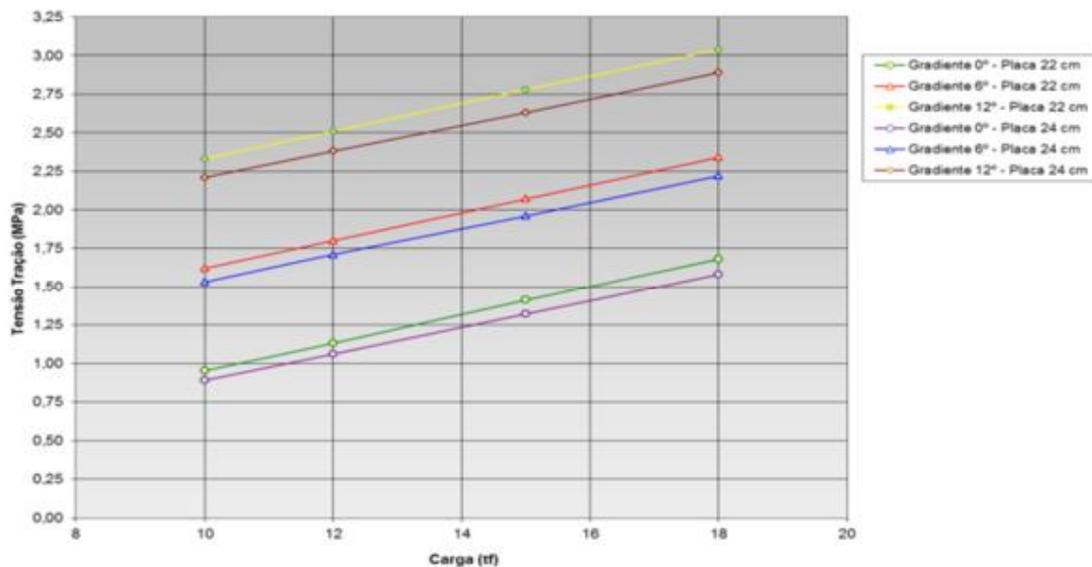


Gráfico de tensões x gradiente termico

Na Figura 2, apresentam-se os resultados da análise efetuada, ilustrando o diagrama de tensões atuantes, tendo como referência a fibra inferior na placa de Concreto de Cimento *Portland*, região mais crítica para os esforços estudados. Os dados de entrada utilizados no programa EverFE 2.24, são apresentados no Anexo A.

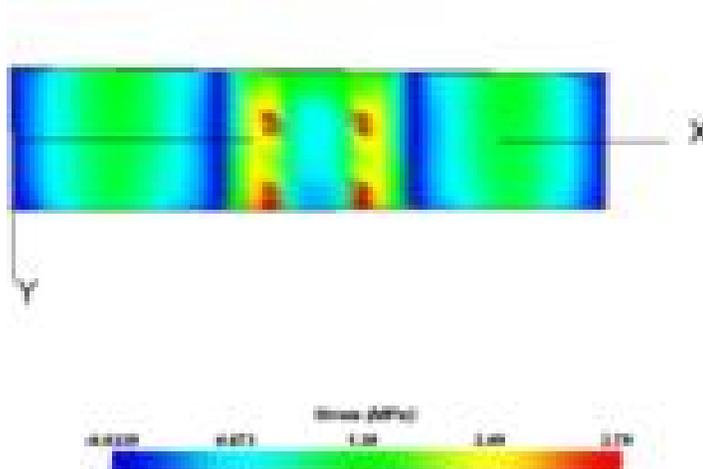
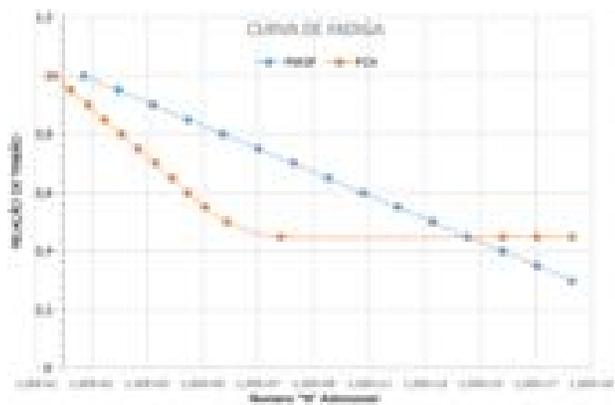


Figura 2 - Diagrama de Tensões na Fibra Inferior da Placa em CCP

De acordo com manual DNIT (2005)

As tensões de tração por flexão considerada no cálculo, são as produzidas pela carga tangente á borda longitudinal; a curva de fadiga alcança valores abaixo da relação de tensões limites de 0,50 o que elimina [...] a lei de Miner, do dano acumulado por fadiga é usada no metodo, estando a curva de fadiga implicita nos ábacos de dimensionamento[...]



Na Tabela 2, são apresentados os resultados obtidos para o parâmetro de tensão avaliado na fibra inferior da Placa de Concreto, apresentando os valores atuantes e admissíveis.

Tabela 2 - Resultados Obtidos Avaliação Mecanicista

Camada	Atuante	Admissível	Parâmetro
CCP	2,79	3,34	Tensão de Tração fctM,k (MPa)

Através da avaliação mecanicista, como verificou-se que a tensão atuante é inferior a tensão admissível, conclui-se que a estrutura proposta atende às solicitações previstas no projeto. Deste modo, conforme os resultados obtidos através do dimensionamento realizado pela PCA/84 e também pela avaliação mecanicista empregada propõe-se a estrutura apresentada na Tabela 3, para as paradas de ônibus.

Tabela 3 - Estrutura Proposta do Pavimento Rígido

Camada	Espessura (cm)
Placa de Concreto de Cimento Portland (fct,M,k ≥ 4,5 MPa)	22,0
Concreto Compactado à Rolo (fct,f ≥ 1,5 MPa)	10,0
Brita Graduada Simples - Faixa I	10,0
Melhoria do Subleito (CBR ≥ 5%)	-

Detalhamento das Placas, Juntas, Armaduras e Barras.

Geometria das Placas e Juntas Transversais

Os pavimentos de concreto estão sujeitos ao aparecimento de fissuras transversais e longitudinais, provocadas pelas variações volumétricas do concreto, principalmente durante a cura, e pela combinação do empenamento e dos esforços solicitantes gerados pela ação do tráfego e efeitos climáticos.

Tais fissurações precisam ser controladas, devendo evitar sua progressão ao longo dos anos, o que ocasionaria efeitos danosos à estrutura do pavimento. O controle é executado lançando-se mão de dois dispositivos:

- Armadura Distribuída: No caso de placas com geometria irregular, recomenda-se a utilização de armadura distribuída, com a finalidade de manter fortemente unidas as faces das fissuras.
- Fissura Induzida: Emprego de seções artificialmente enfraquecidas, induzindo a ocorrência de fissuras;

As juntas transversais entre as placas deverão obedecer um espaçamento de 3,5 m, atendendo a IP-07 da PMSP/SIURB, onde recomenda que a dimensão longitudinal das placas não deve ultrapassar 5,50 m de comprimento.

Na execução da paginação definida das juntas, pede-se que sejam evitados cantos com ângulos agudos, os quais certamente sofrerão quebras e falências estruturais precoces do pavimento, devendo sempre manter as juntas perpendiculares aos encontros.

Verifica-se que no presente projeto, não há ocorrências de placas com configurações irregulares, portanto, não há necessidade de adoção de armadura distribuída.

Barras de Transferência

Para as juntas transversais de retração, foram previstas barras de transferência, sendo que estas possuirão a função de permitir determinada transferência de carga entre duas placas consecutivas. Seu dimensionamento obedece ao mesmo tempo a estudos teóricos e a experiências específicas sobre seu comportamento sob a ação de cargas repetidas.

Sua definição fica a cargo do conhecimento da espessura das placas de concreto consecutivas, cujas bitolas, comprimentos e espaçamentos são fornecidos pela IP-07 da PMSP/SIURB e indicados na Tabela 4 a seguir. A norma também recomenda a utilização de Aço CA-25.

Tabela 4 - Dimensões Barras de Transferência

Espessura da Placa (mm)	Diâmetro da Barra (mm)	Comprimento (mm)	Espaçamento (mm)
< 200	20	400	300
200 – 250	25	460	300
> 250	32	460	300

Valores adotados para o projeto:

- Aço: CA-25;
- Diâmetro: \varnothing 25 mm;
- Comprimento: 46 cm;
- Espaçamento entre barras: 30 cm.

SOLUÇÃO PROPOSTA

Apresenta-se a seguir as estruturas de pavimento propostas.

Tabela 5 - Estrutura Proposta para o Pavimento Rígido

Camada	Espessura (cm)
Placa em Concreto de Cimento Portland (fctM, $K \geq 4,5$ MPa)	22,0
Concreto Compactado à Rolo (fct, $f \geq 1,5$ MPa)	10,0
Brita Graduada Simples – Faixa I	10,0
Melhoria do Subleito (CBR $\geq 5\%$) Compactação 100% Proctor - E.N.	-

A seguir estão apresentadas as deflexões esperadas no topo de cada camada para cada uma das estruturas propostas.

Tabela 06 - Estrutura Proposta para o Pavimento Rígido

Camada	Espessura (cm)	Deflexão ($\times 10^{-2}$ mm)
Placa em Concreto de Cimento Portland (fctM, $K \geq 4,5$ MPa)	22,0	-
Concreto Compactado à Rolo (fct, $f \geq 1,5$ MPa)	10,0	72
Brita Graduada Simples – Faixa I	10,0	135
Melhoria do Subleito (CBR $\geq 5\%$) Compactação 100% Proctor - E.N.	-	140

A implantação de corredores de ônibus em vias asfálticas já existentes impõe uma série de cuidados técnicos por conta da diferença de rigidez entre as estruturas de concreto e de asfalto, regiões estas sugestivas a patologias (degraus, infiltrações, fissuras etc). Para evitar tais patologias propõem uma transição transversal como mostra detalhe abaixo Figura 3.

Transição transversal: como mostra figura abaixo é recomendável um prolongamento do CCR e logo acima uma camada de BGTC, sem a necessidade de barra de transferência, dado que não há ação do tráfego sobre esta.

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O dimensionamento do pavimento foi verificado através de análise mecanicista baseada no método dos elementos finitos (MEF).

Para que esta análise tenha validade, faz-se necessário que os materiais utilizados na execução dos pavimentos apresentem os parâmetros elásticos coerentes com os que foram apresentados neste relatório.

Portanto, recomenda-se o controle da qualidade da execução das camadas do pavimento através do levantamento das deformações verticais recuperáveis (deflexões) no topo de cada camada executada, com a utilização da Viga Benkelman.

Caso seja de interesse a utilização do FWD, deve-se determinar, no local, a correlação com as leituras da Viga Benkelman para cada camada do pavimento.

Ressalta-se que com a utilização deste procedimento, torna-se possível detectar eventuais defeitos na execução a tempo de se tomar as medidas corretivas necessárias antes da liberação da rodovia ao tráfego, garantindo-se assim que a mesma apresente o desempenho esperado ao longo do período de projeto.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE MATERIAIS E SERVIÇOS

A execução dos serviços deverá seguir rigorosamente as Instruções de Execução de Serviços e de Materiais da PMSP/SIURB e DER/SP a seguir discriminadas, sem as quais este dimensionamento não terá validade.

Designação	Especificação	Ano
Pavimento de Concreto de Cimento <i>Portland</i>	DER/SP ET-DE-P00/039	2007
Concreto Compactado à Rolo	DER/SP ET-DE-P00/044	2006
Brita Graduada Simples	PMSP/SIURB ESP-06	1992
Melhoria e Preparo do Subleito	PMSP/SIURB IE-01	2004

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBO, José Tadeu. *Pavimentos de Concreto*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472p.

BALBO, José Tadeu. Análise crítica dos métodos para dimensionamento estrutural de pavimentos de concreto simples. *Anais do V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*. São Paulo: 2003. 20p.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. *Manual de Pavimentos Rígidos*. 2ed. Rio de Janeiro: IPR. Publ., 714, 2005. 234p.

PCA, Portland Cement Association. *Thickness design for concrete highway and street pavements*. Portland Cement Association, EB 109.01P, Skokie, 1984.

Batezini Rafael, Estudo Preliminar de Concretos Permeáveis como Revestimento de Pavimento para Áreas de Veículos Leves 2013. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte – Infraestrutura de Transporte) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Associação Brasileira de Cimento Portland, Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto Pelo Método da PCA/1984.

ANEXO A – DADOS DE ENTRADA EverFE 2.24

