

# RELATÓRIO DE PROJETOS

## Pavimentação

Empreendimento:

**Vicinal VC-371**

BRASÍLIA - 2019



ARQUITETURA + URBANISMO

CLN 107 BL. B SL. 210 - CEP 70.743-520  
BRASÍLIA - DF FONE 61 3274 3200

# SUMÁRIO

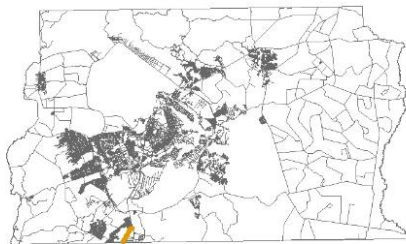
---

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA VC-371.....</b>	<b>4</b>
<b>PROJETO GEOMÉTRICO .....</b>	<b>6</b>
1. Alinhamentos horizontais .....	6
<b>PAVIMENTAÇÃO.....</b>	<b>9</b>
1. Caracterização do subleito .....	9
2. Determinação do Número N.....	10
3. Classificação das vias .....	15
4. Estudo Geotécnico do Subleito .....	16
5. Definição dos parâmetros de projeto.....	22
6. Dimensionamento do Pavimento pelo método Empírico.....	24
7. Análise mecanística do pavimento da rodovia VC-371 .....	27
8. Estrutura final de pavimento escolhido para a rodovia VC-371.....	47

# INTRODUÇÃO

O presente relatório tem como finalidade apresentar os documentos técnicos que compõem o Caderno de Pavimentação referente à pavimentação da VC-371, localizada na região administrativa de Santa Maria – RA XIII – DF.

Trata-se da pavimentação da VC-371, rodovia que liga a BR-040 a DF-490.



Visualização da VC-371 em relação ao limite do Distrito Federal.

## Legenda

- VC-371
- Vias locais / Rodovias
- Área de projeto



Universal Transverse de Mercator  
UTM  
0 300 600 1.200 m  
Datum: Sirgs 2000



Figura 1 - Localização da rodovia VC-371

## LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA VC-371

A rodovia a ser pavimentada está situada na Região Administrativa de Santa Maria – RA XIII, limita-se ao norte com a BR-040 e ao sul com a DF-490. Possuindo aproximadamente 2,5 km de extensão. É uma via simples de terra, de sentido duplo, com uma faixa de rolamento por sentido e sem velocidade regulamentada. Não possui sinalização em nível, nem passagem de pedestre.



Figura 2: Localização da área de projeto.





**Figura 3: Via de projeto e circunvizinhança.**

# PROJETO GEOMÉTRICO

---

O Projeto Geométrico inclui a pavimentação da VC-371, a implantação de 2 rótulas e de faixas de aceleração e desaceleração na BR-040.

O estaqueamento mostrado nas tabelas e nos projetos em anexo refere-se apenas aos itens projetados.

## 1. Alinhamentos horizontais

O traçado foi detalhado nos seguintes eixos, descritos abaixo:

**Tabela 1 – Eixos do projeto**

VC-371			
Eixo	Localização	Estacas	Extensão (m)
1	TRECHO 01	0+0.00 À 102+9.82	2049.82
2	TRECHO 02	0+0.00 À 60+9.57	1209.57
3	TRECHO 03	0+0.00 À 33+16.86	676.86

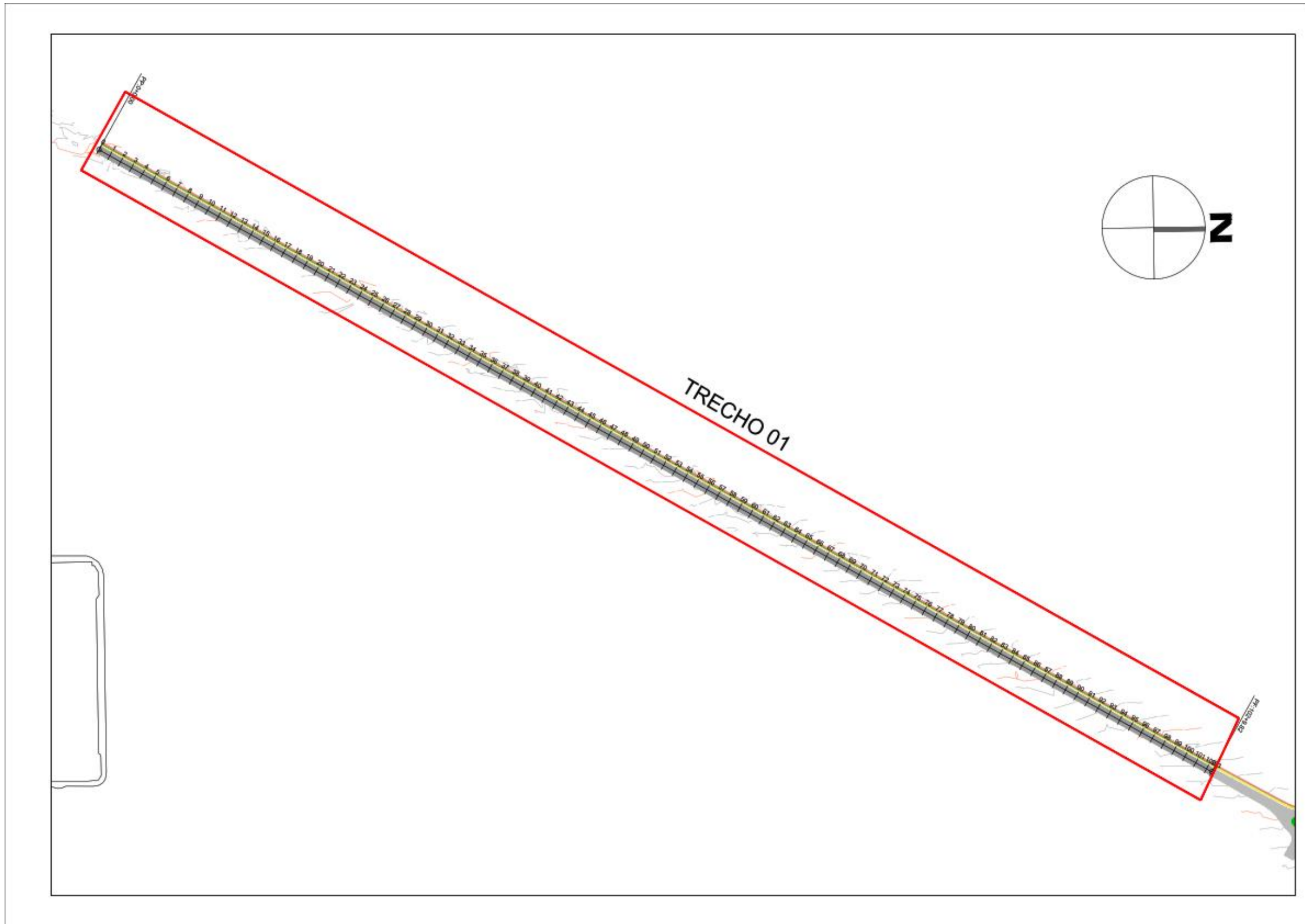


Figura 4: Divisão dos trechos - trecho 01

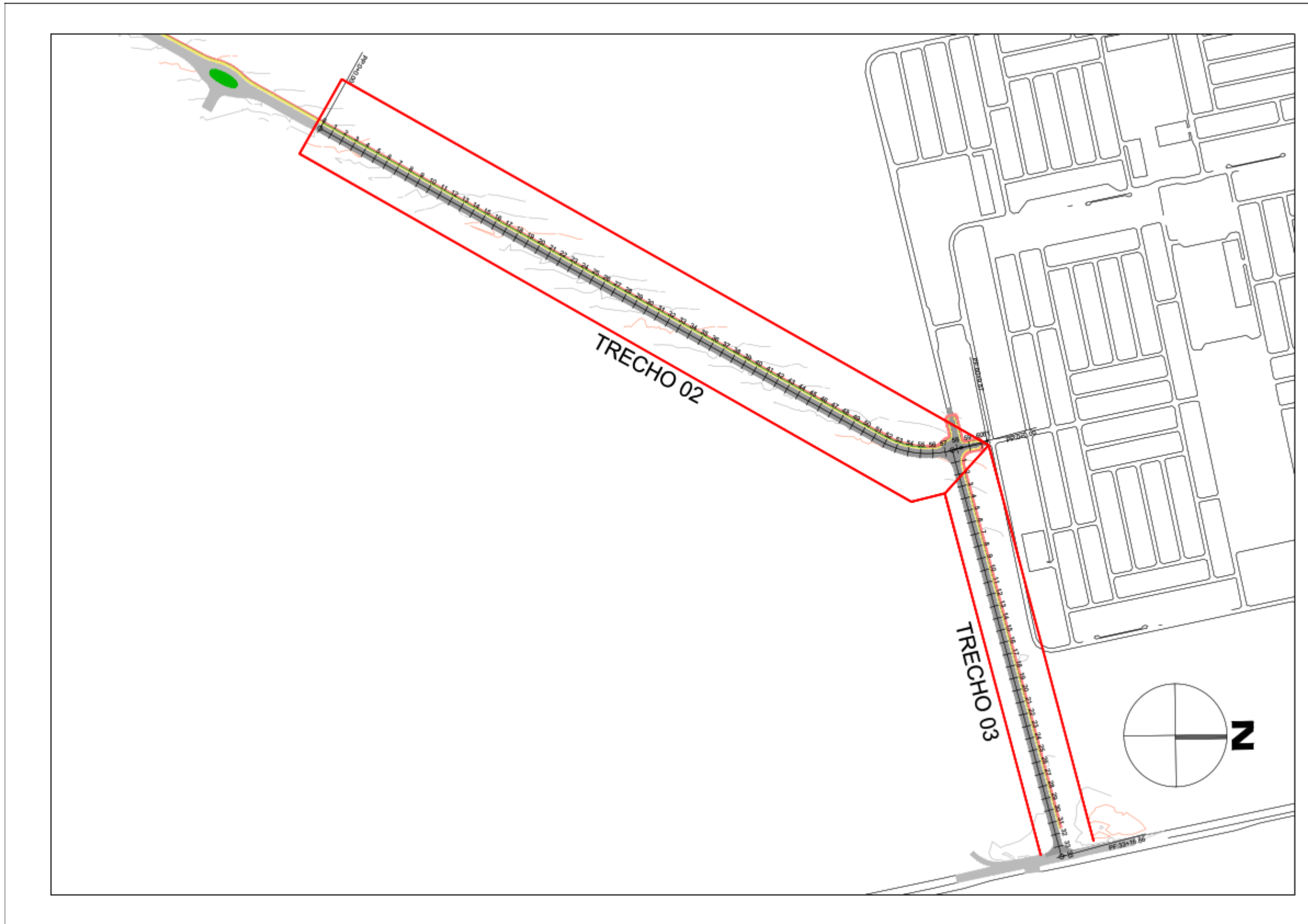


Figura 5: Divisão dos trechos – trecho 02 e trecho 03



## PAVIMENTAÇÃO

---

O dimensionamento do pavimento constitui na determinação do subleito, sub-base, base e revestimento (capa), de forma que essas camadas sejam suficientes para resistir, transmitir e distribuir as pressões resultantes da passagem dos veículos ao subleito, sem que o conjunto sofra ruptura, deformações apreciáveis ou desgaste superficial excessivo.

O revestimento detalhado possuirá, essencialmente o revestimento constituído por concreto asfáltico usando a quente (CAUQ), base em brita graduada tratada com cimento, sub-base em brita graduada simples e subleito em solo local.

Foi utilizado no presente estudo para o dimensionamento do pavimento, o **método da Prefeitura Municipal de São Paulo – PMSP**, métodos estes amplamente utilizados para dimensionamento de pavimentos urbanos. Conforme será apresentado a seguir, se leva em consideração o tipo de tráfego apresentado pelas vias, cuja classificação será feita mais adiante:

Portanto, será utilizada a seguinte norma de dimensionamento de pavimento:

- IP05/2004 – Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego meio pesado, pesado e muito pesado e faixa exclusiva de ônibus.
- IP-04/2004 – Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio.
- IP-DE-P00/001 Instrução de Projeto de Pavimentos do DER-SP;

### 1. Caracterização do subleito

Os serviços geotécnicos foram desenvolvidos e divididos basicamente em serviços de campo e de escritório, com a finalidade de conhecer as camadas destinadas ao subleito, executados segundo procedimentos normatizados, conforme:

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo;
- Métodos de Ensaio / DER-SP; e
- Métodos de Ensaio / DNIT.

Os serviços de campo compreenderam: reconhecimento preliminar de campo, através de sondagem a trado e amostragem sistemática.

De posse das informações preliminares, obtidas em mapas geológicos e geotécnicos de regiões próximas, realizou-se uma vistoria no campo por profissionais especializados, de comprovada experiência na área e com conhecimentos geológicos e geotécnicos, na qual procurou-se obter as seguintes informações básicas:

- Existência ou não de revestimento primário (presença de materiais pétreos, escória ou entulho de boa qualidade) nas vias;
- Condições topográficas e aspectos ligados a drenagem superficial e profunda das vias em questão;
- Identificação expedita (táctil-visual) do subleito, considerando cor, macroestrutura, mineralogia e granulometria;
- Condições Topográficas e Aspectos Ligados a Drenagem Superficial.

Quanto aos ensaios geotécnicos para a caracterização do subleito, foram realizadas a campanha de sondagem a trado na área de projeto bem como a caracterização do subleito local, que por sua vez determinará o CBR local a ser utilizado no projeto. Os laudos de sondagem são apresentados em anexo a este relatório.

## **2. Determinação do Número N**

O número equivalente “N” necessário ao dimensionamento do pavimento é definido pelo número de repetições equivalentes de um eixo padrão de 8,2 tf (18.000 lb) durante o período de vida útil do projeto.

Na determinação do Número “N” são considerados fatores relacionados ao tráfego e respectivas categorias de veículos, definida em função da carga e do número de eixos dos veículos. Seus valores anuais e acumulados durante o período de projeto são calculados com base nas projeções de trânsito sendo necessário para isso o conhecimento qualitativo e quantitativo da composição dos veículos. Esses dados foram obtidos das contagens classificatórias realizadas em 20 de março de 2018.

Os Fatores de Equivalência de Cargas são utilizados no dimensionamento de pavimentos, introduzidos pela AASHO (atual AASHTO, American Association of

Highways and Transportation Officials) e pelo Bureau of Public Road, atual FHWA (Federal Highways Administration).

Os Fatores de Equivalência de Cargas são definidos como um número de repetições de uma solicitação determinada que é necessário para produzir uma deterioração de mesma magnitude que a produzida por uma aplicação da solicitação padrão.

O eixo padrão rodoviário brasileiro é um eixo simples de rodas duplas que transmite ao pavimento uma carga total de 8,2 toneladas (80 kN). Neste eixo a superfície de contato dos pneus com o pavimento é representada por uma área circular de 10,8 cm de raio e tensão de contato de 5,6 kgf/cm<sup>2</sup>.

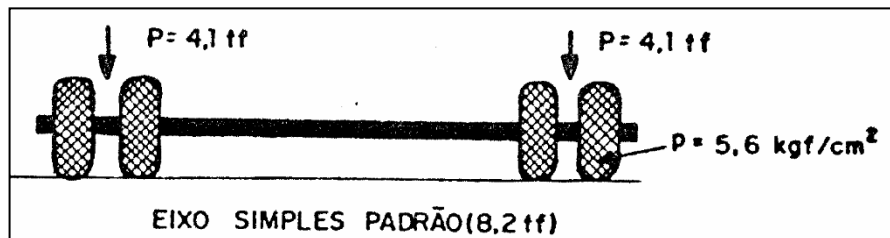


Figura 6: Padrão de eixo brasileiro e tensão de contato.

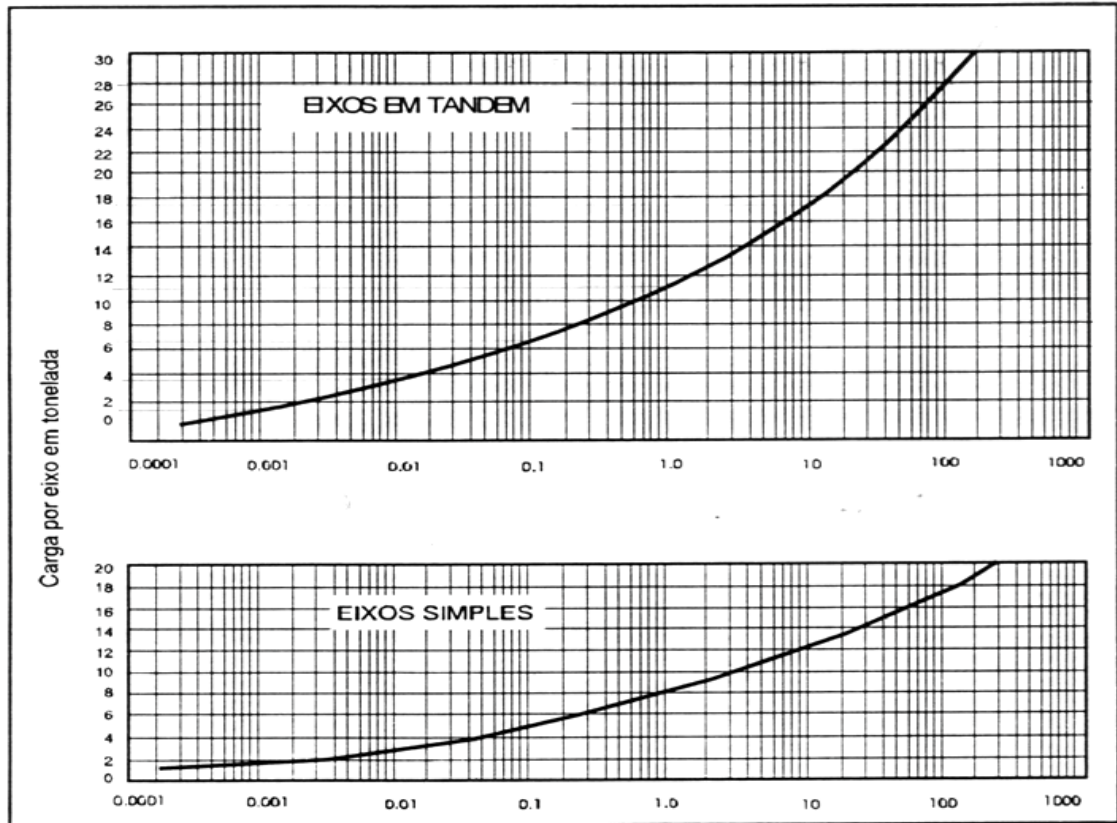


Figura 7: Relação da carga por tipo de eixo padrão rodoviário.

O número “N” é calculado pela seguinte expressão, conforme mostrado na tabela seguinte:

$$N = 365 \times FR \times FP \times FV \times \sum_{i=1}^p VMD_i$$

onde:

$FP$  é o Fator de Pista (vide tabela);

$FR$  é o Fator Climático Regional (vide Tabela);

$VMD_i$  é Volume Médio Diário no ano  $i$ ;

$P$  é o período de projeto;

$FV$  é o Fator de Veículo relativo ao tráfego da rodovia, calculado pela expressão:

$$FV = \frac{\sum p_i \times FV_i}{100}$$

onde:

$p_i$  é a percentagem de veículos da categoria  $i$

$FV_i$  é o fator de veículo da categoria de veículos  $i$



O Fator de Veículo transforma qualquer tipo de veículo em uma quantidade de solicitações padrão equivalente do eixo de 8,2 toneladas. Utiliza-se o Fator de Eixo para determinar o número médio de eixos por veículo em circulação.

$$FE = \sum (NE \times \% NE)$$

Onde:

*NE* é o número eixos do veículo

*%NE* é a porcentagem de determinado tipo de veículo em relação ao total.

O Fator Climático Regional (FR) é utilizado para considerar as variações de umidade às quais o pavimento está sujeito ao longo do ano. A Tabela apresenta os Fatores climáticos regionais sugeridos para o Brasil, em função da altura média anual de chuva em milímetros.

**Tabela 01 – Fator Climático Regional (FR)**

Altura média anual de chuva	Fator Climático Regional
Até 800	0,7
De 800 a 1500	1,4
Mais de 1500	1,8

Foi estabelecido o Número N para a VC-371 a partir das contagens veiculares realizadas em rodovias próximas e análises e comparações com outras rodovias do DF.

Foi utilizada a taxa de crescimento geométrico de 4,15% para veículos leves e pesados para um horizonte de 10 (dez) anos, ano 2031.

Para o cálculo do Numero N, foram considerados os volumes gerados pelos veículos pesados, portanto Caminhão e Onibus.

O Número N para a **VC-371** ao longo do período do projeto está mostrado nos resultados da tabela seguinte. O N obtido foi pela USACE **3,70 X 10<sup>6</sup>** e pelo AASHTO **2,82 x 10<sup>6</sup>**. Sendo adotado por fator de segurança o valor **3,70 X 10<sup>6</sup>**



### 3. Classificação das vias

Foi considerado como parâmetro de classificação das vias a Instrução de Projeto IP 02/2004, da Prefeitura Municipal de São Paulo.

Tabela 3 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego. Fonte IP 02/2004 - DNIT

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto	Volume inicial faixa mais carregada		Equivalente / Veículo	N	N característico
			Veículo Leve	Caminhão/ Ônibus			
Via local	LEVE	10	100 a 400	4 a 20	1,50	2,70 x 10 <sup>4</sup> a 1,40 x 10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>
Via Local e Coletora	MÉDIO	10	401 a 1500	21 a 100	1,50	1,40x 10 <sup>5</sup> a 6,80x 10 <sup>5</sup>	5 x 10 <sup>5</sup>
Vias Coletoras e Estruturais	MEIO PESADO	10	1501 a 5000	101 a 300	2,30	1,4 x 10 <sup>6</sup> a 3,1 x 10 <sup>6</sup>	2 x 10 <sup>6</sup>
	PESADO	12	5001 a 10000	301 a 1000	5,90	1,0 x 10 <sup>7</sup> a 3,3 x 10 <sup>7</sup>	2 x 10 <sup>7</sup>
	MUITO PESADO	12	> 10000	1001 a 2000	5,90	3,3 x 10 <sup>7</sup> a 6,7 x 10 <sup>7</sup>	5 x 10 <sup>7</sup>
Faixa Exclusiva de Ônibus	VOLUME MÉDIO	12		< 500		3 x 10 <sup>6</sup> (1)	10 <sup>7</sup>
	VOLUME PESADO	12		> 500		5 x 10 <sup>7</sup>	5 x 10 <sup>7</sup>

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

**Notas:**

(1) Majorado em função do tráfego (excesso de frenagem e partidas)

(2) Números de solicitações adotadas:

$$N = 365 \times 10 \times V_o \times 1,25 \times e = 4560.V_o.e$$

$$N = 365 \times 12 \times V_o \times 1,30 \times e = 5690.V_o.e$$

Considerando somente o volume de caminhões e ônibus e taxa de crescimento de 5% a.a.

(3) Equivalente expresso em n<sup>2</sup> de solicitações do eixo padrão de 82 kN (equivalência do DNIT).

(4) O período de projeto adotado é de 10 anos, em função da duração máxima da camada asfáltica de revestimento (oxidação de ligante), sendo o período recomendado pelo método de dimensionamento do DER/SP (667122), DNIT, e embasado no método da AASHTO.

(5) Para o tráfego muito pesado e corredores de ônibus adotou-se o período de 12 anos, em função de apresentar estruturas robustas e criteriosamente dimensionadas, levando-se em conta estudos mecanicistas das camadas do pavimento, bem como em alguns casos a adoção de estruturas cimentadas.

Portanto, a via VC-371 está classificada como via de tráfego **meio pesado**.



## 4. Estudo Geotécnico do Subleito

Foram realizados ensaios nos seguintes pontos, e seguem os resultados anexo:



Figura 8: Localização das sondagens.



Para fins de dimensionamento das estruturas de pavimentação, o subleito é definido por sua capacidade portante, determinada em função do percentual do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR).

Foram efetuados os seguintes procedimentos para análise do subleito:

- Sondagens a trado até a profundidade de 1,5 metros, visando à coleta de amostras para posterior análise laboratorial;
- Determinação da curva granulométrica do material e determinação do CBR (ISC – Índice de Suporte Califórnia – NBR-9895) do material de subleito, compactado com energia de 100% Proctor Normal;
- Determinação dos limites de Atterberg: Liquidez e plasticidade (NBR-6459 e NBR-7180), além da determinação da densidade natural, da umidade natural e da densidade dos grãos.

Tabela 4: Resumo dos parâmetros de compactação e ISC para a VC-371.

Programa de Ensaio	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Wotm (%)	ISC (%)	Expansão (%)
ST-1	1417	28,5	7,1	0,13
ST-2	1368	28,3	7,8	0,08
ST-3	1404	30,1	8,6	0,12
ST-4	1414	29,9	9,0	0,09
ST-5	1407	28,0	10,0	0,07
ST-6	1370	29,5	8,2	0,11
ST-7	1395	30,0	8,8	0,08
ST-8	1381	30,6	8,5	0,16
ST-9	1379	29,6	7,8	0,10
ST-10	1361	28,9	8,2	0,17
ST-11	1406	30,6	9,0	0,11
ST-12	1387	30,5	6,8	0,11
ST-13	1405	29,8	7,3	0,09
ST-14	1420	29,5	10,0	0,10
ST-15	1405	30,5	10,0	0,07
ST-16	1418	26,9	9,8	0,07
ST-17	1470	27,6	9,2	0,06
ST-18	1428	29,9	8,0	0,10
ST-19	1442	27,2	9,7	0,08
ST-20	1503	28,3	9,9	0,06
ST-21	1615	19,6	10,0	0,09
ST-22	1782	13,8	14,0	0,01
ST-23	1762	12,8	15,8	0,01

Legenda: =  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  Densidade seca máxima; Wotm = Umidade ótima; ISC: Índice de Suporte Califórnia.

Boletim de sondagem

LOCAL		OBJETO:			
SANTA MARIA/DF		SONDAGEM A TRADO PARA PAVIMENTAÇÃO			
DATA:		SEGMENTO:			
JULHO / 2019		DF 400			
ESTUDO:					
SUBLEITO					
REGISTRO	N.A (m)	PROFUND. (m)		CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA	
ST 01	-	0,00	0,10	Camada vegetal	
		0,10	0,30	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,30	1,55	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 02	-	0,00	0,18	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,18	1,60	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 03	-	0,00	0,22	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,22	1,60	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 04	-	0,00	0,18	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,18	1,56	Argila pouco arenosa vermelha	
SP 05	-	0,00	0,25	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,25	1,55	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 06	-	0,00	0,19	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,19	1,55	Argila pouco arenosa vermelha	
SP 07	-	0,00	0,18	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,18	1,55	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 08	-	0,00	0,10	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,10	1,56	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 09	-	0,00	0,15	Camada vegetal	
		0,15	1,50	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 10	-	0,00	0,13	Camada vegetal	
		0,13	1,50	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 11	-	0,00	0,14	Camada vegetal	
		0,14	1,50	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 12	-	0,00	0,20	Camada vegetal	
		0,20	1,58	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 13	-	0,00	0,10	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, vermelha (aterro)	
		0,10	1,55	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 14	-	0,00	0,13	Camada vegetal	
		0,13	1,60	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 15	-	0,00	0,10	Camada vegetal	
		0,10	1,55	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 16	-	0,00	0,09	Camada vegetal	
		0,09	1,60	Argila pouco arenosa vermelha	
ST 17	-	0,00	0,30	Argilo pouco arenosa com lixo	
		0,30	1,82	Argila pouco arenosa vermelha	

LOCAL		OBJETO:		
SANTA MARIA/DF		SONDAGEM A TRADO PARA PAVIMENTAÇÃO		
DATA:		SEGMENTO:		
JULHO / 2019		DF 490		
ESTUDO:				
<b>SUBLEITO</b>				
REGISTRO	N.A (m)	PROFUND. (m)		CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA
ST 18	-	0,00	0,11	Camada vegetal
		0,11	1,55	Argila pouco arenosa vermelha
ST 19	-	0,00	0,32	Argila pouco arenosa com lixo
		0,32	1,85	Argila pouco arenosa vermelha
ST 20	-	0,00	0,45	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, variegada (aterro)
		0,45	1,62	Argila arenosa vermelha
ST 21	-	0,00	0,11	Camada vegetal
		0,11	1,58	Argila arenosa vermelha
SP 22	-	0,00	0,12	Camada vegetal
		0,12	1,55	Areia argilosa amarela
ST 23	-	0,00	0,18	Argila pouco arenosa, p/ pedregulhosa, variegada (aterro)
		0,18	1,56	Areia argilosa cinza

De posse dos dados geotécnicos, os resultados dos ensaios para fins de dimensionamento de pavimento foram tratados estatisticamente por meio da distribuição *t de Student*, considerando uma distribuição normal.



ANÁLISE ESTATÍSTICA DO SUBLEITO - Distribuição t de Student - DER/SP

Nº DO FURO	CBR (%)			
1	7,10		n =	23
2	7,80		n-1=	22
3	8,60		SOMA =	213,50
4	9,00		MÉDIA =	9,28
5	10,00		DESVIO PADRÃO =	1,00
6	8,20		$t_{0,90}$ =	1,32
7	8,80			
8	8,50		CBR <sub>p</sub> (%) =	9,01
9	7,80			
10	8,20			
11	9,00			
12	6,80			
13	7,30			
14	10,00			
15	10,00			
16	9,80			
17	9,20			
18	8,00			
19	9,70			
20	9,90			
21	10,00			
22	14,00			
23	15,80			

Para o projeto foi adotado o ISC de 7% por segurança, por ser um índice de suporte tecnicamente aceitável e para não dificultar a execução da obra com a necessidade de reforçar o subleito. Reforça essa premissa de projeto o fato de inexistir até o momento jazidas de materiais competentes licenciadas ou disponíveis. Em momento oportuno, pode verificar a possibilidade de utilização dos matérias existentes

nos pontos que apresentam pedregulho como camada de sub-base em material puro ou composição com cimento, visando a economicidade da obra.

Entre os furos de sondagem 11 e 13, em virtude do ISC de 6,80% ser muito próximo do ISC de projeto (7%) não será indicada a substituição do material do subleito, mas seu melhoramento com cal na proporção de 3% em massa.

## 5. Definição dos parâmetros de projeto

- **Tráfego Estimado**

O projeto foi elaborado de maneira a estimar o tráfego da rodovia EVC-371 incrementando a atratividade esperada para a rodovia em função de ligação entre a BR-040 e DF-290. Para tanto foi incrementado todo o volume de veículos de carga e coletivos que transitam na BR-040 e que acessam a DF-290 no dia. Assim, a incidência total do tráfego no período de projeto, expressa pelo número "N" de solicitações do eixo padrão simples de 10 t, foi adotada conforme exposto abaixo:

**Rodovia VC-371**

**N = 3,70 x 10<sup>6</sup> solicitações**

- **Fator Climático Regional (Caso Tráfego Médio – DNER 667/22 de 81)**

Para levar em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano (o que se traduz em variações de capacidade de suporte dos materiais), adotou-se um Fator Climático Regional (FR) igual a 1,0, visto que o adotado pela AASHTO varia de 0,2 a 5,0 (ocasião de extrema saturação dos materiais).

- **Coefficientes de Equivalência Estrutural (K)**

O coeficiente de equivalência estrutural de um material, que é definido como a relação entre as espessuras de uma base granular e de uma camada com material que apresenta o mesmo comportamento, foi definido conforme os materiais previamente selecionados, mostrados na Tabela 5, a seguir.

**Tabela 5 - Coeficientes de equivalência estrutural**

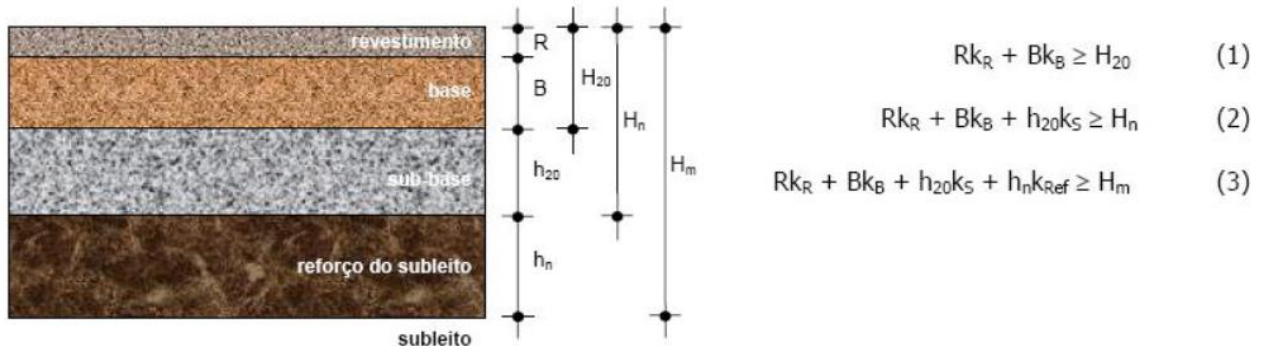
<b>CAMADA DO PAVIMENTO</b>	<b>COEFICIENTE ESTRUTURAL (K)</b>
Base ou Revestimento de Concreto Asfáltico	2,00
Base ou Revestimento de Concreto Magro/Compactado com Rolo	2,00
Base ou Revestimento de Pré-Misturado a Quente, de Graduação Densa / BINDER	1,80
Base ou Revestimento de Pré-Misturado a Frio, de Graduação Densa	1,40
Base ou Revestimento Asfáltico por Penetração	1,20
Paralelepípedos	1,00
Base de Brita Graduada Simples, Macadame Hidráulico e Estabilizadas Granulometricamente	1,00
Sub-bases Granulares ou Estabilizadas com Aditivos	≤ 1,00
Reforço do Subleito	≤ 1,00
Base de Solo-Cimento ou BGTC, com resistência á compressão aos 7 dias, superior a 4,5 MPa	1,70
Base de BGTC, com resistência à compressão aos 7 dias, entre 2,8 e 4,5 MPa	1,40
Base de Solo-Cimento, com resistência à compressão aos 7 dias, menor que 2,8 e maior ou igual a 2,1 MPa	1,20
Base de Solo melhorado com Cimento, com resistência à compressão aos 7 dias, menor que 2,1 MPa	1,00

Os coeficientes de equivalência estrutural das principais camadas dos pavimentos foram designados genericamente por:

- KR = coeficiente estrutural da camada de revestimento;
- KB = coeficiente estrutural da camada de base;
- KS = coeficiente estrutural da camada de sub-base; e
- Kref = coeficiente estrutural da camada de reforço.

- **Determinação das Espessuras das Camadas do Pavimento**

De posse dos parâmetros descritos anteriormente e com os materiais a serem utilizados na estrutura do pavimento, foram determinadas espessuras das camadas do pavimento, conforme esquema abaixo:



**Figura 9 - Camadas do pavimento**

Onde:

- m  $H_m$  = espessura total necessária para proteger um material com ISC = m
- $H_n$  = espessura da camada de pavimento com ISC = n
- $H_{20}$  = espessura de pavimento sobre a sub-base
- $h_{20}$  = espessura da sub-base
- B = espessura da base
- R = espessura do revestimento.

## 6. Dimensionamento do Pavimento pelo método Empírico

### Espessura Total do Pavimento (H<sub>m</sub>)

Em função do tipo de tráfego previsto e de posse do suporte representativo do subleito (CBR= 7%), conforme já citado, a espessura total básica (H<sub>m</sub>) das camadas do pavimento, em termos granulares, foi fixada de acordo com o ábaco de dimensionamento demonstrado a seguir.



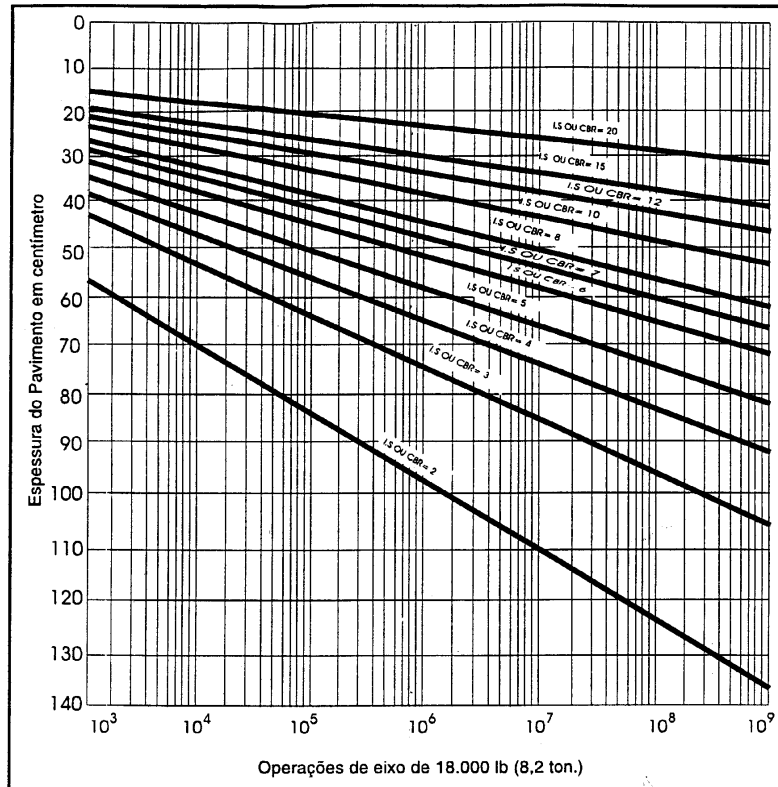


Figura 10 - Ábaco de dimensionamento para vias de tráfego pesado.

Tabela 6 - Valores tabelados para espessura de pavimento

CBR	MEIO PESADO	PESADO	MUITO PESADO	CORREDOR MÉDIO	CORREDOR PESADO
2	100	113	119	110	119
3	78	88	92	85	92
4	67	76	80	73	80
5	60	68	71	65	71
6	53	60	63	58	63
7	49	55	61	53	59
8	45	51	55	50	55
9	43	48	51	47	51
10	40	45	46	43	46
12	35	39	40	38	40
15	30	34	35	33	35
20	25	28	30	27	30

Com base no ábaco apresentado acima, e de acordo com os valores do número N para as rodovias, conclui-se que a VC-371 é classificada como vias de tráfego meio pesado.

**Assim, obtêm-se 45 cm de espessura total para seu pavimento.**

Uma vez obtendo a espessura total para o tipo de pavimento através do ábaco, procede-se a determinação das camadas de revestimento, base e sub-base, tendo

como parâmetro seus coeficientes de equivalência estrutural e suas capacidades de suporte, traduzidas pelos seus respectivos CBRs.

O cálculo das espessuras de base (B), sub-base (h<sub>20</sub>) – quando houver – e do reforço do subleito (hm), serão obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

- $R \times KR + B \times KB \geq H_{20}(1)$
- $R \times KR + B \times KB + h_{20} \times KS \geq H_n(2)$
- $R \times KR + B \times KB + h_{20} \times KS + hm \times Kref \geq H_m(3)$

Para N acima de 10<sup>7</sup> o DNER indica adotar 1,20 x H<sub>20</sub>, o que não se aplica ao caso em questão.

### Tipo e Espessura da Camada de Rolamento

No que diz respeito às camadas betuminosas, recomenda-se a adoção de uma espessura mínima no intuito de se proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego e evitar a ruptura do revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. Esse valor mínimo para a espessura de revestimento foi determinada para a rodovia VC-371 e é apresentada a seguir:

Tabela 7 - Espessuras mínimas de revestimento para a rodovia VC-371 (N = 3,37 x 10<sup>6</sup> solicitações).

N	Espessura Mínima do Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

O revestimento será constituído de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) na espessura R = 5,0 cm para as rodovias.

$$N_{USACE} = 3,70 \times 10^6 \rightarrow R = 5,0 \text{ cm}$$

$$N_{AASHTO} = 2,82 \times 10^6$$

$$CBR_{proj} = 7,0\% \rightarrow H_{20} = 25,0 \text{ cm}, H_n = 50,0 \text{ cm}$$

**- Cálculo da camada de Base para a rodovia VC-371:**

$$R \times KR + B \times KB \geq H_{20}$$

$$5,0 \times 2,0 + B \times 1,00 \geq 25 \text{ cm}$$

$$10 + B \geq 25 \text{ cm}$$

$$B \geq 15 \text{ cm} = \text{Adotado } 15 \text{ cm}$$

**- Cálculo da camada de Sub-Base da VC-371:**

$$R \times KR + B \times KB + h_{20} \times KS \geq H_n$$

$$5,0 \times 2,0 + 15 \times 1,0 + h_{20} \times 1 \geq 50 \text{ cm}$$

$$10 + 15 + h_{20} \geq 50 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 25,00 \text{ cm} = \text{Adotado } 25 \text{ cm}$$

Portanto, a estrutura de pavimento obtida por meio do método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis para a rodovia VC-371 é a indicada na Figura 10.

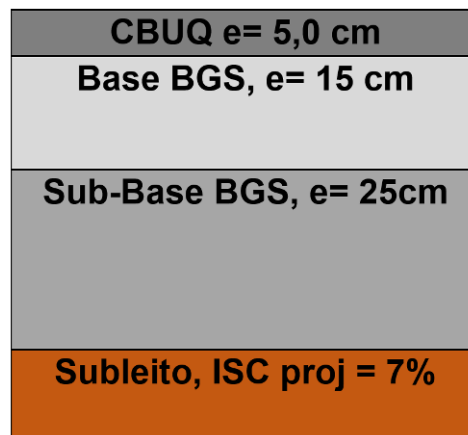


Figura 51: Estrutura de pavimento obtida para a rodovia VC-371 – Método Empírico

## 7. Análise mecânica do pavimento da rodovia VC-371

### METODOLOGIA ADOTADA

Programa de Computador e Modelos de Previsão de Desempenho Utilizados.

Para a realização da análise mecânica das soluções de pavimentação da rodovia DF-371 foram consideradas as diretrizes constantes da Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP (IP-DE-P00/001).

A análise mecânica de pavimentos consiste na avaliação das tensões e deformações em pontos específicos da estrutura, provocadas pelo carregamento do tráfego, e na aplicação de modelos de previsão de desempenho.

De acordo com Medina e Motta (2005), no dimensionamento mecânico parte-se de espessuras admitidas para as camadas do pavimento e calcula-se o estado de tensões e deformações com o objetivo de comparar com valores limites estabelecidos.

Para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos na estrutura de pavimento admitida são utilizados programas computacionais. Os valores obtidos são então comparados com valores admissíveis calculados por meio dos modelos de fadiga e deformação permanente disponíveis na literatura, até se chegar a uma estrutura compatível com o tráfego previsto para o período de projeto.

De forma geral, adota-se um modelo estrutural para as camadas do pavimento e para o carregamento do tráfego e, com o auxílio de um software específico, são calculadas as tensões e deformações em determinados pontos da estrutura. Os valores calculados são então comparados com valores admissíveis obtidos mediante a aplicação de modelos de previsão de desempenho.

Para **pavimentos flexíveis** normalmente são verificados os seguintes critérios:

- **Deflexão:** verifica-se o deslocamento vertical recuperável na superfície do revestimento;
- **Fadiga do revestimento asfáltico:** verifica-se a deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico;
- **Subleito:** verifica-se a deformação específica vertical no topo do solo de fundação (subleito).

No caso de **pavimentos semirrígidos**, além dos critérios listados anteriormente, verifica-se também o problema do **trincamento por fadiga na camada de base cimentada**, que costuma ser o problema mais crítico neste tipo de pavimento.

De acordo com a Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP (IP-DE-P00/001), as cargas a serem inseridas na análise mecanicista devem simular o eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN (8,2 toneladas), utilizando quatro pontos de

aplicação de carga de 20 kN (2,05 toneladas) cada e pressão de contato pneu-pavimento de 0,56 MPa (5,6 kgf/cm<sup>2</sup>).

Para verificação das tensões e deformações na estrutura do pavimento foram tomados quatro pontos de análise:

- no eixo central de simetria do semi-eixo (X=16,2 cm; Y=0 cm);
- no centro de cada pneumático (X=0 cm; Y=0 cm) e (X=32,4 cm; Y=0 cm);
- na borda do pneumático (X=10,8 cm; Y=0 cm).

A Figura 12 a seguir ilustra o modelo estrutural considerado para avaliação do pavimento, contendo os pontos de interesse para o cálculo das tensões e deformações:

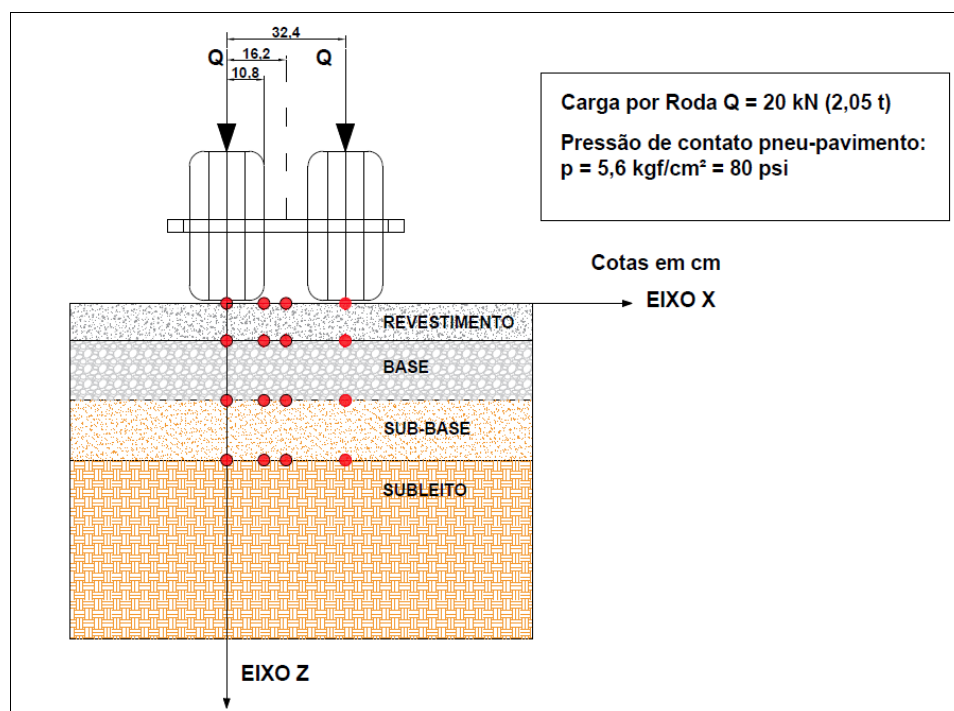


Figura 62: Modelo estrutural considerado nas análises mecânicas.

No Quadro 01 é apresentada a relação entre o ponto analisado e o tipo de defeito que se quer avaliar na estrutura do pavimento.

Localização do ponto	Resultado de Interesse	Defeito Avaliado
Topo da superfície da camada de revestimento	Deslocamento / Deflexão – (D)	Trincamento do revestimento por fadiga
Fibra inferior da camada de revestimento	Tensão ou deformação de tração – ( $\sigma_t$ e $\epsilon_t$ )	Trincamento do revestimento por fadiga

Fibra inferior da camada de base cimentada	Tensão ou deformação de tração (no caso de bases cimentadas) – ( $\sigma_t$ e $\epsilon_t$ )	Trincamento da base cimentada por fadiga
Topo da superfície da camada de subleito	Tensão ou deformação de compressão – ( $\sigma_v$ e $\epsilon_v$ )	Deformação permanente

**Quadro 1: Pontos de interesse para análise das tensões, deformações e deslocamentos em pavimentos flexíveis e semirrígidos.**

Nesta análise será utilizado o programa ELSYM5 para o cálculo das tensões e deformações solicitantes na estrutura do pavimento. A rotina de análise original do ELSYM5 foi desenvolvida pela Universidade da Califórnia, em Berkeley, e posteriormente revisada com a supervisão da FHWA (Federal Highways Administration). Trata-se de um programa desenvolvido com base na teoria das camadas elásticas e no método das diferenças finitas, considerando modelagem do tipo elástico-linear. Neste tipo de modelagem os valores dos módulos de resiliência dos materiais são constantes, isto é, não variam com o estado de tensões aplicado.

Para a seleção dos modelos de avaliação de desempenho considerados nas análises, recorreu-se às orientações da Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP (IP-DE-P00/001). Assim, foram selecionados os seguintes modelos:

*a) Deslocamento vertical recuperável (Deflexão).*

O deslocamento vertical recuperável máximo da superfície do pavimento também é denominado deflexão. Para a verificação deste critério foram consideradas as equações dos métodos DNER-PRO 011/79 e DNER-PRO 269/94:

- DNER-PRO 011/79:

$$\text{Log } D_{adm} = 3,01 - 0,174 \times \text{log } N$$

- DNER-PRO 269/94:

$$\text{Log } D_{adm} = 3,148 - 0,188 \times \text{log } N$$

Sendo:

N = número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto, segundo a metodologia do USACE;

$D_{adm}$  = deflexão admissível, em 0,01 mm;

*b) Fadiga do revestimento asfáltico*



Para a verificação da fadiga do revestimento asfáltico optou-se pela aplicação dos modelos desenvolvidos pela Federal Highways Administration (FHWA, 1976), Asphalt Institute (1976) e Pinto & Preussler (1980), todos constantes na Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP.

O modelo de Pinto & Preussler (1980) foi desenvolvido a partir de misturas dosadas com asfaltos nacionais. Este modelo foi desenvolvido com base em ensaios de fadiga de tração por compressão diametral e considera como critério de falha o trincamento em 20% da área do pavimento (trincamento nas trilhas de roda).

Na sequência são apresentadas as equações dos modelos de fadiga selecionados:

- FHWA (1976):

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

- Asphalt Institute (1976):

$$N = 2,961 \times 10^{-5} \times (1 / \varepsilon_t)^{3,291}$$

- Pinto & Preussler (1980):

$$N = 2,85 \times 10^{-7} \times (1 / \varepsilon_t)^{3,69}$$

Sendo:

N = número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto, segundo a metodologia da AASHTO;

$\varepsilon_t$  = deformação específica de tração na fibra inferior da camada de concreto asfáltico.

### c) *Fadiga na camada de base cimentada (BGTC)*

Para a verificação do critério de fadiga na camada de base cimentada, no caso brita graduada tratada com cimento, foi considerado o modelo desenvolvido na África do Sul, também indicado na Instrução de Pavimentação do DER-SP. A equação de fadiga do modelo é dada por:

$$N = 10^{7,19 \times \left(1 - \frac{\sigma_t}{8 \times \sigma_r}\right)}$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN na tensão máxima de tração sob a camada cimentada,  $\sigma_t$ , requerido para se iniciar a primeira trinca por fadiga;

$\sigma_t$ : tensão de tração atuante (kgf/cm<sup>2</sup>);

$\sigma_r$ : tensão de tração na ruptura do material (kgf/cm<sup>2</sup>);

De acordo com a Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP, à equação de fadiga da África do Sul, deve-se associar um modelo que prevê a progressão do trincamento através da camada cimentada em termos de redução do módulo de elasticidade efetivo da camada cimentada, sendo expresso pela seguinte expressão matemática:

$$\frac{E_{ef}}{E_0} = 0,1 + \frac{1}{0,505 \left( \frac{N}{N_f} \right)^2 - 0,125 \left( \frac{N}{N_f} \right) + 0,731}$$

Onde:

$E_{ef}$ : módulo de elasticidade efetivo da camada (kgf/cm<sup>2</sup>);

$E_0$ : módulo de elasticidade da mistura, camada íntegra (kgf/cm<sup>2</sup>);

$N$ : número acumulado de repetições de carga;

$N_f$ : número de repetições de carga necessário para o início do trincamento da camada (equação da África do Sul).

Outro modelo de fadiga de brita graduada tratada com cimento bastante utilizado na engenharia rodoviária é o modelo desenvolvido por **Balbo (1993)**, cuja equação é dada por:

$$N_f = 10^{(17,137-19,608.RT)}$$

Onde:

$N$ : número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto, segundo a metodologia do USACE;

$RT$ : relação de tensões ( $\sigma_t / \sigma_r$ );

O modelo desenvolvido por Balbo (1993) foi baseado em ensaios dinâmicos de compressão diametral para amostras com teores de cimento de 4% em peso e granulometria do agregado na faixa B do DER-SP.

#### *d) Deformação vertical no topo do subleito*

Para análise da deformação específica vertical de compressão atuante no topo do subleito foram consideradas as equações definidas por Dormon & Metcalf (1965) e Shell (1985), constantes da Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP, expressos pelas seguintes equações:

- Dormon & Metcalf (1965):

$$N = 6,069 \times 10^{-10} \times (1 / \varepsilon_v)^{4,762}$$

- Shell (1985) - 50% de confiabilidade:

$$N = 6,15 \times 10^{-7} \times (1 / \varepsilon_v)^{4,0}$$

- Shell (1985) - 85% de confiabilidade:

$$N = 1,94 \times 10^{-7} \times (1 / \varepsilon_v)^{4,0}$$

Sendo:

N = número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN, acumulado para o período de projeto, segundo a metodologia do USACE;

$\varepsilon_v$  = deformação específica de compressão no topo do subleito.

### Parâmetros de Resistência dos Materiais

O cálculo das tensões e deformações atuantes na estrutura do pavimento, resultantes da aplicação das cargas solicitantes, exige o conhecimento das características elásticas dos materiais, como módulo de resiliência e coeficiente de Poisson.

Estes parâmetros podem ser obtidos por meio da realização de ensaios de laboratório específicos para os materiais constituintes das camadas do pavimento. Entretanto, como não se dispõe dos referidos ensaios para os materiais indicados para a estrutura do pavimento, os valores dos módulos de resiliência e coeficientes de Poisson foram obtidos mediante consulta à valores típicos disponíveis em fontes bibliográficas.

A Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP apresenta alguns valores típicos de coeficientes de Poisson, conforme Tabela 10.

**Tabela 8: Valores usuais de coeficientes de Poisson.**

Material	Intervalo de Valores de Coeficiente de <i>Poisson</i>	Valor Recomendado de Coeficiente de <i>Poisson</i>
Concreto de cimento <i>Portland</i>	0,10 – 0,20	0,15
Materiais estabilizados com cimento	0,15 – 0,30	0,20
Misturas asfálticas	0,15 – 0,45	0,30
Materiais granulares	0,30 – 0,40	0,35
Solos do subleito	0,30 – 0,50	0,40

Na Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP também são apresentados valores típicos de módulo de resiliência ou elasticidade para os materiais das camadas de pavimentos, conforme Tabela 11.

**Tabela 9: Valores usais de módulo de resiliência ou elasticidade.**

Material	Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)
Concretos Asfálticos:	
- revestimento (CAP 50-70)	2000 – 5000
- revestimento (CAP 30-45)	2500 – 4500
- binder (CAP 50-70)	2000 – 3000
- binder (CAP 30-45)	2500 – 4000
Materiais granulares	
- brita graduada	150 – 300
- macadame hidráulico	250 – 450
Materiais estabilizados quimicamente	
- solo-cimento	5000 – 10000
- brita graduada tratada com cimento	7000 – 18000
- concreto compactado com rolo	7000 – 22000
Concreto de cimento <i>Portland</i>	30000 – 35000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito	
- solos de comportamento laterítico LA, LA', LG'	100 – 200
- solos de comportamento não laterítico	25 – 75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200 – 400
Concreto de cimento <i>Portland</i>	28000 – 45000

Para os **solos do subleito** a Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP recomenda as seguintes correlações entre módulo de resiliência e capacidade de suporte ISC:

- solos lateríticos arenosos (LA') e lateríticos argilosos (LG'):

$$MR = 22 \times ISC^{0,8} \text{ (MPa)}$$

- solos não lateríticos siltosos (NS') e não lateríticos argilosos (NG'):

$$MR = 18 \times ISC^{0,64} \text{ (MPa)}$$

- solos arenosos pouco ou não coesivos:

$$MR = 14 \times ISC^{0,70} \text{ (MPa)}$$

Para a análise em questão, será considerada a primeira expressão, referente a solos de comportamento laterítico, para a determinação do módulo de resiliência do subleito a partir do valor de ISC. Tal consideração foi baseada nos boletins de

sondagens e ensaios geotécnicos dos solos do subleito da VC-371, que mostram predominância de ocorrência de argilas típicas dos latossolos vermelhos e amarelos do Distrito Federal. A Figura 13 (Villibor e Nogami, 2009) ilustra a ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro, onde se verifica grande ocorrência no Distrito Federal.



**Figura 73: Ocorrência de solos de comportamento laterítico no Brasil (Villibor e Nogami, 2009).**

A realização de ensaios MCT em quatro pontos ao longo da EVC-371 comprovaram a existência de solos lateríticos na região, enquadrando as amostras no Grupo MCT LA-LA'. A localização desses ensaios está indicada na figura a seguir. Os ensaios realizados seguem anexo ao Relatório Geotécnico





**Figura 8: Localização das sondagens e ensaios MCT.**

Assim, considerando a classificação de solos lateríticos, tem-se o seguinte valor de módulo de resiliência para o subleito em questão:

$$ISC = 7\%$$

$$MR = 22 \times 7^{0,8} = 127,59 \text{ MPa}$$

$$MR_{\text{subleito}} = 104,35 \text{ MPa.}$$

### **Alternativas para o pavimento da Rodovia EVC-371**

Foram avaliadas três alternativas estruturais para o pavimento da EVC-371, considerando duas alternativas de pavimentos flexíveis, uma utilizando material da região e outra com materiais importados de outras regiões do DF, e uma alternativa de pavimento rígido.



## Alternativa 1 – Pavimento Flexível

Para o material da **camada de base**, constituída por **brita graduada simples** compactada na energia do Proctor Modificado, adotou-se módulo de resiliência igual a **250 MPa**, valor este compreendido entre os limites informados pela Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP (150 a 300 MPa) – Vide Tabela 12.

Já para a camada de **sub-base**, constituída por **brita graduada simples** compactada na energia intermediária, adotou-se valor de módulo de resiliência igual a **200 MPa**.

Para a camada de revestimento em **concreto asfáltico usinado a quente** adotou-se módulo de resiliência igual a **3500 MPa**, valor este também compreendido entre os limites informados pela Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP (Vide Tabela 12).

Além disso, Preussler (1983, apud BALBO, 2007) apresenta valores de módulos resilientes para misturas asfálticas convencionais da ordem de 3200 a 4900 MPa para a faixa B, e de 3800 a 4300 MPa a faixa C. Assim, considera-se que 3500 MPa é um valor adequado para o módulo de resiliência do concreto asfáltico das rodovias em questão.

Assim sendo, a Tabela 12 resume os valores dos parâmetros de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson considerados nas análises.

**Tabela 10: Módulos de Resiliência e Coeficientes de Poisson.**

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson
Revestimento	CAUQ – CAP 30/45	3500	0,30
Base	Brita Graduada Simples (Energia Modificada)	250	0,35
Sub-base	Brita Graduada Simples (Energia Intermediária)	200	0,35
Subleito	Solo de comportamento laterítico	100	0,40

A seguir são apresentados os resultados das análises mecânicas realizadas para as estruturas de pavimento da rodovia VC-371.

## RESULTADOS DAS ANÁLISES MECANÍSTICAS

### Dimensionamento pelo Método Empírico

Para a realização das análises mecánísticas, partiu-se inicialmente das estruturas de pavimento obtidas através do método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis (Figura 9):

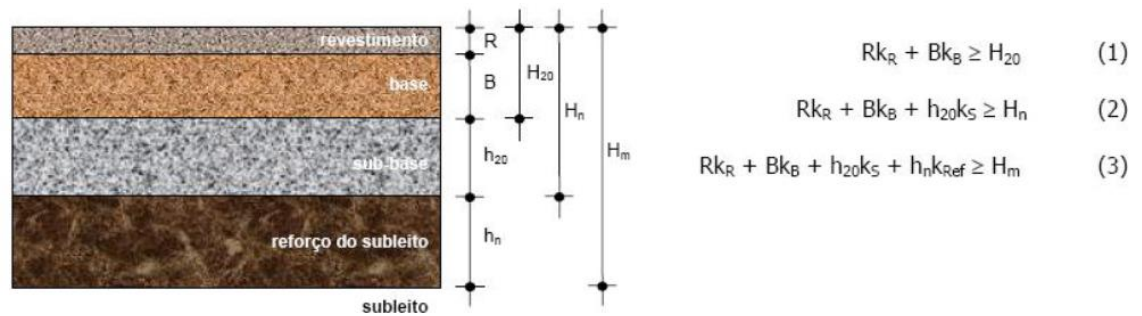


Figura 9: Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis – Método Empírico.

Como anteriormente descrito, a estrutura de pavimento obtida por meio do método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis para a rodovia VC-371 é a indicada na Figura 10.

<b>CBUQ e= 5,0 cm</b>
<b>Base BGS, e= 15 cm</b>
<b>Sub-Base BGS, e= 25cm</b>
<b>Subleito, ISC proj = 7%</b>

Figura 10: Estrutura de pavimento obtida para a rodovia VC-371 – Método Empírico

## **Estruturas de pavimento simuladas**

A primeira estrutura de pavimento simulada foi a obtida segundo o Método Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, ilustrada na Figura 10.

Por meio das análises mecanicistas, verificou-se que a estrutura dada pelo método empírico é insuficiente para o atendimento dos critérios mecânicos escolhidos, considerando o tráfego de projeto. A partir daí, por tentativas, foram simuladas outras estruturas, acrescentando-se as espessuras das camadas de forma racional, até se encontrar uma estrutura que atendesse aos critérios mecânicos selecionados, considerando as limitações dadas pelos materiais disponíveis, bem como aspectos técnicos e econômicos.

O Quadro 02 apresenta o resultado das análises mecânicas para a estrutura de pavimento flexível inicial da VC-371, obtida pelo método empírico.

Os parâmetros de tráfego de projeto considerados foram:

- Período de Projeto = 10 anos;
- Número N (USACE) =  $3,70 \times 10^6$
- Número N (AASHTO) =  $2,82 \times 10^6$

## VC-371 - Período de Projeto = 10 anos

### VERIFICAÇÃO MECANICISTA

NÚMERO N - USACE 3,70E+06

NÚMERO N-AASHTO 2,82E+06

#### DADOS DA ESTRUTURA ANALISADA

Camada	Material	Esp. (cm)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson
REVESTIMENTO	CAUQ	5,00	35.000,00	0,30
BASE	BGS	15,00	2.500,00	0,35
SUB-BASE	BGS	25,00	2.000,00	0,35
SUBLEITO	Solo fino de comportamento laterítico	-	1.043,50	0,40

#### 1 - Detorção Específica de Tração ( $\epsilon_t$ ) da fibra inferior do revestimento asfáltico

Equação	Autor	Ano	K	n	N-AASHTO	admissível modelo $\epsilon_t$	solicitante Elsym $\epsilon_t$	Verificação
1	FHWA (1976)	1976	1,092E-06	3,512	2,82E+06	2,92E-04	2,9300E-04	NÃO OK
2	Asphalt Institute	1976	2,96E-05	3,291	2,82E+06	4,61E-04	2,9300E-04	OK
3	Pinto & Preussler - CAP-50-70	1980	2,85E-07	3,69	2,82E+06	3,01E-04	2,9300E-04	OK

#### 2 - Deformação específica de compressão ( $\epsilon_v$ ) do topo da camada do subleito

Equação	Autor	Ano	K	n	N-USACE	admissível modelo $\epsilon_v$	solicitante Elsym $\epsilon_{zz}$	Verificação
1	Dormon & Metcalf	1965	6,069E-10	4,762	3,70E+06	4,84E-04	4,3600E-04	OK
2	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) - 50% confiabilidade	1985	6,15E-07	4	3,70E+06	6,39E-04	4,3600E-04	OK
3	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) - 85% confiabilidade	1985	1,94E-07	4	3,70E+06	4,79E-04	4,3600E-04	OK

#### 3 - Deflexão na superfície do pavimento

Equação	Procedimento	Ano	k	n	N-USACE	admissível modelo Dadm	solicitante Elsym $U_z$ (10 <sup>-2</sup> mm)	Verificação
1	DNER-PRO 011/79	1979	3,01	0,176	3,70E+06	71,45	57,8	OK
2	DNER-PRO 269/94	1994	3,148	0,188	3,70E+06	81,88	57,8	OK

**Quadro 2: Estrutura 01- Método Empírico – Pavimento Flexível – VC-371.**

Conforme se verifica no Quadro 2, a estrutura 1 é suficiente para atender pelo menos uma das normas de critério de fadiga e de deformação. Para atendimento de todas será apresentada a próxima simulação.

## VC-371 - Período de Projeto = 10 anos

### VERIFICAÇÃO MECANICISTA

NÚMERO N - USACE 3,70E+06

NÚMERO N-AASHTO 2,82E+06

#### DADOS DA ESTRUTURA ANALISADA

Camada	Material	Esp. (cm)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson
REVESTIMENTO	CAUQ	7,50	35.000,00	0,30
BASE	BGS	15,00	2.500,00	0,35
SUB-BASE	BGS	17,00	2.000,00	0,35
SUBLEITO	Solo fino de comportamento laterítico	-	1.043,50	0,40

#### 1 - Detorção Específica de Tração ( $\epsilon_t$ ) da fibra inferior do revestimento asfáltico

Equação	Autor	Ano	K	n	N-AASHTO	admissível	solicitante	Verificação
						modelo $\epsilon_t$	Elsym $\epsilon_t$	
1	FHWA (1976)	1976	1,092E-06	3,512	2,82E+06	2,92E-04	2,6800E-04	OK
2	Asphalt Institute	1976	2,96E-05	3,291	2,82E+06	4,61E-04	2,6800E-04	OK
3	Pinto & Preussler - CAP-50-70	1980	2,85E-07	3,69	2,82E+06	3,01E-04	2,6800E-04	OK

#### 2 - Deformação específica de compressão ( $\epsilon_v$ ) do topo da camada do subleito

Equação	Autor	Ano	K	n	N-USACE	admissível	solicitante	Verificação
						modelo $\epsilon_v$	Elsym $\epsilon_{zz}$	
1	Dormon & Metcalf	1965	6,069E-10	4,762	3,70E+06	4,84E-04	4,7600E-04	OK
2	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) - 50% confiabilidade	1985	6,15E-07	4	3,70E+06	6,39E-04	4,7600E-04	OK
3	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) - 85% confiabilidade	1985	1,94E-07	4	3,70E+06	4,79E-04	4,7600E-04	OK

#### 3 - Deflexão na superfície do pavimento

Equação	Procedimento	Ano	k	n	N-USACE	admissível	solicitante	Verificação
						modelo Dadm	Elsym Uz (10 <sup>2</sup> mm)	
1	DNER-PRO 011/79	1979	3,01	0,176	3,70E+06	71,45	52,4	OK
2	DNER-PRO 269/94	1994	3,148	0,188	3,70E+06	81,88	52,4	OK

**Quadro 3: Alternativa 1 - Análise Mecanicista - Pavimento Flexível – VC-371**

Portanto, após as verificações de várias estruturas pelo método mecanicista, concluiu-se que **a estrutura composta por 7,5 cm de concreto asfáltico usinado à quente, 15 cm de base de brita graduada e 17 cm de sub-base de brita graduada atende a todos os critérios mecânicos selecionados.**

## Alternativa 2 – Pavimento Flexível

Para o material da **camada de base**, constituída por **brita graduada simples** compactada na energia do Proctor Modificado, adotou-se módulo de resiliência igual a **250 MPa**, valor este compreendido entre os limites informados pela Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP (150 a 300 MPa) – Vide Tabela 9.

Já para a camada de **sub-base**, constituída por **solo fino laterítico** será incorporada **cal hidratada no teor de 3% em massa** compactada na energia intermediária, adotou-se valor de módulo de resiliência igual a **150 MPa**, de acordo com Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP (150 a 300 MPa) - Vide Tabela 9.

Para a camada de revestimento em **concreto asfáltico usinado a quente** adotou-se módulo de resiliência igual a **3500 MPa**, valor este também compreendido entre os limites informados pela Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP (Vide Tabela 9).

Da mesma maneira como adotada na Alternativa 1, considerou-se que 3500 MPa é um valor adequado para o módulo de resiliência do concreto asfáltico das rodovias em questão.

A escolha dessa alternativa se deu em virtude da possibilidade de construção de um pavimento com materiais disponíveis em caixas de empréstimo do DER. Essa alternativa busca redução dos custos de implantação respeitando a boa técnica e eficiência do pavimento.

A partir dos resultados de ensaios de materiais realizados pelo DER-DF nas caixas de empréstimo situadas na DF-383, DF-480 e DF-483, foi possível identificar a possibilidade de uso de materiais apenas para a sub-base da Rodovia. Na DF-383 foi verificada a ocorrência de cascalho laterítico que poderia ser utilizado para a constituição da base da rodovia, contudo a jazida já foi explorada e não apresenta volume para utilização no projeto da rodovia EVC-371. Os materiais da Rodovia DF-483 já estão sendo utilizados na construção da Ciclovía dessa rodovia, restando apenas as caixas da rodovia DF-480.

Abaixo seguem os resumos de resultados de ensaios geotécnicos dos materiais das caixas de empréstimo da DF-480.



FURO	P E N E I R A S	GRANULOMETRIA (% PASSANDO)										LIMITE		CLASSIFICAÇÃO		ENERGIA						
		PEDREGULHO				AREIA			FINOS			PEDR. (%)	AREIA (%)	FINOS (%)	LL	IP	IG	HRB	AASHO INTERMEDIÁRIO			
		2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	40	200	50mm	25mm								19mm	9,5mm	4,75mm	2,0mm
		50mm	25mm	19mm	9,5mm	4,75mm	2,0mm	0,42mm	0,075mm	(%)	(%)	(%)										
03		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,1	96,1	82,1	0,0	17,9	82,1	45	11	09	A-7-5	1.487	25,8	14,0	0,19		
04		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	96,6	82,0	0,0	18,0	82,0	43	07	09	A-5	1.438	26,3	20,9	0,12		

Figura 11: Resultados da caixa de Empréstimo 2.

FURO	P E N E I R A S	GRANULOMETRIA (% PASSANDO)										LIMITE		CLASSIFICAÇÃO		ENERGIA						
		PEDREGULHO				AREIA			FINOS			PEDR. (%)	AREIA (%)	FINOS (%)	LL	IP	IG	HRB	AASHO INTERMEDIÁRIO			
		2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	40	200	50mm	25mm								19mm	9,5mm	4,75mm	2,0mm
		50mm	25mm	19mm	9,5mm	4,75mm	2,0mm	0,42mm	0,075mm	(%)	(%)	(%)										
05		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	96,0	81,6	0,0	18,4	81,6	51	13	11	A-7-5	1.373	30,7	10,0	0,00		
06		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	97,2	84,2	0,0	15,8	84,2	51	12	11	A-7-5	1.371	27,0	21,8	0,19		

Figura 12: Resultados da caixa de Empréstimo 3.

Os laudos integrais seguem em anexo.

Em outra caixa de empréstimo situada na DF-480, o DER realizou ensaios experimentais do material reforçando-o com uso de 2% de cal. O uso dessa composição foi suficiente para elevar o Índice de Suporte de califórnia – ISC do material para 21,6% e assim permitiria seu uso na sub-base da rodovia.

FURO	P E N E I R A S	GRANULOMETRIA (% PASSANDO)										LIMITE		CLASSIFICAÇÃO		ENERGIA						
		PEDREGULHO				AREIA			FINOS			PEDR. (%)	AREIA (%)	FINOS (%)	LL	IP	IG	HRB	INTERMEDIÁRIO / MODIFICADO			
		2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	40	200	50mm	25mm								19mm	9,5mm	4,75mm	2,0mm
		50mm	25mm	19mm	9,5mm	4,75mm	2,0mm	0,42mm	0,075mm	(%)	(%)	(%)										
			100,0	99,2	63,7	40,7	18,7	8,8	5,8	59,3	34,9	5,8	00	00	00	A-1a	X	X	X	X		
					100,0	99,8	94,5	80,6	0,0	19,4	80,6	##	##	##	##	#N/D	1.331	30,1	21,6	0,00		

**OBSERVAÇÕES:**

REG. 219 BGS

REG. 220/19 COM 2% CAL

Figura 13: Resultados da caixa de empréstimo na DF-480 ensaiada com adição de 2% de Cal pelo DER.

Diante do exposto e, em virtude dos resultados experimentais alcançados com a incorporação de Cal no teor 2% estarem próximos do limite para uso em sub-bases, adotar-se, por segurança, a incorporação de cal hidratada no teor de 3% em massa, buscando uma melhoria na capacidade de suporte do material.

Assim sendo, a Tabela 11 resume os valores dos parâmetros de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson considerados nas análises.

**Tabela 11: Módulos de Resiliência e Coeficientes de Poisson.**

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poisson
Revestimento	CAUQ – CAP 30/45	3500	0,30
Base	Brita Graduada Simples (Energia Modificada)	250	0,35
Sub-base	Solo de comportamento laterítico (Energia Intermediária)	150	0,40
Subleito	Solo de comportamento laterítico	104,35	0,40

A seguir são apresentados os resultados das análises mecânicas realizadas para as estruturas de pavimento da Alternativa 2 para a rodovia VC-371.

## **RESULTADOS DAS ANÁLISES MECANÍSTICAS**

### **Estruturas de pavimento simuladas**

O Quadro 02 apresenta o resultado das análises mecânicas para a estrutura de pavimento flexível estabelecido pela Alternativa 2, seguindo os mesmos parâmetros de tráfego da Alternativa 1.

## VC-371 - Período de Projeto = 10 anos

### VERIFICAÇÃO MECANICISTA

NÚMERO N - USACE 3,70E+06

NÚMERO N-AASHTO 2,82E+06

#### DADOS DA ESTRUTURA ANALISADA

Camada	Material	Esp. (cm)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson
REVESTIMENTO	CAUQ	7,50	35.000,00	0,30
BASE	BGS	16,00	2.500,00	0,35
SUB-BASE	Solo fino de comportamento laterítico	17,00	1.500,00	0,40
SUBLEITO	Solo fino de comportamento laterítico	-	1.043,50	0,40

#### 1 - Detorção Específica de Tração ( $\epsilon_t$ ) da fibra inferior do revestimento asfáltico

Equação	Autor	Ano	K	n	N-AASHTO	admissível modelo $\epsilon_t$	solicitante Elsym $\epsilon_t$	Verificação
1	FHWA (1976)	1976	1,092E-06	3,512	2,82E+06	2,92E-04	2,7600E-04	OK
2	Asphalt Institute	1976	2,96E-05	3,291	2,82E+06	4,61E-04	2,7600E-04	OK
3	Pinto & Preussler - CAP-50-70	1980	2,85E-07	3,69	2,82E+06	3,01E-04	2,7600E-04	OK

#### 2 - Deformação específica de compressão ( $\epsilon_v$ ) do topo da camada do subleito

Equação	Autor	Ano	K	n	N-USACE	admissível modelo $\epsilon_v$	solicitante Elsym $\epsilon_v$	Verificação
1	Dormon & Metcalf	1965	6,069E-10	4,762	3,70E+06	4,84E-04	4,7600E-04	OK
2	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) - 50% confiabilidade	1985	6,15E-07	4	3,70E+06	6,39E-04	4,7600E-04	OK
3	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) - 85% confiabilidade	1985	1,94E-07	4	3,70E+06	4,79E-04	4,7600E-04	OK

#### 3 - Deflexão na superfície do pavimento

Equação	Procedimento	Ano	k	n	N-USACE	admissível modelo Dadm	solicitante Elsym Uz (10 <sup>-2</sup> mm)	Verificação
1	DNER-PRO 011/79	1979	3,01	0,176	3,70E+06	71,45	54,2	OK
2	DNER-PRO 269/94	1994	3,148	0,188	3,70E+06	81,88	54,2	OK

**Quadro 4: Alternativa 02 - Análise Mecanicista - Pavimento Flexível – VC-371**

Portanto, após as verificações de várias estruturas pelo método mecanicista, concluiu-se que **a estrutura composta por 7,5 cm de concreto asfáltico usinado à quente, 16 cm de base de brita graduada e 17 cm de sub-base constituída de solo fino laterítico com adição de 3% de Cal atende a todos os critérios mecanísticos selecionados.**

### Alternativa 3 – Pavimento Flexível

A Alternativa 3 de pavimento foi simulada por orientação do DER, realizada por meio do Despacho SEI-GDF DER-DF/DG/SUTEC/DITEC/GEPAV nº 32322991. Pelo Despacho, o DER sugere um pavimento com materias semelhantes a Alternativa 2, porém demonstrando uma estrutura mais econômica. A estrutura sugerida é composta por revestimento de 6,0 cm CBUQ; camada de base com 20,0 cm em BGS e camada de sub-base com 20,0 cm solo fino de comportamento laterítico enriquecida com Cal na composição de 3% em massa.

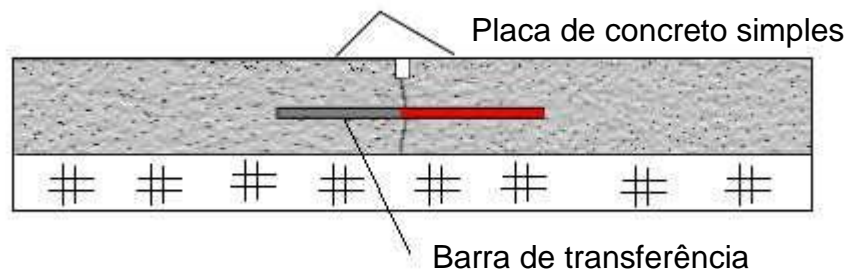
Conforme sugerido, foi realizada a análise no pavimento e confirmada sua viabilidade técnica no programa Elsym5.

### VC-371 - Período de Projeto = 10 anos

VERIFICAÇÃO MECANICISTA									
NÚMERO N - USACE		3,70E+06							
NÚMERO N-AASHTO		2,82E+06							
DADOS DA ESTRUTURA ANALISADA									
Camada	Material	Esp. (cm)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson					
REVESTIMENTO	CAUQ	6,00	35.000,00	0,30					
BASE	BGS	20,00	2.500,00	0,35					
SUB-BASE	Solo fino de comportamento laterítico	20,00	1.500,00	0,40					
SUBLEITO	Solo fino de comportamento laterítico	-	1.043,50	0,40					
1 - Detorção Específica de Tração (εt) da fibra inferior do revestimento asfáltico									
Equação	Autor	Ano	K	n	N-AASHTO	admissível modelo εt	solicitante Elsym εt	Verificação	
1	FHWA (1976)	1976	1,092E-06	3,512	2,82E+06	2,92E-04	2,9000E-04	OK	
2	Asphalt Institute	1976	2,96E-05	3,291	2,82E+06	4,61E-04	2,9000E-04	OK	
3	Pinto & Preussler - CAP-50-70	1980	2,85E-07	3,69	2,82E+06	3,01E-04	2,9000E-04	OK	
2 - Deformação específica de compressão (εv) do topo da camada do subleito									
Equação	Autor	Ano	K	n	N-USACE	admissível modelo εv	solicitante Elsym εv	Verificação	
1	Dormon & Metcalf	1965	6,069E-10	4,762	3,70E+06	4,84E-04	4,2500E-04	OK	
2	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) - 50% confiabilidade	1985	6,15E-07	4	3,70E+06	6,39E-04	4,2500E-04	OK	
3	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) - 85% confiabilidade	1985	1,94E-07	4	3,70E+06	4,79E-04	4,2500E-04	OK	
3 - Deflexão na superfície do pavimento									
Equação	Procedimento	Ano	k	n	N-USACE	admissível modelo Dadm	solicitante Elsym Uz (10 <sup>2</sup> mm)	Verificação	
1	DNER-PRO 011/79	1979	3,01	0,176	3,70E+06	71,45	56,4	OK	
2	DNER-PRO 269/94	1994	3,148	0,188	3,70E+06	81,88	56,4	OK	

## Alternativa 4 – Pavimento Rígido

Para a alternativa de pavimento rígido, foi adotado o sistema de pavimentação em placas de concreto simples com barras de transferência: que consiste em um sistema artificial de transmissão de cargas, formado por barras curtas de aço liso, postada na meia-seção das juntas transversais. As placas geralmente têm comprimento de 9 a 12 metros, sendo elas mais resistentes do que as placas sem barras de transferência, e também mais utilizadas. (DNIT, 2005);



**Figura 14 – Placas de concreto simples com barras de transferência.**

## MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO

### Método PCA 1984

O PCA/1984 (Portland Cement Association) é um método empírico mecanístico de dimensionamento de pavimentos rígidos, largamente adotado no Brasil, que utiliza modelo de desempenho por fadiga do concreto e erosão das placas, levando em consideração, principalmente:

- Grau de transferência de carga nas juntas transversais;
- Efeitos da existência ou não de acostamento de concreto;
- Contribuição estrutural das sub-bases de solo melhorado ou de concreto pobre;
- Ação de eixos tandem triplos.

O modelo de fadiga determina que a parcela de resistência à fadiga não consumida por uma certa classe de carga fica disponível para uso por outras cargas, sendo o resultado do dano total a soma final dos consumos individuais da resistência à fadiga.

A curva de fadiga alcança valores abaixo da relação de tensões limite de 0,5, eliminando a descontinuidade nesse ponto, e as tensões de tração por flexão consideradas no cálculo são produzidas pela carga tangente à borda longitudinal.

Os efeitos da erosão se dão sob a forma de deformações verticais críticas, em cantos e bordas das placas, causando escalões nas juntas transversais, principalmente quando estas não possuem barras de transferência (DNIT, 2005).

Isso ocorre pela formação de vazios e perda de suporte entre placa e a fundação.

Com bases nos ensaios de caracterização dos materiais pertencentes ao projeto de pavimentação e aos dados pertinentes do solo do subleito, é possível realizar o dimensionamento do pavimento. Na elaboração do projeto se analisam os fatores:

1. As propriedades do concreto, sendo firmadas as exigências quanto ao módulo de ruptura à tração na flexão, a idade do concreto a ser considerada na avaliação do módulo de ruptura, o princípio de ruptura do concreto por fadiga e a relação entre o número de solicitações de carga e a relação de tensões;
2. A fundação do pavimento, onde se analisa o suporte do subleito, determinado pelo CBR, verificando a necessidades de camadas complementares, como as de reforço e sub-base;
3. O tráfego, envolvendo a contagem e a classificação dos veículos para o estudo das tensões causadas pelas cargas, o período de projeto e a projeção do tráfego;

## **ESTUDO DO TRÁFEGO**

Com os dados da frota, o principal parâmetro a ser determinado no estudo do tráfego é o número N de repetições de carga equivalente. Além de dados da frota, para seu cálculo necessita-se conhecer o Volume Médio Diário Anual de Veículos (VMDA), a taxa de crescimento da frota, o período do projeto, os fatores de carga (FC), de eixo (FE) e o fator climático regional (FR).

## **DIMENSIONAMENTO**

Foi utilizado o método da Portlando Cement Association (PCA) de 1984, por se tratar de um método consagrado na pavimentação. O método considera dois modelos de ruptura do pavimento, por fadiga e erosão, permitindo relacionar diferentes fatores de projeto;

Comumente a estrutura do pavimento é dividida em 4 camadas, o revestimento de concreto, a sub-base, o reforço do subleito e o subleito.

O método da PCA/84 indica a adoção de uma faixa de valores, levando em conta algumas características da via, para a determinação da espessura das camadas de sub-base e reforço do subleito.



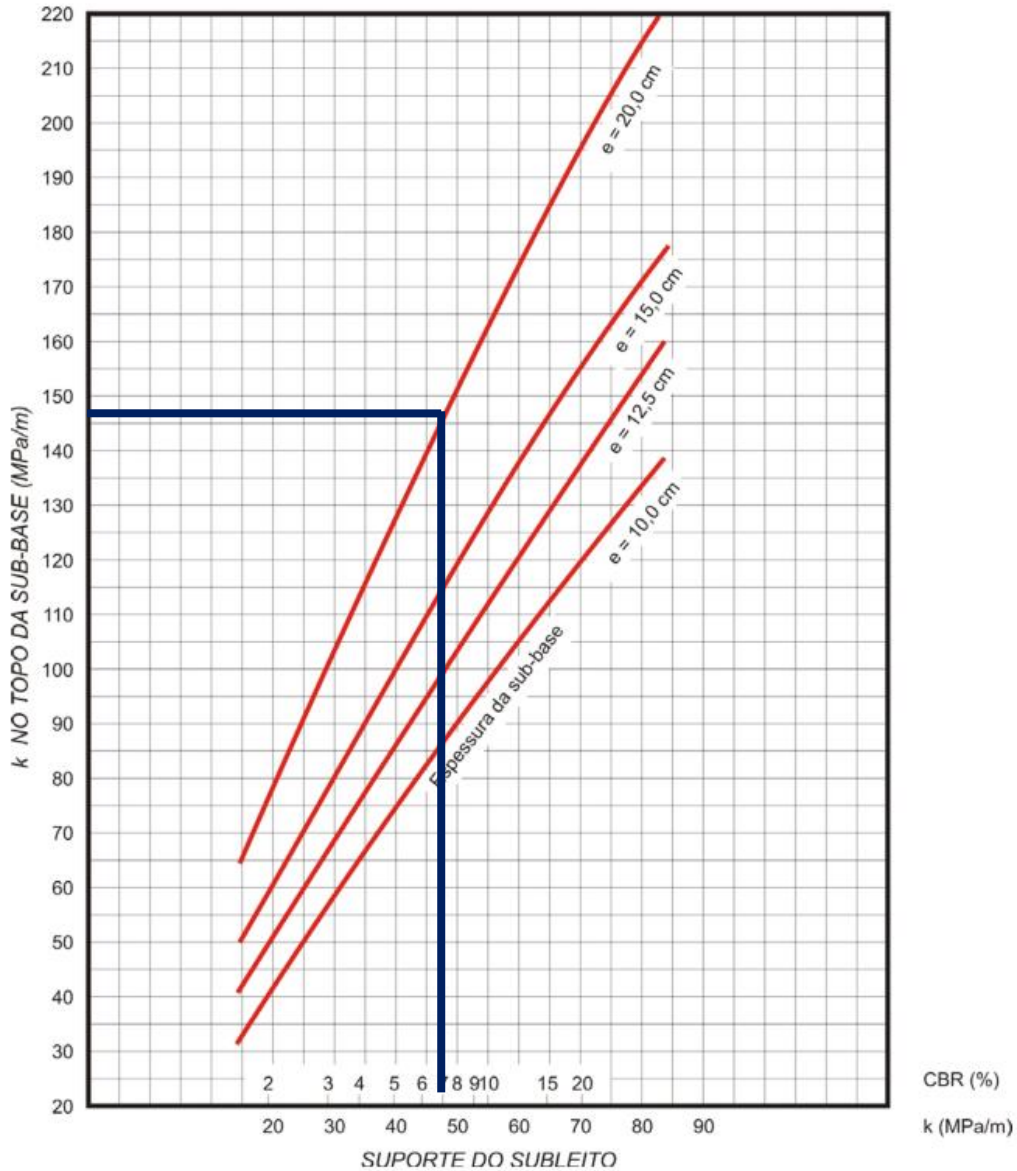
O solo do subleito apresenta **CBR = 7%**. O tráfego de veículos na via é meio pesado ( **$3,70 \times 10^6$** ).

As espessuras adotadas para as camadas de sub-base e reforço do subleito foram de 20 cm cada.

### **Revestimento CCP - Concreto de cimento Portland**

Segundo o método PCA/84, os parâmetros para o cálculo da espessura são:

- a) Coeficiente de recalque (k) no topo do sistema. O valor caracteriza a capacidade de deformação elástica do subleito. O **CBR do subleito é 7%**, e à sub-base foi atribuída **espessura de 20cm**, os coeficientes de recalque no subleito e no topo do sistema são, respectivamente, **46 MPa/m e 62 MPa/m**, conforme identificado na tabela a seguir.



**Figura 15** - Aumento de  $k$  devido à presença de sub-base granular.

Fonte: DNIT - Manual de Pavimentos rígidos – 2005.

Valor do suporte do subleito		Coefficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de sub-base iguais a (cm)
<b>CBR (%)</b>	<b>K (MPa/m)</b>	<b>20cm</b>
<b>7</b>	<b>47</b>	<b>145</b>

- b) Coeficiente de segurança de carga (FSC) adotado para o projeto: no dimensionamento da espessura das placas, são considerados os fatores de segurança para as cargas, apresentados na tabela a seguir, tendo sido adotado o valor de 1,1, em função da projeção de tráfego.

**Tabela 12 – Fatores de segurança para as cargas**

<b>Tipo de Pavimento</b>	<b>FS<sub>c</sub></b>
Para ruas com tráfego com pequena porcentagem de caminhões e pisos em condições semelhantes de tráfego (estacionamentos, por exemplo)	1,0
Para estradas e vias com moderada frequência de caminhões	1,1
Para altos volumes de caminhões	1,2
Pavimentos que necessitem de um desempenho acima do normal	Até 1,5

**Fonte: DNIT (2005)**

- c) Resistência à tração na flexão do concreto: 4,5Mpa.
- d) Número N de solicitações:  $3,70 \times 10^6$  ;
- e) Barras de transferência de carga: sua utilização ou não depende da avaliação do tráfego, recomendando-se o seu uso para um número  $N > 5 \times 10^6$ .
- f) Período de projeto: 15 anos.
- g) Acostamento de concreto.

Com os parâmetros determinados, torna-se possível o cálculo da espessura do revestimento do pavimento rígido. O procedimento do PCA/84 foi realizado de acordo com o roteiro de dimensionamento do Manual de Pavimentos Rígidos, do DNIT (2005), onde inicialmente foi calculado o número de repetições previstas para os veículos de eixo simples e duplo.

Os resultados do método PCA/84 são mostrados na tabela a seguir, onde demonstra as várias espessuras avaliadas. para a camada de revestimento de Concreto de Cimento Portland - CCP, considerando os critérios de consumo de fadiga e de erosão.

**Tabela 13** – Tensão Equivalente para Eixos Simples e Tandem, Duplo (Mpa) PCAC (pavimento com acostamento de concreto).

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

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

**Tabela 14** – Tensão Equivalente para Eixos Tandem Triplos (Mpa) PCAC (pavimento com acostamento de concreto)

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

ETT: Eixos Tandem Triplos

**Tabela 15** – Fator de erosão para Eixos Simples e Tandem, Duplo (Mpa) JCP (junta com barra de transferência) PCAC (pavimento com acostamento de concreto).

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		180	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,07	3,09	3,02	2,99	3,00	2,93	2,97	2,90	2,96	2,88	2,94	2,84	2,92	2,83
13	2,97	3,02	2,92	2,92	2,90	2,86	2,87	2,83	2,86	2,80	2,84	2,76	2,82	2,74
14	2,88	2,96	2,83	2,85	2,81	2,79	2,78	2,76	2,77	2,73	2,75	2,68	2,73	2,66
15	2,80	2,89	2,75	2,79	2,73	2,72	2,70	2,69	2,69	2,66	2,67	2,61	2,65	2,59
16	2,72	2,84	2,67	2,73	2,65	2,66	2,62	2,63	2,61	2,60	2,59	2,55	2,57	2,52
17	2,64	2,78	2,60	2,68	2,58	2,60	2,55	2,57	2,54	2,54	2,52	2,48	2,49	2,45
18	2,57	2,73	2,53	2,62	2,51	2,55	2,48	2,51	2,47	2,48	2,45	2,42	2,42	2,39
19	2,51	2,69	2,47	2,57	2,44	2,50	2,41	2,46	2,40	2,43	2,38	2,73	2,36	2,33
20	2,44	2,64	2,41	2,53	2,38	2,45	2,35	2,41	2,34	2,38	2,32	2,31	2,29	2,28
21	2,38	2,60	2,35	2,48	2,32	2,40	2,29	2,36	2,28	2,33	2,26	2,26	2,23	2,22
22	2,33	2,56	2,30	2,44	2,27	2,36	2,24	2,32	2,23	2,29	2,21	2,21	2,18	2,17
23	2,27	2,52	2,24	2,40	2,21	2,31	2,18	2,27	2,17	2,24	2,15	2,17	2,12	2,12
24	2,23	2,48	2,10	2,36	2,16	2,28	2,13	2,24	2,12	2,20	2,10	2,13	2,07	2,08
25	2,18	2,43	2,14	2,33	2,11	2,24	2,09	2,20	2,08	2,17	2,05	2,09	2,02	2,03
26	2,14	2,39	2,09	2,29	2,06	2,21	2,04	2,17	2,03	2,13	2,01	2,06	1,97	1,99
27	2,19	2,35	2,05	2,26	2,02	2,17	2,00	2,13	1,99	2,10	1,96	2,03	1,93	1,95
28	2,06	2,32	2,01	2,23	1,98	2,14	1,95	2,10	1,94	2,07	1,92	1,99	1,98	1,94
29	2,03	2,28	1,97	2,19	1,94	2,11	1,91	2,07	1,90	2,04	1,88	1,93	1,85	1,87
30	1,99	2,25	1,93	2,16	1,90	2,08	1,87	2,04	1,86	2,01	1,83	1,93	1,81	1,83
31	1,96	2,21	1,89	2,13	1,86	2,05	1,83	2,01	1,82	1,98	1,80	1,90	1,77	1,80
32	1,92	2,18	1,86	2,11	1,83	2,03	1,80	1,99	1,79	1,95	1,76	1,87	1,74	1,76
33	1,89	2,15	1,82	2,08	1,79	2,00	1,76	1,96	1,75	1,92	1,72	1,85	1,70	1,73
34	1,86	2,12	1,79	2,05	1,76	1,97	1,73	1,93	1,72	1,90	1,69	1,82	1,67	1,70

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos



**Tabela 16** – Fator de erosão para Eixos Tandem Triplo (Mpa) JCP (junta com barra de transferência) PCAC (pavimento com acostamento de concreto).

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,12	2,99	2,93	2,90	2,85	2,82
13	3,06	2,92	2,85	2,81	2,76	2,73
14	3,00	2,86	2,78	2,74	2,67	2,64
15	2,95	2,80	2,73	2,67	2,59	2,56
16	2,91	2,76	2,67	2,62	2,52	2,49
17	2,86	2,71	2,62	2,57	2,47	2,43
18	2,82	2,67	2,58	2,52	2,41	2,37
19	2,79	2,63	2,54	2,48	2,37	2,32
20	2,75	2,59	2,50	2,44	2,32	2,28
21	2,72	2,56	2,47	2,40	2,28	2,23
22	2,68	2,53	2,43	2,37	2,25	2,20
23	2,65	2,49	2,40	2,34	2,21	2,16
24	2,62	2,46	2,37	2,31	2,18	2,13
25	2,59	2,44	2,34	2,28	2,15	2,10
26	2,57	2,41	2,32	2,25	2,12	2,07
27	2,54	2,38	2,29	2,22	2,10	2,04
28	2,51	2,36	2,26	2,20	2,07	2,01
29	2,49	2,33	2,24	2,17	2,04	1,99
30	2,47	2,31	2,22	2,15	2,02	1,96
31	2,44	2,29	2,19	2,13	2,00	1,94
32	2,42	2,26	2,17	2,10	1,97	1,92
33	2,44	2,24	2,15	2,08	1,95	1,89
34	2,38	2,22	2,13	2,06	1,93	1,87

ETT: Eixos Tandem Triplos

Para consideração do número de repetições previstas, por carga de eixo admissível, foi considerada as especificações determinadas pelo DNIT – Manual de Estudo de Tráfego – 2006, pág. 30:

*Art. 2º. Os limites máximos de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículo, nas superfícies das vias públicas, são os seguintes:*

I – peso bruto total por unidade ou combinações de veículos: 45t;

II – peso bruto por eixo isolado: 10t;

III – peso bruto por conjunto de dois eixos em *tandem*, quando a distância entre os dois planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m: 17t;

IV – peso bruto por conjunto de dois eixos não em *tandem*, quando a distância entre os dois planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m; 15t;

V – peso bruto por conjunto de três eixos em *tandem*, aplicável somente a semi-reboque, quando a distância entre os três planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40m: 25t;

Foi considerado, portanto, os limites admissíveis legais para as cargas consideradas por eixo, considerando os veículos operando em sua máxima capacidade.

Para ilustrar como se chegou aos resultados da tabela 4, será exemplificado a seguir todos os procedimentos do método, adotando-se uma espessura de tentativa igual a 17cm para a placa de concreto, onde os passos para o dimensionamento são:

- a) Tensão equivalente: para tal se utiliza as tabelas 14 e 15, já que o pavimento é com acostamento de concreto e os veículos circulantes na via são de eixo simples e tandem duplo apenas.
- b) Fator de fadiga: calculam-se os fatores de fadiga pela simples divisão das tensões equivalente (eixo simples e tandem duplo) pela resistência do concreto adotada para o projeto, no caso 4,5 Mpa.
- c) Fatores de erosão: para tal se utiliza as tabelas 16 e 17.
- d) Com o fator de fadiga e as cargas por eixo, determinam-se o número de repetições de carga para os eixos simples, tandem duplo e tandem triplo. O procedimento é realizado traçando uma curva para eixo simples, outra para o tandem duplo e outra para o tandem triplo, ambas passando pelo seu respectivo fator de fadiga, até a curva atingir a reta do número de repetições de carga.

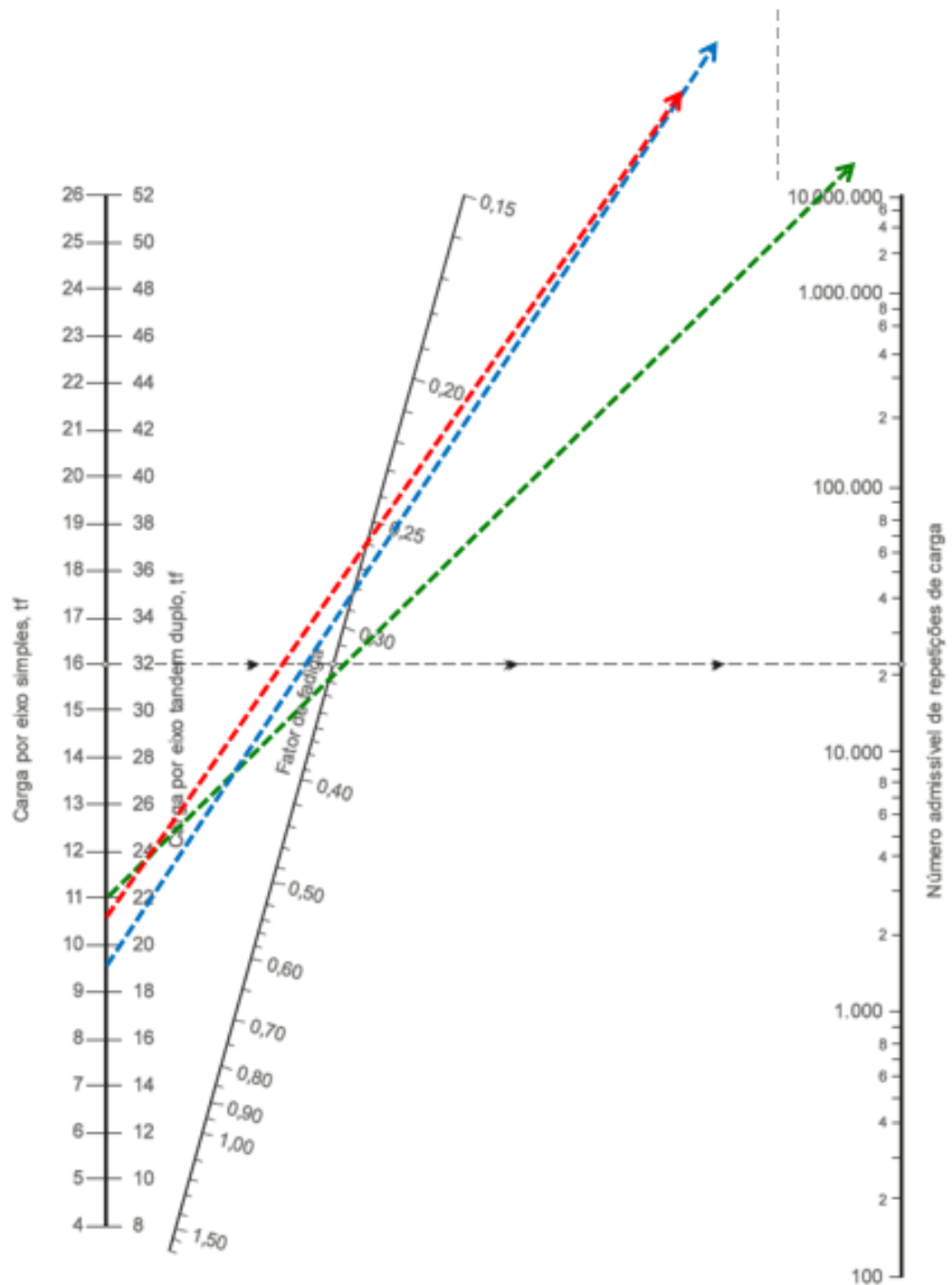


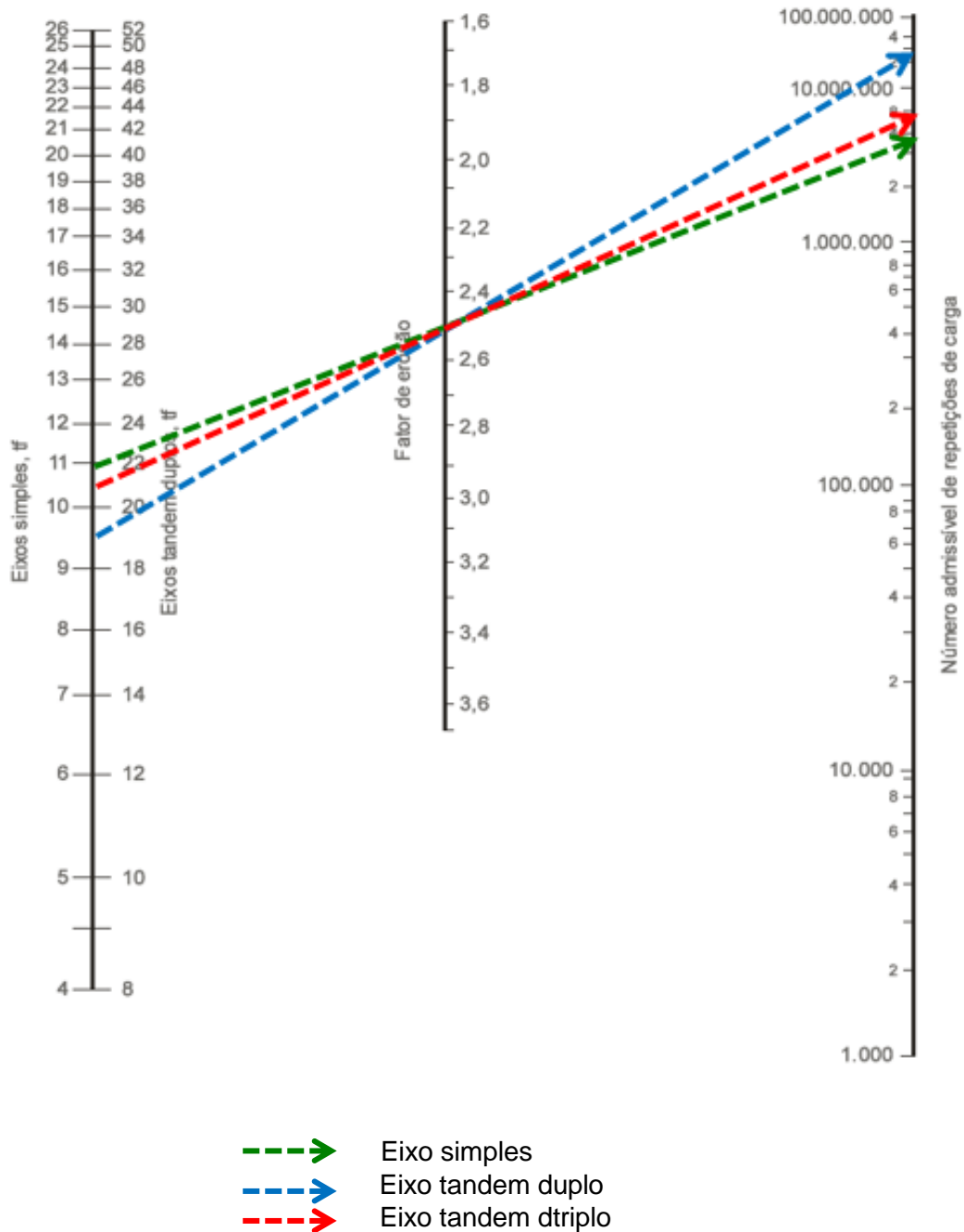
Figura 4.3 – Análise de fadiga (número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga, com ou sem acostamento)

- ➔ Eixo simples
- ➔ Eixo tandem duplo
- ➔ Eixo tandem triplo

Fonte: Adaptada do DNIT (2005)

e) Com o fator de erosão e as cargas por eixo simples e tandem duplo se determina o número de repetições admissíveis de carga para o fator de erosão:

**Figura 4.4 – Análise de erosão (número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão, sem acostamento de concreto).**



Fonte: Adaptada DNIT (2005)

- f) Na determinação do consumo à fadiga e ao dano por erosão se dividem as repetições previstas para o período p de projeto pelos seus respectivos números admissíveis de repetições de carga, para o eixo simples e tandem duplo. O consumo à fadiga e o dano por erosão são então determinados pela soma das duas parcelas (ES e ETD), em porcentagem. A soma tem que cumprir os requisitos solicitados, isto é, não pode ser superior aos 100%;

**Tabela 17 - cálculo de eixos totais por classe de carga.**

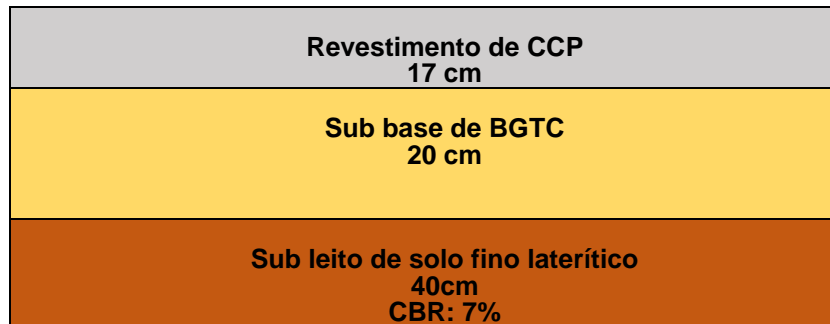
DADOS GERAIS						
Projeto:	VC 371		Juntas com BT	SIM		
k topo sistema (MPa/m):	145		Acostamento de concreto	SIM		
Mrupt (MPa):	4,5		Período de Projeto (anos):	15		
Espessura Tentativa (cm):	17		FSc:	1,1		

CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA						
Cargas por eixo (tf)	Peso por eixo (x) FSc (tf)	N de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSIÃO	
			N de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	N de repetições admissíveis	Consumo de Erosão (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixos Simples		(8) Tensão Equivalente =	1,49			
		(9) Fator de Fadiga =	0,33			
		(10) Fator de Erosão =	2,52			
9 - 10	11	3.434.958	ilimitado	0,00	4.000.000,00	85,87395
Eixos Tandem Duplos		(11) Tensão Equivalente =	1,26			
		(12) Fator de Fadiga =	0,28			
		(13) Fator de Erosão =	2,48			
16 - 17	19	257.562	ilimitado	0,00	30000000	0,85854
Eixos Tandem Triplos		(14) Tensão Equivalente =	1,15			
		(15) Fator de Fadiga =	0,26			
		(16) Fator de Erosão =	2,47			
24 - 26	31,2	79.238	ilimitado	0,00	8.000.000,00	0,990475
<b>TOTAL</b>				<b>0,00</b>	<b>TOTAL</b>	<b>87,72</b>

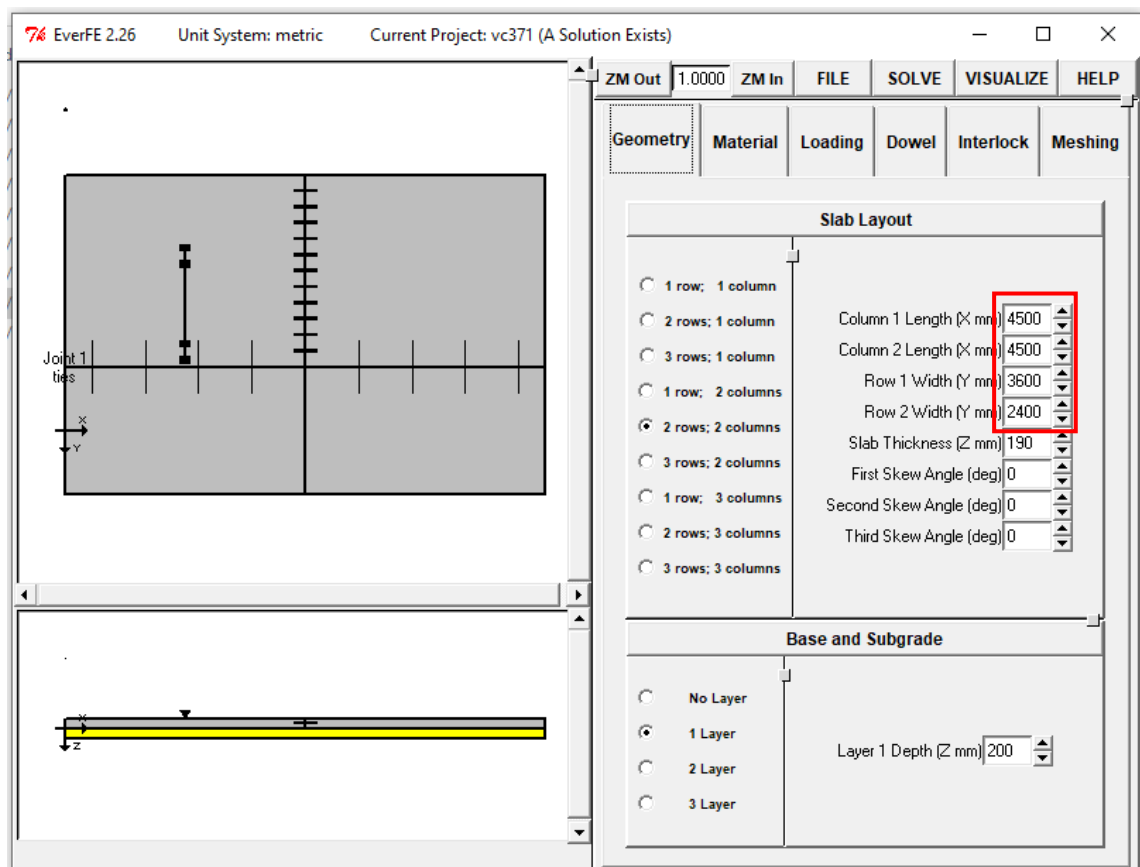
Após este exemplo de como utilizar o método PCA/84 é possível proceder com a escolha da espessura que melhor se enquadra aos critérios técnicos. Verifica-se que a espessura de 17 cm de revestimento é a que melhor atende aos requisitos.

**Figura 4.5 – Estrutura final do pavimento rígido**



Foi verificado o fator de temperatura, através do software EverFE, considerando alplitude térmica na parte superior da placa de 20 graus Celsius, e na parte inferior 5 graus Celsius.

Foi considerada placa com barra de transferência, com acostamento, nas dimensões de 3,60 x 4,50m, para faixa de rolamento, e 2,40 x 4,50m para costamento.



**Figura 16 – Geometria da placa considerada.**



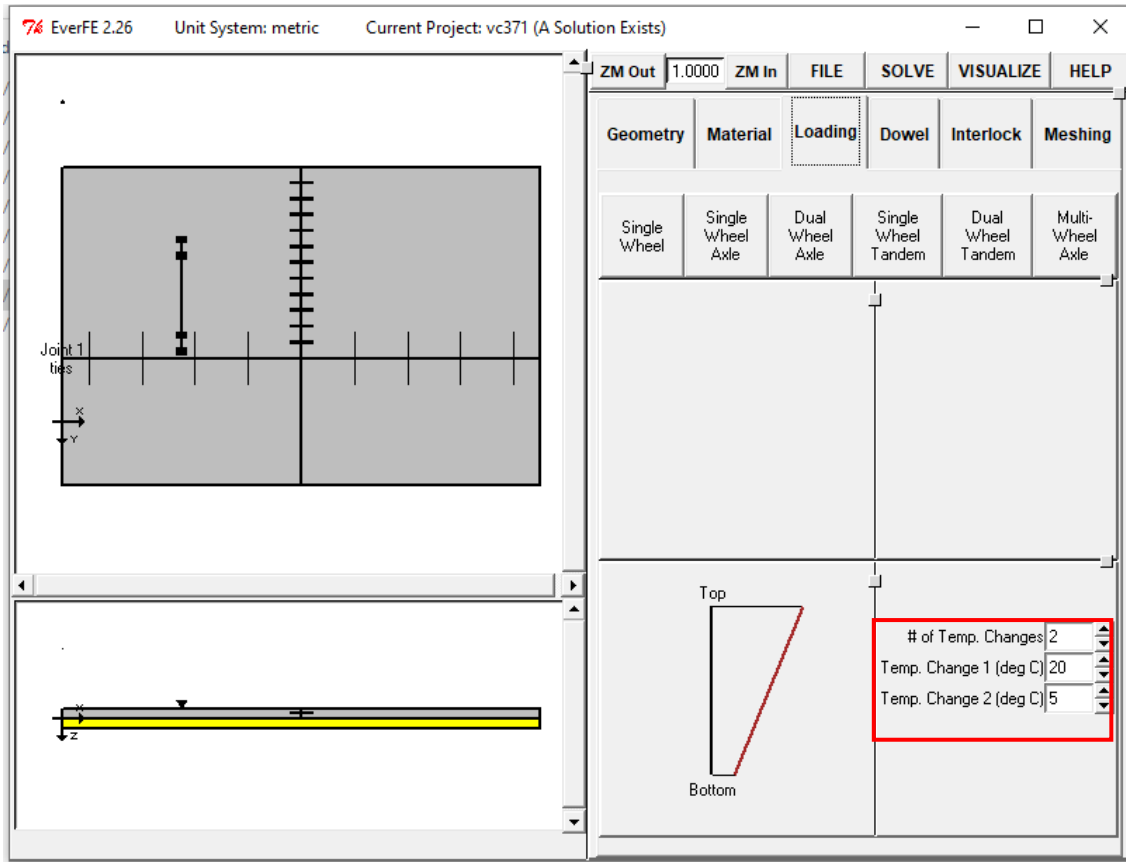


Figura 17 – Amplitude térmica considerada. 20°C para parte superior e 5°C para inferior da placa.

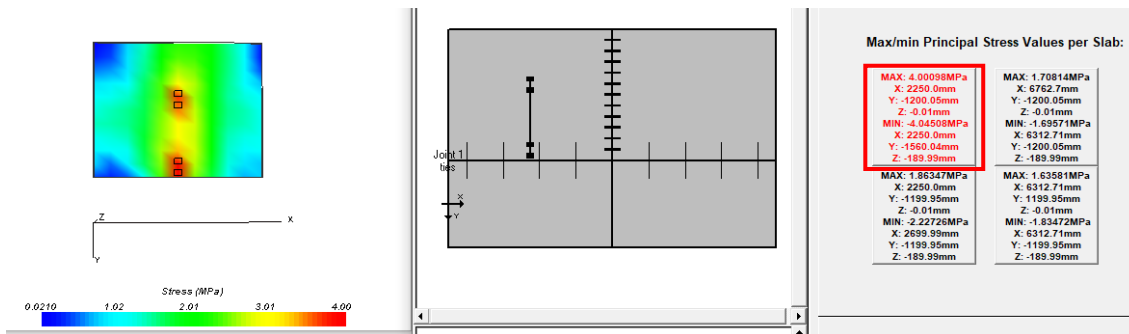
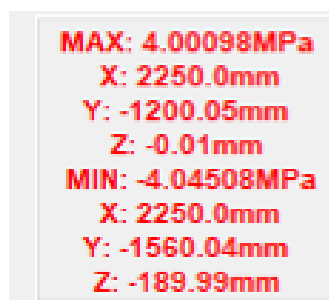


Figura 18 – Tensões máximas e mínimas encontradas na parte inferior da placa.



**Figura 19 – Detalhes das tensões máximas e mínimas encontradas na placa.**

Verifica-se que a tensão máxima encontrada, de 4,0 Mpa, é inferior a resistência considerada no concreto de 4,5 Mpa, estando portanto dentro dos limites admissíveis.

## **8. Estrutura final de pavimento indicado para a rodovia VC-371**

A Estrutura Final do Pavimento foi concebida utilizando os parâmetros conclusivos do método mecanístico e as especificações de serviços do DER do estado do Paraná, com base na Alternativa 3, mais precisamente:

- DER/PR ES-P 21/17 – PAVIMENTAÇÃO: CONCRETO ASFÁLTICO USINADO À QUENTE
- DER/PR ES-P 05-18 – PAVIMENTAÇÃO: BRITA GRADUADA

**Revestimento:** Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) com espessura 6,00 cm. Executado em duas camadas: Uma camada Faixa C (rolamento) com espessura de 3,00 cm (CAP 30/45) e outra Camada Faixa B na espessura de 3,00 cm (CAP 50/70). Módulo de Resiliência de 3500 Mpa

**Base:** Brita Graduada Simples (BGS) com espessura de 20,00 cm executada em duas camadas inferiores não superiores 10 cm, compactadas com energia modificada com grau de compactação de 100%. Módulo de Resiliência de 250Mpa.

**Sub-Base:** Solo fino de comportamento laterítico com adição de 3% de cal hidratada em massa, com espessura de 20,00 cm executada em duas camadas compactadas com energia intermediária com grau de compactação de 100%. Módulo de Resiliência de 150Mpa.

**Regularização e compactação do Subleito:** Camada com 60cm de espessura constituída de material local compactado em três camadas de 20cm cada

com energia intermediária e Grau de Compactação de 100%. Módulo de Resiliência de 104,35Mpa.

Portanto o pavimento ora dimensionado, terá as seguintes camadas:

- Revestimento = 6,0 cm (Executado em duas camadas);
- Base = 20,0 cm (Executado em duas camadas);
- Sub-Base = 20,0 cm (Executado em duas camadas)
- Regularização e compactação do subleito = 60,0 cm.

Assim, os pavimentos dimensionados possuirão a seguinte estrutura:

<b>REVESTIMENTO</b>	<b>CBUQ - CAP 30/45 – Faixa C (Rolamento)</b> Espessura de 3,0 cm
	<b>CBUQ – CAP 50/70- Faixa B</b> Espessura de 3,0 cm MR do revestimento=3500Mpa
<b>BASE</b>	<b>Brita Graduada Simples - BGS</b> Espessura de 20,0 cm Compactada Energia Modificada (GC=100%) MR=250Mpa
<b>SUB BASE</b>	<b>Solo fino de comportamento laterítico com adição de 3% de cal em massa</b> Espessura de 20,0 cm Compactada na Energia Intermediária (GC=100%) MR=150Mpa
<b>SUB LEITO</b>	<b>Material Local</b> Regularização e compactação em 3 camadas de 20 cm cada na Energia Intermediária (60,0 cm) (GC=100%) MR=104,35Mpa

Figura 20: Estrutura de pavimento adotada para a rodovia VC-371.

### Responsável Técnico

---

Pedro Paulo Barreiros  
 Engenheiro Civil  
 CREA 24.515/D-DF