

# Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do Rodoanel da Região Metropolitana de BH

## DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

### Resumo

Este documento contém os Dimensionamentos do Pavimento para o trecho menos carregado, aqui denominado Norte 2, do Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do Rodoanel da Região Metropolitana de Belo Horizonte, a ser desenvolvido pela Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade do Governo do Estado de Minas Gerais, em parceria com o Movimento Brasil Competitivo e a Accenture.

Agosto, 2020

## **ÍNDICE**

1.	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO - INTRODUÇÃO .....	2
1.1.	Parâmetros de Tráfego .....	3
1.2.	Projeção do Volume Médio Diário Anual (VMDA) .....	4
1.3.	Classificação e Carregamento da Frota .....	4
1.4.	Cálculo Número “N” .....	6
2.	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS .....	7
2.1.	Caracterização do Suporte do Subleito .....	7
3.	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO .....	8
3.1.	Método do CBR .....	8
3.2.	Método Mecânico .....	10
3.2.1	Análise de Fadiga dos Materiais .....	10
3.3.	Estrutura Final .....	13
4.	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CONCRETO (PRAÇA DE PEDÁGIO) .....	14
4.1.	Metodologia AASHTO-1993 .....	14
4.1.1	Cálculo da espessura das placas .....	15
4.1.2	Detalhamento das Juntas, Armaduras e Barras .....	16
5.	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE REFERÊNCIA .....	21
6.	SEÇÕES TÍPICAS .....	22
	ANEXOS .....	24



Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2

**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Traçado do Rodoanel da RMBH.....	2
Figura 6 - Configuração do Eixo Simples Padrão de Rodas Duplas.....	12
Figura 7 - Pontos de Verificação.....	12
Figura 8 - Seção de Pavimento Proposto.....	14
Figura 9 - BH Norte 2 – Pavimento de Concreto.....	21

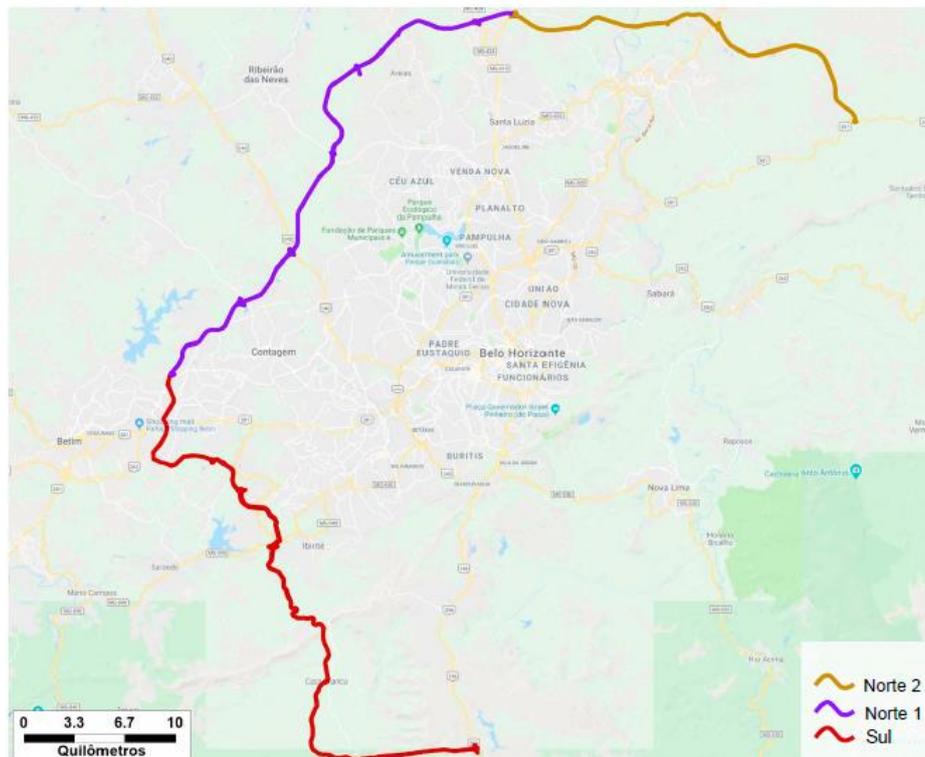
## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - VDMA Comerciais.....	4
Tabela 2 - Fatores de Carga .....	5
Tabela 3 - Fatores de Veículos - FV (USACE) .....	5
Tabela 4 - Fatores de Veículos - FV (AASHTO).....	5
Tabela 5 - Cálculo do Número "N" USACE .....	6
Tabela 6 - Cálculo do Número "N" AASHTO.....	7
Tabela 9 - Espessura mínima de Revestimento.....	8
Tabela 10 - Verificação das camadas projetadas.....	9
Tabela 11 - Pontos de Verificação .....	12
Tabela 12 - Resultados da Análise Mecanística.....	13
Tabela 13 - Requisitos Mínimos para o Concreto .....	14
Tabela 14 - Número "N" para 20 Anos .....	15
Tabela 15 - Bitola, Comprimento e Espaçamento de Barras de Transferência .....	18
Tabela 16 - Especificações Técnicas.....	21

## 1. PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO - INTRODUÇÃO

O presente relatório tem a finalidade de descrever o procedimento de cálculo utilizado para a determinação das estruturas dos pavimentos a serem utilizadas no projeto de modelagem do processo para concessão do Rodoanel da região metropolitana de BH.

O Rodoanel da RMBH é um importante projeto do Governo do Estado de Minas Gerais que prevê a implantação de um novo contorno rodoviário na região. O projeto prevê a implantação de uma nova infraestrutura rodoviária estruturante que será uma alternativa ao fluxo que atualmente utiliza o anel viário de Belo Horizonte e as vias urbanas da capital para deslocamentos de longa distância. O traçado em estudo está indicado na Figura 1, sendo o Norte 1 o trecho que se estende da MG-010 em Vespasiano/MG ao entroncamento da BR-381 com a BR-262 em Betim/MG, o Norte 2 da BR-381 em Caeté/MG a MG-010 em Vespasiano e o Sul é o trecho que começa no entroncamento com da BR-381 com a BR-262 em Betim/MG e vai até o entroncamento da BR-356 com a BR-040 em Nova Lima/MG. Esses dois segmentos contemplam por completo as **Alças Norte e Oeste**.



**FIGURA 1 – TRAÇADO DO RODOANEL DA RMBH**

Nesse documento são apresentadas as hipóteses adotadas e os parâmetros de projeto usados nesta análise, assim como o procedimento de cálculo utilizado.

O dimensionamento do pavimento asfáltico foi executado pelo Método do DNER, sendo também apresentado um dimensionamento baseado em conceitos da Mecânica dos

## Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2

**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

Pavimentos. Esse método é conhecido por mecanístico e se baseia em modelos de desempenho relacionados ao comportamento estrutural dos pavimentos.

A análise mecanística se fundamenta no cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos da estrutura do pavimento. Vale ressaltar que foi utilizado neste estudo o programa de camadas elásticas ELSYM5.

Para a proposição das estruturas de pavimento a serem implantadas serão analisados os seguintes parâmetros de cálculo:

- Dados de contagens volumétricas e número de solicitações oriundos do tráfego de categoria comercial;
- Capacidade de suporte do subleito através de resultados de ensaios de caracterização dos materiais de fundação existentes no local de implantação e;
- Características dos materiais disponíveis no local para emprego em camadas de pavimento.

Adiante serão analisados e definidos os parâmetros de tráfego e de suporte de subleito, bem como a definição das estruturas de pavimento a serem implantadas.

### 1.1. Parâmetros de Tráfego

O tráfego é considerado no dimensionamento de pavimentos através do conceito de equivalência de carga, onde se transformam todas as solicitações no número de passagens de um eixo padrão de 8,2 tf, também conhecido como número “N”. Essa transformação normalmente é feita através da aplicação do fator de veículo ao volume previsto para o período de projeto.

Para este estudo, utilizou-se o Cálculo do número “N” do Estudo de Tráfego e as Projeções de Demanda do Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do Rodoanel da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

O Estudo foi realizado referindo-se a diversos cenários e possibilidades os quais podem ser consultados na íntegra no documento citado anteriormente.

A determinação do número “N” foi realizada, tanto pelo método USACE quanto pelo método AASHTO, seguindo as recomendações do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006). O número “N” refere-se à quantidade de solicitações causada pelo tráfego de um eixo rodoviário padrão (8,2 t) ao longo do período de projeto no pavimento.

As metodologias para determinação do número “N” têm como fundamento os fatores de equivalência AASHTO ou USACE.

O fator de equivalência da AASHTO baseia-se na perda de serventia (PSI) e varia com o tipo do pavimento (flexível e rígido), índice de serventia terminal e resistência do pavimento (número estrutural – SN). Eles são diferentes dos obtidos pelo USACE, que avalia os efeitos do carregamento na deformação permanente (afundamento nas trilhas de roda).

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**
**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

Portanto, o dimensionamento do pavimento leva em consideração a metodologia USACE para a avaliação dos efeitos do carregamento no pavimento e a metodologia AASHTO para a avaliação dos efeitos da perda de serventia do pavimento.

Os dados de tráfego e estudos de demanda foram consultados no caderno 2.2.1 - Estudo Tráfego e Projeção de Demanda.

O Cenário utilizado para o dimensionamento da estrutura do pavimento é o 01B para o trecho homogêneo mais carregado (TH02).

### 1.2. Projeção do Volume Médio Diário Anual (VMDA)

A partir do modelo de transporte foi possível obter o VDMA dos trechos homogêneos (THs) do Rodoanel da RMBH, para cada cenário estudado. A tabela a seguir apresenta as projeções do volume diário de veículos pesados (ônibus e caminhões) de cada TH do trecho Sul Norte longo de 10 anos, a partir do ano de abertura (2026).

**TABELA 1 - VDMA COMERCIAIS**

Trecho	Pista	TH	VDMA's Comercial									
			2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Norte	Externa	TH01_Ext	381	393	405	417	429	442	456	469	483	498
		TH02_Ext	769	792	816	841	866	892	919	946	974	1.004
	Interna	TH01_Int	365	376	387	399	411	423	436	449	463	476
		TH02_Int	532	548	565	582	599	617	636	655	675	695

### 1.3. Classificação e Carregamento da Frota

O impacto sobre o pavimento de cada tipo-eixo é diferente. Por isso, o fator de carga (FC) é utilizado para converter qualquer classe/tipo de veículo em unidade de eixo padrão, correspondente à 8,2 t de carga. A tabela a seguir mostra os tipos de carga considerados nas duas metodologias.

**TABELA 2 - FATORES DE CARGA**

Tipo de Eixo		Fatores de Carga			
		USACE - flexível		AASHTO - flexível	
		Carregado	Vazio	Carregado	Vazio
simples (roda simples)	ESRS	0,278	0,017	0,327	0,016
simples (roda dupla)	ESRD	3,290	0,134	2,394	0,120
tandem duplo (roda dupla)	ETD	8,549	0,080	1,642	0,022
tandem triplo (roda dupla)	ETT	9,300	0,128	1,560	0,019

Ao final, os fatores de eixo por veículo são combinados para calcular os fatores de veículo (FV). Como mostrado na tabela a seguir.

**TABELA 3 - FATORES DE VEÍCULOS - FV (USACE)**

Classificação		Fatores de Veículos por Tipo de Veículo	
		USACE - flexível	
Classe	Tipo	Carregado	Vazio
Auto	Auto	0,00	0,00
Comercial 2	2C	3,57	0,15
Comercial 3	3C	8,83	0,10
Comercial 4	2S2	12,12	0,23
Comercial 5	2S3	12,87	0,28
Comercial 6	3S3	18,13	0,23
Comercial 7	3S2S2	25,92	0,26
Comercial 9	3S3S3	27,43	0,35

**TABELA 4 - FATORES DE VEÍCULOS - FV (AASHTO)**

Classificação		Fatores de Veículos por Tipo de Veículo	
		AASHTO - flexível	
Classe	Tipo	Carregado	Vazio
Auto	Auto	0,00	0,00
Comercial 2	2C	2,72	0,14
Comercial 3	3C	1,97	0,04
Comercial 4	2S2	4,36	0,16
Comercial 5	2S3	4,28	0,16
Comercial 6	3S3	3,53	0,06
Comercial 7	3S2S2	5,25	0,08
Comercial 9	3S3S3	5,09	0,08

### 1.4. Cálculo Número “N”

As tabelas a seguir apresentam a memória de cálculo do Número N pelo Método USACE e pelo método AASHTO, para a seção mais carregada do cenário 01B. No caso dos cenários com tarifa cheia, trata-se da pista interna do TH02.

**TABELA 5 - CÁLCULO DO NÚMERO "N" USACE**

Método USACE	TH	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2026 a 2035	
	TH01_Ext	6,0E+05	6,1E+05	6,3E+05	6,5E+05	6,6E+05	6,8E+05	7,0E+05	7,2E+05	7,4E+05	7,6E+05	7,6E+05	6,8E+06
	TH02_Ext	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,4E+07
	TH01_Int	5,7E+05	5,9E+05	6,0E+05	6,2E+05	6,4E+05	6,5E+05	6,7E+05	6,9E+05	7,1E+05	7,3E+05	7,3E+05	6,5E+06
	TH02_Int	8,3E+05	8,6E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	9,5E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	9,4E+06
	TH03_Ext	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,4E+07
	TH04_Ext	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,8E+06	1,8E+06	1,9E+06	1,9E+06	1,9E+06	2,0E+06	1,8E+07
	TH05_Ext	2,5E+06	2,5E+06	2,6E+06	2,7E+06	2,7E+06	2,8E+06	2,9E+06	3,0E+06	3,1E+06	3,2E+06	3,2E+06	2,8E+07
	TH06_Ext	3,5E+06	3,6E+06	3,7E+06	3,8E+06	3,9E+06	4,0E+06	4,1E+06	4,2E+06	4,3E+06	4,5E+06	4,5E+06	4,0E+07
	TH07_Ext	4,3E+06	4,4E+06	4,5E+06	4,7E+06	4,8E+06	4,9E+06	5,1E+06	5,2E+06	5,4E+06	5,5E+06	5,5E+06	4,9E+07
	TH08_Ext	3,9E+06	4,0E+06	4,2E+06	4,3E+06	4,4E+06	4,5E+06	4,6E+06	4,8E+06	4,9E+06	5,0E+06	5,0E+06	4,5E+07
	TH09_Ext	3,7E+06	3,8E+06	3,9E+06	4,0E+06	4,1E+06	4,3E+06	4,4E+06	4,5E+06	4,6E+06	4,8E+06	4,8E+06	4,2E+07
	TH03_Int	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,1E+07
	TH04_Int	2,0E+06	2,0E+06	2,1E+06	2,1E+06	2,2E+06	2,2E+06	2,3E+06	2,4E+06	2,4E+06	2,5E+06	2,5E+06	2,2E+07
	TH05_Int	2,4E+06	2,5E+06	2,5E+06	2,6E+06	2,7E+06	2,8E+06	2,8E+06	2,9E+06	3,0E+06	3,1E+06	3,1E+06	2,7E+07
	TH06_Int	3,3E+06	3,3E+06	3,4E+06	3,5E+06	3,6E+06	3,7E+06	3,8E+06	3,9E+06	4,0E+06	4,1E+06	4,1E+06	3,7E+07
	TH07_Int	4,0E+06	4,1E+06	4,2E+06	4,4E+06	4,5E+06	4,6E+06	4,7E+06	4,9E+06	5,0E+06	5,1E+06	5,1E+06	4,5E+07
	TH08_Int	3,7E+06	3,8E+06	3,9E+06	4,0E+06	4,1E+06	4,2E+06	4,4E+06	4,5E+06	4,6E+06	4,7E+06	4,7E+06	4,2E+07
	TH09_Int	3,3E+06	3,4E+06	3,5E+06	3,6E+06	3,7E+06	3,8E+06	3,9E+06	4,0E+06	4,1E+06	4,2E+06	4,2E+06	3,7E+07
	TH10_Ext	9,9E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,1E+07
TH11_Ext	1,9E+06	2,0E+06	2,0E+06	2,1E+06	2,1E+06	2,2E+06	2,3E+06	2,3E+06	2,4E+06	2,5E+06	2,5E+06	2,2E+07	
TH12_Ext	1,2E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,3E+07	
TH10_Int	9,9E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,1E+07	
TH11_Int	2,0E+06	2,1E+06	2,1E+06	2,2E+06	2,2E+06	2,3E+06	2,4E+06	2,4E+06	2,5E+06	2,6E+06	2,6E+06	2,3E+07	
TH12_Int	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,4E+07	

**TABELA 6 - CÁLCULO DO NÚMERO "N" AASHTO**

Método AASHTO	TH	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2022 a 2031	
	TH01_Ext	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,6E+05	2,3E+06
	TH02_Ext	4,2E+05	4,3E+05	4,4E+05	4,5E+05	4,6E+05	4,8E+05	4,9E+05	5,0E+05	5,2E+05	5,3E+05	5,3E+05	4,7E+06
	TH01_Int	2,0E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,2E+06
	TH02_Int	2,9E+05	3,0E+05	3,0E+05	3,1E+05	3,2E+05	3,3E+05	3,4E+05	3,5E+05	3,6E+05	3,6E+05	3,7E+05	3,3E+06
	TH03_Ext	4,2E+05	4,3E+05	4,4E+05	4,5E+05	4,6E+05	4,8E+05	4,9E+05	5,0E+05	5,2E+05	5,3E+05	5,3E+05	4,7E+06
	TH04_Ext	5,4E+05	5,5E+05	5,7E+05	5,8E+05	6,0E+05	6,2E+05	6,3E+05	6,5E+05	6,7E+05	6,9E+05	6,9E+05	6,1E+06
	TH05_Ext	8,6E+05	8,8E+05	9,0E+05	9,3E+05	9,5E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	9,7E+06
	TH06_Ext	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,4E+07
	TH07_Ext	1,5E+06	1,5E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,8E+06	1,8E+06	1,9E+06	1,9E+06	1,9E+06	1,7E+07
	TH08_Ext	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,5E+07
	TH09_Ext	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,5E+07
	TH03_Int	3,5E+05	3,6E+05	3,7E+05	3,8E+05	3,9E+05	4,0E+05	4,1E+05	4,2E+05	4,4E+05	4,5E+05	4,5E+05	4,0E+06
TH04_Int	6,8E+05	6,9E+05	7,1E+05	7,3E+05	7,5E+05	7,7E+05	7,9E+05	8,2E+05	8,4E+05	8,6E+05	8,6E+05	7,7E+06	
TH05_Int	8,4E+05	8,6E+05	8,8E+05	9,1E+05	9,3E+05	9,6E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	9,5E+06	
TH06_Int	1,1E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,3E+07	
TH07_Int	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,8E+06	1,8E+06	1,6E+07	
TH08_Int	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,6E+06	1,5E+07	
TH09_Int	1,1E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,3E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,5E+06	1,5E+06	1,3E+07	
TH10_Ext	3,4E+05	3,5E+05	3,6E+05	3,7E+05	3,8E+05	3,9E+05	4,0E+05	4,1E+05	4,2E+05	4,4E+05	4,4E+05	3,9E+06	
TH11_Ext	6,7E+05	6,8E+05	7,0E+05	7,2E+05	7,4E+05	7,6E+05	7,8E+05	8,0E+05	8,3E+05	8,5E+05	8,5E+05	7,5E+06	
TH12_Ext	4,0E+05	4,1E+05	4,2E+05	4,4E+05	4,5E+05	4,6E+05	4,7E+05	4,9E+05	5,0E+05	5,1E+05	5,1E+05	4,6E+06	
TH10_Int	3,4E+05	3,5E+05	3,6E+05	3,7E+05	3,8E+05	3,9E+05	4,0E+05	4,1E+05	4,3E+05	4,4E+05	4,4E+05	3,9E+06	
TH11_Int	6,9E+05	7,1E+05	7,3E+05	7,5E+05	7,7E+05	7,9E+05	8,1E+05	8,4E+05	8,6E+05	8,8E+05	8,8E+05	7,8E+06	
TH12_Int	4,2E+05	4,3E+05	4,4E+05	4,5E+05	4,6E+05	4,7E+05	4,9E+05	5,0E+05	5,2E+05	5,3E+05	5,3E+05	4,7E+06	

## 2. PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

### 2.1. Caracterização do Suporte do Subleito

A caracterização do suporte dos pavimentos asfálticos varia conforme a teoria aplicada no método de dimensionamento utilizado. Assim, quando se adota o Método do CBR, as camadas sob o revestimento são caracterizadas pelo CBR (*California Bearing Ratio*), ao passo que quando se utiliza um Método Mecânico, as camadas devem ser caracterizadas pelos seus respectivos coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade.

Para a definição das condições de suporte do subleito do pavimento, foram utilizados dados de investigações geotécnicas com a finalidade de coletar e ensaiar os solos ocorrentes na cota de implantação do subleito do pavimento permitindo estabelecer critérios de escolha de materiais para camadas de pavimento e estabelecer índices de capacidade de suporte dos materiais de fundação das estruturas a serem implantadas.

### 3. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO

#### 3.1. Método do CBR

O Método do CBR fornece a estrutura de pavimento necessária para suportar o tráfego previsto durante o período de projeto (10 anos) e para as condições geotécnicas admitidas para o subleito ( $CBR_{min}$  de 6,0% e módulo de resiliência de  $E = 922 \text{ kgf/cm}^2$ ) de modo a transmitir ao subleito tensões compatíveis com a capacidade de suporte e permitir o tráfego de veículos.

Com base nas definições dos parâmetros de tráfego e suporte de subleito, estabelecidas nos itens anteriores, definiram-se as espessuras equivalentes de camada granular, em termos de suporte do subleito. Vale salientar que o método determina a espessura total da base e do revestimento (H20), com capacidade de suporte igual a 20%, mesmo que o material apresente capacidade superior.

Para a definição da espessura mínima de revestimento a ser adotada em projeto, levou-se em consideração a Instrução de Projeto de Pavimentação do DNIT (IPR-719/2006) que recomenda para determinados intervalos de tráfego uma espessura de revestimento:

TABELA 7 - ESPESSURA MÍNIMA DE REVESTIMENTO

Faixa de Valores de N		Esp. Mínima de Revestimento Asfáltico	
	$N \leq$	1,0E+06	2,00 cm
1,0E+06	$<N \leq$	5,0E+06	5,00 cm
5,0E+06	$<N \leq$	1,0E+07	7,50 cm
1,0E+07	$<N \leq$	5,0E+07	10,00 cm
5,0E+07	$> N$		12,50 cm

- Dimensionamento

Sendo:  $N_{USACE} = 9,4 \times 10^6$  e  $CBR_p = 6,0\%$

É recomendável a utilização de estrutura de pavimento flexível em vias com tráfego inferior a  $1,0 \times 10^7$ . Para o revestimento asfáltico, a espessura aconselhada para tráfego dessa magnitude ( $5,0 \times 10^6 < N \leq 1 \times 10^7$ ) é de no mínimo 7,5 cm (Adotado  $R = 8,0$  cm) - CAUQ.

Espessura total ( $H_t$ ) =  $77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598}$

$$H_{SB} = 12,30 \text{ cm}$$

$$H_{SL} = 57,70 \text{ cm}$$

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**
**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

O método fixa ainda os valores de coeficientes de equivalência estrutural (k) para cada material componente da estrutura do pavimento. Dessa forma, os valores de coeficiente dos materiais a serem utilizados nesse empreendimento, são apresentados a seguir:

$$K_{\text{REVEST}} = 2,0$$

$$K_{\text{BASE}} = 1,0$$

$$K_{\text{SUB-BASE}} = 1,7$$

As espessuras de base e sub-base foram definidas a partir da resolução das seguintes inequações:

$$R.KR + B.KB \geq HSB$$

$$8,0 \times 2,0 + B \times 1,0 \geq 12,30$$

$$B_{\min} = -3,7 \text{ cm (Adotado } B = 12,0 \text{ cm) BGS (Faixa II)}$$

$$RKR + BKB + SB KSB \geq Hm$$

$$8,0 \times 2,0 + 12,0 \times 1,0 + SB \times 1,7 \geq 57,70$$

$$SB_{\min} = 17,50 \text{ cm (Adotado } SB = 20,0 \text{ cm) – BGTC (4,0 MPa < RCS aos 28 dias < 6,2 MPa e } 0,7 \text{ MPa > } f_{ct} > 1,0 \text{ Mpa).}$$

Onde:

R = espessura da camada de revestimento;

B = espessura da camada de base;

SB = espessura da camada de sub-base;

Hm = espessura total da camada de pavimento para proteger um material com CBR de projeto;

KR = coeficiente estrutural do revestimento, igual a 2,00;

KB = coeficiente estrutural da base igual a 1,00;

KSB = coeficiente estrutural da sub-base (camada cimentada) igual a 1,70;

Dos cálculos das inequações citadas anteriormente, resultou-se as seguintes estruturas de pavimento:

**TABELA 8 - VERIFICAÇÃO DAS CAMADAS PROJETADAS**

Camadas		K	H <sub>ajustado</sub>	Ref	H <sub>equiv</sub>		H <sub>calculado</sub>		Verif
<b>Revestimento</b>	CAUQ	2,0	8,0						
<b>Base</b>	BGS	1,0	12,0	H <sub>B</sub>	28	>	12	∴	OK
<b>Reforço</b>	BGTC	1,7	20,0	H <sub>SL</sub>	62	>	58	∴	OK
<b>Subleito</b>	6%								

Portanto, a estrutura de pavimentos propostas atendem, o dimensionamento segundo o Método do DNER (limitação de deformações permanentes e tensões que podem provocar ruptura por cisalhamento dos solos da base, reforço e subleito).

### **3.2. Método Mecânico**

No desenvolvimento deste estudo, utilizou-se a teoria das camadas elásticas para o cálculo dos deslocamentos, das tensões e das deformações nas estruturas simuladas. Nesta tarefa fez-se uso do programa do ELSYM5 – “*Elastic Layered System*”, que aplica o método das diferenças finitas no cálculo destes parâmetros, produzidos por um eixo de cargas em qualquer ponto da estrutura do pavimento.

A fadiga e a deformação são as condições fundamentais da avaliação estrutural de pavimentos, ditadas pela resistência dos materiais.

Procurou-se determinar diversos indicadores estruturais, representados pelas deformações verticais reversíveis (deflexões) na superfície (D), pelas deformações horizontais na face inferior do revestimento ( $\epsilon t$ ), tensão de tração na fibra inferior da camada cimentada ( $\sigma t$ ) e pela deformação vertical no topo do subleito ( $\epsilon v$ ).

A análise comparativa de desempenho das estruturas é feita através da verificação da compatibilidade entre esforços solicitantes (devidos à aplicação de cargas de tráfego) e os esforços resistentes, intrínsecos de cada material, traduzidos pelas equações de fadiga apresentadas no item a seguir.

#### **3.2.1 Análise de Fadiga dos Materiais**

##### *Deformação Vertical Máxima Admissível na Superfície do Revestimento*

Como critério comparativo utilizou-se, para este parâmetro, a equação tradicionalmente aceita pelo método DNER PRO-011/79:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N$$

Onde:

N = número de aplicações da carga (USACE);

D = deflexão na superfície ( $10^{-2}$  mm).

##### *Fadiga quanto às deformações horizontais de tração das misturas betuminosas*

As deformações horizontais de tração ( $\epsilon t$ ) nas faces inferiores das camadas betuminosas, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, se forem excessivas, poderão causar ruptura por fadiga dessas camadas. Desta forma, existe um número muito grande de procedimentos analíticos de projeto que consideram a deformação específica de tração na face inferior da camada betuminosa como o fator determinante da fadiga.

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2****Data:** 13/10/2020**Versão:** 02

Para se estimar a fadiga da camada betuminosa, foi adotada a equação sugerida pela Federal Highway Administration - FHWA, que relaciona as deformações admissíveis na fibra inferior desta camada com o número de repetições da carga-padrão, como segue:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{N}{1,092 \times 10^{-6}} \right)^{\frac{-1}{3,512}}$$

Onde:

N = número de aplicações da carga (AASHTO);

$\varepsilon_t$  = deformação horizontal de tração ( $10^{-4}$  mm/mm).

### *Critério de Ruptura por Fadiga na Camada Cimentada*

Foi adotado o modelo preconizado (Heavy Vehicle Simulator) Africa do Sul Adaptado pela DERSA, para verificação do número admissível de repetições do eixo padrão em função da deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada cimentada ( $\sigma$ ).

$$N_{USACE} = 10^{8,71 - \left( 3,17 \times \frac{\sigma_{adm}}{\sigma} \right)}$$

### *Fadiga quanto às deformações verticais de compressão no subleito*

O critério de fadiga para deformações verticais de compressão do subleito é idêntico aos modelos adotados para a fadiga de misturas betuminosas e expresso por uma equação da seguinte forma (DORMON & METCALF, 1965):

$$N = 6,069 \times 10^{-10} \times (\varepsilon_v)^{-4,762}$$

Onde:

N = número de aplicações da carga (USACE);

$\varepsilon_v$  = deformação vertical ( $10^{-4}$  mm/mm).

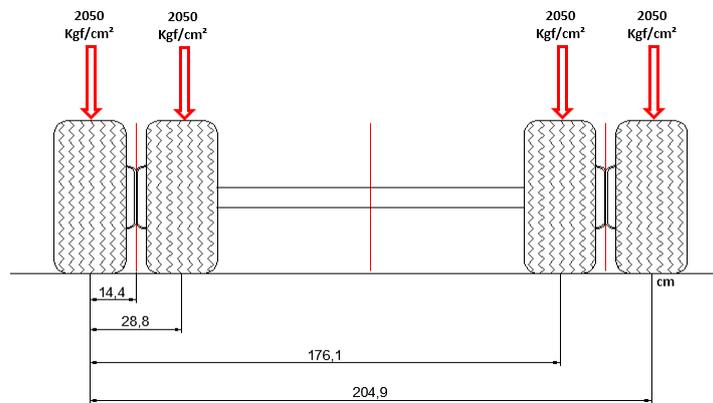
Com a aplicação das equações acima relacionadas, para o número de solicitações de projeto, pode-se definir o valor admissível de cada indicador estrutural e, ao compará-los com os valores resultantes da análise mecânica, proceder à verificação da estrutura do pavimento.

### *Configuração do Eixo Padrão de 80kN*

Como carregamento atuante sobre o pavimento foi considerado o eixo padrão rodoviário (eixo simples de rodas duplas) com 80 kN (8,2 t), representado por 4 cargas circulares de 20 kN (2,05 t) cada, com uma pressão de contato pneu-pavimento de 5,60 kgf/cm<sup>2</sup> (80 psi), resultando em área circular carregada com raio de 10,79 cm.

A configuração do eixo padrão rodoviário, com a localização das cargas, é representada a seguir.

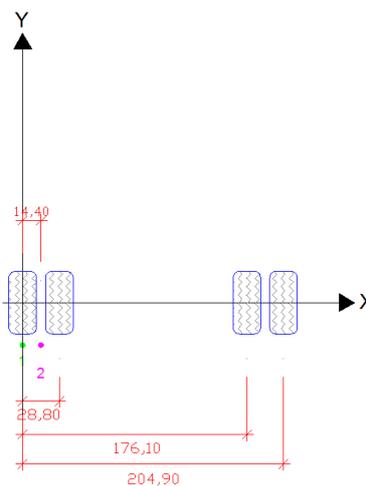
**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**
**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

**FIGURA 2 - CONFIGURAÇÃO DO EIXO SIMPLES PADRÃO DE RODAS DUPLAS**

Os pontos de verificação das tensões, deformações e deslocamentos foram os seguintes:

**TABELA 9 - PONTOS DE VERIFICAÇÃO**

PONTOS DE VERIFICAÇÃO		
PONTO	X (cm)	Y (cm)
1	0,00	0,00
2	14,40	0,00


**FIGURA 3 - PONTOS DE VERIFICAÇÃO**
**Resultados Obtidos pelo Método Mecânico**

Apresentam-se a seguir as respostas calculadas nas estruturas de pavimento, através da aplicação do programa ELSYM5. Da comparação entre os valores atuantes,

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**
**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

resultantes do estudo mecanístico, e dos valores admissíveis para cada parâmetro de análise pode-se garantir a verificação dos preceitos do dimensionamento.

**TABELA 10 - RESULTADOS DA ANÁLISE MECANISTICA**

Camada	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	Esp. (cm)	Posição (cm)			Valores Atuantes				Valores Admissíveis				Aceito
			X	Y	Z	D	Et	Ev	σt	D	Et	Ev	σt	
						(10 <sup>-2</sup> mm)	(10 <sup>-4</sup> cm/cm)	(10 <sup>-4</sup> cm/cm)	(MPa)	(10 <sup>-2</sup> mm)	(10 <sup>-4</sup> cm/cm)	(10 <sup>-4</sup> cm/cm)	(MPa)	
CAUQ	35.000	8	14,4	0	0,01	35	-	-	-	63	-	-	-	SIM
			14,4	0	7,99	-	1,53	-	-	-	-	2,62	-	-
BGS	3.500	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BGTC	75.000	20	14,4	0	39,99	-	-	-	4,83	-	-	-	5,48	SIM
SUBLEITO	922	∞	14,4	0	40,01	-	-	1,59	-	-	-	3,98	-	SIM

### 3.3. Estrutura Final

A estrutura final do pavimento deve atender a todos os parâmetros expostos anteriormente de forma a garantir o bom desempenho do pavimento durante seu período de vida útil.

Conforme análise realizada mecanicista realizada, verifica-se que a seção estrutural calculada a partir do método do CBR atende de forma satisfatória aos parâmetros mínimos necessários.

Dessa forma, a seção típica calculada pelo método do CBR será adotada como proposta de pavimento a ser implantado para o período de projeto de 10 anos.

BH NORTE 2 – PAVIMENTO ASFÁLTICO	Esp (cm)
CAUQ	4
Imprimação Ligante	-
Binder	4
Imprimação Ligante	-
Imprimação Impermeabilizante	-
BGS	12
BGTC	20
Subleito CBR ≥ 6%	∞
Espessura Total	40

**FIGURA 4 - SEÇÃO DE PAVIMENTO PROPOSTO (CALCULADA PELO MÉTODO DO CBR E VERIFICADA POR ANÁLISE MECANICISTA)**

#### **4. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CONCRETO (PRAÇA DE PEDÁGIO)**

Os métodos clássicos de dimensionamento de pavimentos rígidos baseiam-se na consideração das propriedades mecânicas do concreto (representadas pela resistência à tração na flexão), no suporte da fundação do pavimento (medido pelo coeficiente de recalque) e nas características do carregamento (dadas pela magnitude das cargas, sua posição crítica em relação à geometria das placas de concreto e o efeito do número de repetições de eixo durante o período de projeto).

Conforme análise o concreto utilizado no dimensionamento apresenta as mesmas características do empregado na implantação do pavimento, deve possuir módulo de ruptura a tração na flexão de 4,5 MPa, referente à idade de 28 dias. Deve possuir Módulo de Elasticidade igual ou superior a 28.000 MPa (conforme DNIT-048/2004-ES). Este material corretamente dosado deverá atender de forma satisfatória quanto ao seu desempenho, trabalhabilidade, impermeabilidade, durabilidade e resistência à abrasão.

Para a camada de sub-base de concreto compactado com rolo, o consumo deve ser de 120 kg de cimento por m<sup>3</sup> de concreto. Deve apresentar resistência característica à compressão (fck) maior ou igual à 5,0 MPa aos 7 dias de idade (DNIT-056/2004-ES). Os requisitos mínimos para as camadas cimentadas são apresentados na tabela a seguir.

**TABELA 11 - REQUISITOS MÍNIMOS PARA O CONCRETO**

<b>Camada</b>	<b>Descrição</b>	<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>	<b>Resistência a Tração na Flexão <math>f_{ctM,k}</math> (MPa)</b>
<b>Placa</b>	Concreto de Cimento Portland	28.000	4,5
<b>Base</b>	Concreto Compactado à Rolo (consumo de cimento 120 kg/cm <sup>3</sup> )	15.000	1,5

##### **4.1. Metodologia AASHTO-1993**

Para dimensionamento do pavimento de concreto pelo método da AASTHO, foram adotadas as seguintes hipóteses:

Confiabilidade (R)

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**
**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

Em função da classe funcional do sistema viário em questão, foi adotado nível de confiabilidade igual a 85%.

Desvio padrão (So)

O desvio padrão representativo das condições locais foi adotado igual a 0,35.

Perda de serventia de projeto ( $\Delta$ PSI)

Foram considerados índice de serventia inicial (Pi) igual a 4,5 e índice de serventia ao final do período de projeto (Pt) igual a 2,5.

Coefficiente de transferência de carga (J)

Para o valor de coeficiente de transferência de carga, foram considerados os seguintes parâmetros: sem acostamento, condição climática rigorosa, (J) igual a 2,9.

Coefficiente de drenagem (Cd)

Considerando que o local terá condições pluviométricas rigorosas, adotou-se coeficiente de drenagem igual a 1,0.

Para o valor de W18 será utilizado o  $N_{AASHTO}$  para 20 anos conforme tabela a seguir.

**TABELA 12 - NÚMERO “N” PARA 20 ANOS**

	Ano	VDMA COMERCIAL	NUSACE ANUAL	NUSACE ACUMULADO	NAASHTO ANUAL	NAASHTO ACUMULADO
	<b>TH02_Int</b>	2026	532	8,3E+05	8,3E+05	2,9E+05
2027		547	8,6E+05	1,7E+06	3,0E+05	5,9E+05
2028		561	8,8E+05	2,6E+06	3,0E+05	8,9E+05
2029		576	9,0E+05	3,5E+06	3,1E+05	1,2E+06
2030		592	9,3E+05	4,4E+06	3,2E+05	1,5E+06
2031		608	9,5E+05	5,4E+06	3,3E+05	1,9E+06
2032		625	9,8E+05	6,3E+06	3,4E+05	2,2E+06
2033		643	1,0E+06	7,3E+06	3,5E+05	2,5E+06
2034		661	1,0E+06	8,4E+06	3,6E+05	2,9E+06
2035		679	1,1E+06	9,4E+06	3,7E+05	3,3E+06
2036		698	1,1E+06	1,1E+07	3,8E+05	3,6E+06
2037		717	1,1E+06	1,2E+07	3,9E+05	4,0E+06
2038		737	1,2E+06	1,3E+07	4,0E+05	4,4E+06
2039		758	1,2E+06	1,4E+07	4,1E+05	4,8E+06
2040		779	1,2E+06	1,5E+07	4,2E+05	5,3E+06
2041		801	1,3E+06	1,6E+07	4,3E+05	5,7E+06
2042		823	1,3E+06	1,8E+07	4,5E+05	6,2E+06
2043		846	1,3E+06	1,9E+07	4,6E+05	6,6E+06
2044		870	1,4E+06	2,0E+07	4,7E+05	7,1E+06
2045		894	1,4E+06	2,2E+07	4,9E+05	7,6E+06

**4.1.1 Cálculo da espessura das placas**

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**
**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

Com os valores dos parâmetros adotados anteriormente, calculou-se a espessura necessária de pavimento rígido (D em polegadas) que atende ao tráfego solicitante, conforme a seguinte equação:

$$\log(W_{18}) = Z_r \cdot S_o + 7,35 \log(D + 1) - 0,66 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{3,0}\right)}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{8,46}}}$$

$$+ (4,22 - 0,32Pt) \log \left\{ \frac{S_c \cdot C_d (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J \cdot \left[ D^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{E_c}{K}\right)^{0,25}} \right]} \right\}$$

Onde:

W18= Número de Solicitações Requeridas =  $7,6 \times 10^6$ ;

ZR = Desvio-padrão correspondente ao Grau de Confiança (85%) = 1,037;

So= Desvio Padrão médio = 0,35;

D = Espessura da Placa (pol);

$\Delta PSI$  = Variação de serventia =  $4,5 - 2,5 = 2,0$ ;

pt= serventia final = 2,5;

Sc = Módulo de Ruptura do Concreto = 4,5 MPa (652,7psi);

J = Coeficiente de Transferência de Carga = 2,9 (com barras de transferência);

Cd = Coeficiente de drenagem = 1,0;

Ec = Módulo de Elasticidade do Concreto =  $4,06 \times 10^6$  psi;

k = Módulo de Reação = 120 MPa/m ou 441,6 pci;

Da resolução da equação, para o conjunto de dados citados, obtém-se uma espessura de placa de  $D = 7,7$  polegadas (19,55cm), porém é recomendada a espessura mínima de 23 cm para pavimento em concreto simples.

#### 4.1.2 Detalhamento das Juntas, Armaduras e Barras

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 dos efeitos de empenamento restringido e dos esforços solicitantes gerados pela ação do tráfego.

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2****Data:** 13/10/2020**Versão:** 02

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:

- Utilização de armadura distribuída, com a finalidade de manter fortemente unidas as faces das fissuras;
- Emprego de seções artificialmente enfraquecidas, induzindo a ocorrência de fissuras.

Para a execução das juntas, foi analisado o fenômeno de retração do concreto e as situações possíveis de posicionamento das rodas dos veículos. Assim, as juntas longitudinais serão dispostas de tal maneira que as solicitações nos cantos das placas sejam minimizadas.

### *Geometria das Placas e Juntas Transversais e Longitudinais*

Por se tratar de uma estrutura constituída por placas de concreto assentadas sobre uma sub-base de concreto rolado (CCR), deve-se selecionar um valor para o espaçamento das juntas das placas de concreto de geometria regular entre 4 e 6 vezes o raio do módulo de rigidez relativo (stiffness), calculado a partir da equação proposta por Westergaard:

$$L = \left( \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)K} \right)^{1/4}$$

Onde:

E = módulo de elasticidade do concreto;

h = espessura da placa, em polegadas (in);

v = coeficiente de Poisson do concreto, usualmente;

K = módulo de reação do subleito, pci;

L = raio do módulo de rigidez relativo (stiffness), em polegadas (in).

Adotando-se os seguintes parâmetros:

E = 28.000 MPa (4,06 x 10<sup>6</sup> PSI)

h = 23,0 cm = 9,06 in

v = 0,20

k = 120 = 441,6 pci

Obtém-se:

L = 28 in = 70 cm

Considerando o espaçamento entre juntas 5 vezes o valor de L (70 cm), tem-se o comprimento das placas de 351 cm.

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2****Data:** 13/10/2020**Versão:** 02

A largura da faixa onde serão implantadas as placas de concreto é de 3,50 m. De modo a manter placas com formato retangular será adotado para o comprimento das placas a relação 1/3, resultando em um comprimento aproximado de 5,00 m.

Portanto, as dimensões das placas de concreto de geometria regular deverão ser de 5,0 m de comprimento por 3,5 m de largura, uma vez que placas com este comprimento e espessura de 23 cm mostraram-se adequadas para o nível de solicitações e período de projeto determinados.

Nos casos em que as placas possuírem configurações irregulares, deve-se tomar o cuidado de evitar cantos de placas formando ângulos agudos, além de utilizar armadura distribuída.

Para as juntas transversais de retração, serão previstas barras de transferência, que têm a função de permitir a 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.

O dimensionamento das barras de transferência é efetuado em função da espessura da placa de concreto.

As bitolas, os comprimentos e espaçamentos dessas barras são fornecidos no Estudo Técnico nº13 - "Projeto de Juntas em Pavimentos Rodoviários de Concreto" da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP.

**TABELA 13 - BITOLA, COMPRIMENTO E ESPAÇAMENTO DE 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

Para placas com espessura de 23 cm recomenda-se a utilização de barras de transferência no eixo do viário com as seguintes características:

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

O dimensionamento da seção de aço necessária para se garantir a ligação entre placas é feito considerando que a camada subjacente ofereça restrição à movimentação desta no plano horizontal, seja por empenamento ou retração, conforme equação apresentada a seguir:

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2****Data:** 13/10/2020**Versão:** 02

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

Onde:

As = área de aço necessária por metro de comprimento da junta considerada, cm<sup>2</sup>/m;

f = coeficiente de atrito placa / sub-base (geralmente tomado como 1,5);

b = distância entre a junta considerada e a junta ou borda livre mais próxima dela = 3,80 m;

h = espessura da placa = 0,23 m;

 $\gamma_c$  = peso específico do concreto = 24.000 N/m<sup>3</sup>;S = tensão admissível no aço, em geral 2/3 da tensão de escoamento do aço  $\frac{500 \times 2}{3}$  MPa.A área da seção de aço necessária para cada barra de ligação é 0,69 cm<sup>2</sup>/mPortanto será adotada a bitola Ø de 12,5 mm, com área de 1,23 cm<sup>2</sup>/m

O comprimento da barra de ligação, para assegurar a necessária aderência ao concreto, considerando uma tensão máxima de aderência aço-concreto de 2,45 MPa, é dado pela seguinte equação:

$$L_b = \frac{1}{2} \left( \frac{S \times d}{\tau_b} \right) + 7,5$$

Onde:

Lb = comprimento da barra de ligação (cm);

S = tensão admissível no aço, em geral 2/3 da tensão de escoamento do aço (MPa);

d = diâmetro da barra de ligação = 1,25 cm;

 $\tau_b$  = tensão de aderência entre o aço e o concreto (em geral tomado como 2,45 MPa);

7,5 = margem para prever possível descentralização da barra (cm).

Obtendo-se o comprimento da barra de ligação = 66,64 cm. Portanto será adotado o comprimento de 80 cm para as barras de ligação.

Através da resolução das equações (As e Lb), obtêm-se as dimensões e espaçamento para as barras de ligação:

- Aço: CA-50;
- Bitola: Ø 12,5 mm;
- Comprimento da barra: 80,0 cm;
- Espaçamento entre barras: 50 cm.

***Armadura Distribuída Descontínua para Placas Irregulares***

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**
**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

No caso de placas com dimensões irregulares há necessidade de uso de armadura descontínua distribuída, com a finalidade de manter fortemente unidas as faces das fissuras.

A área mínima de aço necessária para as armaduras distribuídas é dada pela expressão:

$$A_s = \frac{f \times L \times e \times \gamma_c}{200 \times S}$$

Onde:

As = área de aço necessária por metro de comprimento da junta considerada, cm<sup>2</sup>/m;

b = distância entre a junta considerada e a junta ou borda livre mais próxima dela, m;

f = coeficiente de resistência entre a placa e o subleito ou sub-base, geralmente tomado como 1,5;

γc = peso específico do concreto, igual a 24000N/m<sup>3</sup>;

h = espessura de placa, m;

S = tensão admissível no aço, em geral 2/3 da tensão de escoamento, MPa.

O valor resultante com a aplicação da equação é 0,69 cm<sup>2</sup>/m, porém de forma a otimizar a solução deverá ser utilizada tela soldada de malha quadrada do tipo Q-196 (Aço CA-60) posicionada 5,0 cm abaixo da superfície acabada.

Características da Tela Soldada Tipo Q-196 (Aço CA-60):

- Espaçamento entre fios, longitudinal e transversal: 10,0 cm;
- Diâmetro dos fios, longitudinal e transversal: 5,0 mm;
- Seção dos fios, longitudinal e transversal: 1,96 cm<sup>2</sup>/m;
- Peso: 3,11 kgf/m<sup>2</sup>.

BH NORTE 2 – PAVIMENTO DE CONCRETO	Esp (cm)
CCP	23
LONA PLÁSTICA	-
CCR	10
BGS	10
K = 120 MPa/m	∞

Espessura Total

43

**FIGURA 5 - BH NORTE 2 – PAVIMENTO DE CONCRETO**

## 5. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE REFERÊNCIA

Os pavimentos sugeridos foram dimensionados para atingir a vida útil de projeto, mantendo suas condições estruturais e funcionais dentro de padrões aceitáveis.

Os quadros a seguir apresentam as estruturas de pavimentos adotadas para o projeto executivo de pavimentação a serem implantados no trecho Sul do Rodoanel de BH.

**TABELA 14 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS**

MATERIAL	SIGLA	ESPECIFICAÇÃO
Concreto Asfáltico	CAUQ	DNIT 031/2006- ES
Pintura de ligação com ligante asfáltico convencional	-	DNIT 145/2012-ES
Imprimação com ligante asfáltico convencional	-	DNIT 144/2014-ES
Base estabilizada granulometricamente	BGS	DNIT 141/2010-ES
Brita graduada tratada com cimento	BGTC	DER/SP ET-DE-P00/009
Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho	CCP	DNIT 048/2004- ES
Sub-base de cimento de concreto Portland compactada com rolo	CCR	DNIT 056/2013- ES
Regularização do subleito	SL	DNIT 137/2010-ES



**MINAS  
GERAIS**

GOVERNO  
DIFERENTE.  
ESTADO  
EFICIENTE.

**accenture**consulting

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**

**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

## **6. SEÇÕES TÍPICAS**



**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**

**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02



Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do  
Rodoanel da Região Metropolitana de BH



**MINAS  
GERAIS**

GOVERNO  
DIFERENTE.  
ESTADO  
EFICIENTE.

**accenture**consulting

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**

**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

**ANEXOS**



**RODOANEL  
METROPOLITANO**  
DE BELO HORIZONTE

Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do  
Rodoanel da Região Metropolitana de BH

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**

**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

ANÁLISE MECANÍSTICA

\* \* \* SISTEMA ELASTICO 6 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.300	8.000
2	3500.	.350	12.000
3	75000.	.200	20.000
4	922.	.400	SEMI-INFINITO

FOUR CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF  
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2  
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO		
CARGA	X (CM)	Y (CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000
3	176.100	.000
4	204.900	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF. (S) - (CM)  
Z= .01 7.99 39.99 40.01  
PONTO(S) X-Y - (CM)  
X= .00 14.40  
Y= .00 .00

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ  
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS  
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -  
SETOR DE COMPUTACAO

\* \* \* SISTEMA ELASTICO 6 -

Z= .01 CAMADA NO. 1  
X= .00 14.40  
Y= .00 .00

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2****Data:** 13/10/2020**Versão:** 02

```
TENSOES NORMAIS
SXX      -9.66      .52
SYY      -11.34     -6.41
SZZ      -5.62      -.09
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY      .0000E+00   .0000E+00
SXZ      -.1464E-03  .1471E-04
SYZ      .0000E+00   .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1     -5.62      .52
PS 2     -9.66      -.09
PS 3     -11.34     -6.41
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1     .2857E+01   .3464E+01
PSS2     .2017E+01   .3069E+00
PSS3     .8399E+00   .3157E+01
DESLOCAMENTOS
UX       .1672E-02   .9968E-03
UY       .0000E+00   .0000E+00
UZ       .3509E-01   .3400E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX      -.1305E-03   .7062E-04
EYY      -.1929E-03  -.1867E-03
EZZ      .1931E-04   .4782E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY      .0000E+00   .0000E+00
EXZ      -.1087E-07   .1093E-08
EYZ      .0000E+00   .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1     .1931E-04   .7062E-04
PE 2     -.1305E-03   .4782E-04
PE 3     -.1929E-03  -.1867E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1     .2122E-03   .2573E-03
PSE2     .1498E-03   .2280E-04
PSE3     .6240E-04   .2346E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO
```

\* \* \* SISTEMA ELASTICO 6 -

```
Z= 7.99 CAMADA NO. 1
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX      5.04      -2.75
SYY      6.35      3.86
SZZ      -2.97     -2.26
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY      .0000E+00   .0000E+00
SXZ      .9631E-01   .1545E-01
```

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2****Data:** 13/10/2020**Versão:** 02

```
SYZ      .0000E+00  .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      6.35      3.86
PS 2      5.04     -2.26
PS 3     -2.97     -2.75
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1     .4661E+01  .3303E+01
PSS2     .6565E+00  .3059E+01
PSS3     .4005E+01  .2438E+00
DESLOCAMENTOS
UX       .3745E-03  .6597E-03
UY       .0000E+00  .0000E+00
UZ       .3439E-01  .3396E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX      .1150E-03  -.9217E-04
EYY      .1638E-03  .1532E-03
EZZ     -.1824E-03  -.7410E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY      .0000E+00  .0000E+00
EXZ      .7154E-05  .1148E-05
EYZ      .0000E+00  .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1     .1638E-03  .1532E-03
PE 2     .1150E-03  -.7408E-04
PE 3    -.1825E-03  -.9219E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1     .3463E-03  .2454E-03
PSE2     .4877E-04  .2273E-03
PSE3     .2975E-03  .1811E-04
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO
```

\* \* \* SISTEMA ELASTICO 6 -

```
Z= 39.99 CAMADA NO. 3
X=      .00      14.40
Y=      .00      .00
TENSOES NORMAIS
SXX      3.34      3.79
SYY      4.48      4.83
SZZ     -.18     -.19
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY      .0000E+00  .0000E+00
SXZ     .2502E-01  .6431E-02
SYZ      .0000E+00  .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      4.48      4.83
PS 2      3.34      3.79
PS 3     -.18     -.19
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1     .2332E+01  .2513E+01
```

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2****Data:** 13/10/2020**Versão:** 02

```
PSS2 .5718E+00 .5230E+00
PSS3 .1760E+01 .1990E+01
DESLOCAMENTOS
UX -.1091E-02 -.5548E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2796E-01 .2865E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .3304E-04 .3812E-04
EYY .5134E-04 .5486E-04
EZZ -.2328E-04 -.2556E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .8006E-06 .2058E-06
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .5134E-04 .5486E-04
PE 2 .3305E-04 .3812E-04
PE 3 -.2329E-04 -.2556E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .7463E-04 .8042E-04
PSE2 .1830E-04 .1674E-04
PSE3 .5633E-04 .6368E-04
1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO
```

\* \* \* SISTEMA ELASTICO 6 -

```
Z= 40.01 CAMADA NO. 4
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.06 -.06
SYY -.05 -.05
SZZ -.18 -.19
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00
SXZ .2409E-01 .6423E-02
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.05 -.05
PS 2 -.06 -.06
PS 3 -.19 -.19
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .6816E-01 .7074E-01
PSS2 .3696E-02 .5358E-02
PSS3 .6446E-01 .6538E-01
DESLOCAMENTOS
UX -.1092E-02 -.5555E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2795E-01 .2865E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
```

**Projeto de Pavimento – Trecho Norte 2**

**Data:** 13/10/2020

**Versão:** 02

```
EXX .3308E-04 .3816E-04
EYY .5139E-04 .5491E-04
EZZ -.1485E-03 -.1594E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .7317E-04 .1951E-04
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .5139E-04 .5491E-04
PE 2 .4017E-04 .3864E-04
PE 3 -.1556E-03 -.1599E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .2070E-03 .2148E-03
PSE2 .1122E-04 .1627E-04
PSE3 .1958E-03 .1985E-03
1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO
```