



**DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO DISTRITO
FEDERAL – DER/DF**

SUPERINTENDÊNCIA TÉCNICA – SUTEC

DIRETORIA DE ESTUDOS TECNOLÓGICOS – DITEC

GERÊNCIA DE ESTUDOS TECNOLÓGICOS – GETEC

**Readequação do Projeto de Implantação
de Pavimento na Duplicação da DF-010,
baseado nas informações retiradas do
Relatório de autoria da Empresa STE –
Serviços Técnicos de Engenharia S.A.**

Revisão 1

Brasília-DF

Dezembro de 2023

Sumário

1.0 Introdução.....	5
2.0 Número N.....	6
3.0 Determinação do Índice de Suporte Califórnia do Subleito.....	7
4.0 Parâmetros Mecânicos para o Pavimento da Rodovia DF-010.....	7
5.0 Parâmetros de Resistência dos Materiais.....	12
5.1 Determinação dos Módulos de Resiliência.....	14
5.1.1 Módulo de Resiliência, Massa Específica Aparente Seca e Coeficiente de Poisson.....	14
5.1.1.1 Módulo de Resiliência – Subleito.....	14
5.1.1.2 Módulo de Resiliência – Sub-base.....	15
5.1.1.3 Módulo de Resiliência – Base (Solo Local + BGS + 2,0% de Cimento Portland).....	15
5.1.1.4 Módulo de Resiliência – Revestimento Asfáltico.....	15
6.0 Readequação da Estrutura do Pavimento da Duplicação da DF-010.....	15
7.0 Solução de Pavimento – Duplicação da DF-010.....	19
7.1 Base composta por mistura de: Material Terroso + Brita Graduada Simples + 2,0% de Cimento Portland e CAUQ Convencional.....	19

ANEXO:

A – Relatório de Projeto de Pavimentação de Autoria da Empresa Projetista STE – Serviços Técnicos de Engenharia S. A.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Números: N_{USACE} e N_{AASHTO}.....	6
Tabela 2 – Pontos Analisados/Defeitos.....	9
Tabela 3 – Valores Usuais de Coeficiente de Poisson.....	12
Tabela 4 – Valores Típicos de Módulos de Resiliência.....	13
Tabela 5 – Estimativas dos Módulos de Resiliência.....	13
Tabela 6 – Módulos de Resiliência e Coeficientes de Poisson – Empresa STE.....	14
Tabela 7 – Verificação Mecânica – DF-010 – Base em Material Terroso + BGS + 2,0% de Cimento Portland e CAUQ Convencional.....	17
Tabela 8 – Verificação Mecânica – DF-010 – Base em Material Terroso + BGS + 2,0% de Cimento Portland e CAUQ Convencional – Aprovada.....	18
Tabela 9 – Intervenções Necessárias – DF-010 – Base em Material Terroso + BGS + 2,0% de Cimento Portland e CAUQ Convencional.....	19

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização do Trecho a ser Pavimentado (Duplicação).....	6
Figura 2 – Tipo de Carregamento – Eixo Padrão.....	9

1.0 Introdução

O presente estudo será realizado conforme solicitado pela Superintendência Técnica – SUTEC, através do Despacho DER-DF/PRESI/SUTEC (129144286), anexado ao Processo SEI Nº 00113-00018393/2023-44, consiste na readequação da estrutura do pavimento, com o intuito de otimizar as espessuras das camadas do pavimento, diante do que foi apresentado através do Relatório entregue pela Empresa Projetista Contratada pelo DER-DF, através do Contrato Nº 025/2021, presente no Relatório de Projeto Executivo de Pavimentação da Duplicação da DF-010, documento anexado ao Processo SEI Nº 00113-00018163/2020-32. Todas as informações para a execução do referido estudo serão retiradas do Relatório de Projeto citado acima, podendo ocorrer algumas mudanças visando melhorar o desempenho da estrutura de pavimento. Os cálculos das espessuras das camadas serão executados através de análise com o auxílio do software específico AEMC – Módulo de Cálculo de Tensões e Deformações – v. 2.4.6 (Abril/2023), programa desenvolvido por Filipe Augusto Cinque de Proença Franco, D. Sc., feito download a partir do site do DNIT – IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Trata-se de um programa desenvolvido com base 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, 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. Os valores serão apresentados através de uma planilha do Excel, verificando os critérios de desempenho das estruturas de pavimento avaliadas.

Figura 1 – Localização do Trecho a ser Pavimentado (Duplicação)



- DF-010 – Duplicação

2.0 Número N

O Número N, tanto USACE quanto AASHTO, foram obtidos a partir do Relatório de Projeto de Pavimentação da Duplicação da DF-010 – **Anexo A**, da Empresa Projetista STE – Serviços Técnicos de Engenharia S. A., conforme tabela apresentada abaixo:

Tabela 1 – Números: N_{USACE} e N_{AASHTO}

Tabela 10. Cálculo do Número "N"

Ano	Volumes de Tráfego (VMDAT)					Valores do Número "N"				Observações
	Veículos-tipo				Total	USACE		AASHTO		
	Moto	Passeio	Coletivo	Carga		Ano	Acumulado	Ano	Acumulado	
2024	0	0	175	775	950	2,15E+06	2,15E+06	7,48E+05	7,48E+05	1º ano
2025	0	0	184	814	998	2,25E+06	4,40E+06	7,86E+05	1,53E+06	
2026	0	0	193	854	1.047	2,37E+06	6,77E+06	8,25E+05	2,36E+06	
2027	0	0	203	897	1.100	2,49E+06	9,25E+06	8,66E+05	3,22E+06	
2028	0	0	213	942	1.155	2,61E+06	1,19E+07	9,09E+05	4,13E+06	5º ano
2029	0	0	223	989	1.212	2,74E+06	1,46E+07	9,55E+05	5,09E+06	
2030	0	0	235	1.039	1.273	2,88E+06	1,75E+07	1,00E+06	6,09E+06	
2031	0	0	246	1.091	1.337	3,02E+06	2,05E+07	1,05E+06	7,14E+06	
2032	0	0	259	1.145	1.404	3,17E+06	2,37E+07	1,11E+06	8,25E+06	
2033	0	0	271	1.202	1.474	3,33E+06	2,70E+07	1,16E+06	9,41E+06	10º ano
Composição Percentual de Tráfego					Parâmetros adotados no cálculo do número de operações do eixo padrão de 8,2t					
Moto	Passeio	Coletivo	Carga	Fatores de Veículos - FV			Fator climático		Veículos na faixa de projeto	
0,00	0,00	18%	82%	FV _{usace}	FV _{ashto}	FR		c		
Taxas de Crescimento de Tráfego					7,74	2,70	1,00		0,80	
Moto	Passeio	Coletivo	Carga	Ano inicial para cálculo do Número "N"					2024	
5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	Período de projeto para o cálculo do número "N" (anos)					10	

Fonte: Projeto de Pavimentação da Duplicação da DF-010, página 22/370 – Empresa STE

Para o ano de horizonte de Projeto – 2033, temos:

$$N_{USACE} = 2,70 \times 10^7$$

$$N_{AASHTO} = 9,41 \times 10^6$$

3.0 Determinação do Índice de Suporte Califórnia do Subleito

Conforme dado obtido através do Relatório de Pavimentação da Empresa Projetista, localizado na página 45/370 – **Anexo A**, foi adotado como valor de Índice de Suporte Califórnia da camada de subleito o valor igual a 7,1%.

$$\underline{ISC_{SUBLEITO} = 7,1\%}$$

4.0 Parâmetros Mecanísticos para o Pavimento da Rodovia DF-010

Diante dos dados expostos, para uma avaliação mecanicista empírica da solução com base granular, foram obtidos os módulos de resiliência das camadas de subleito, sub-base, pela metodologia descrita na IP-08/2004 da PMSP e/ou descrita na IP-DE-P00/001 do DER-SP.

A análise mecanística 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 mecanístico, 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 deformações permanentes 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 do software específico AEMC – Módulo de

Cálculo de Tensões e Deformações – v. 2.4.6 (Abril/2023), programa desenvolvido por Filipe Augusto Cinque de Proença Franco, D. Sc., feito download a partir do site do DNIT – IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Trata-se de um programa desenvolvido com base 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, 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.

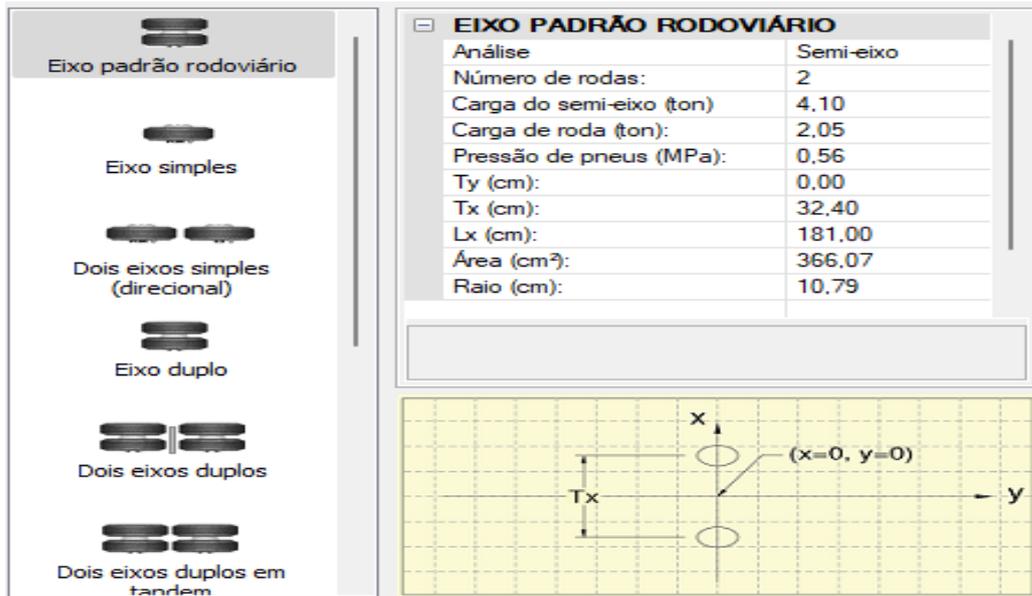
Para pavimentos flexíveis normalmente são verificados os seguintes critérios:

- **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 0,560 MPa (5,60 kgf/cm²).

Figura 2: Tipo de Carregamento – Eixo Padrão



Fonte: Quadro Software AEMC

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

- (X=0 cm; Y=0 cm);
- (X=17 cm; Y=0 cm);

Os pontos de análise mecânica estão sintetizados logo a seguir:

Tabela 2 – Pontos Analisados/Defeitos

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 (σ_x e ϵ_x)	Trincamento do revestimento por fadiga
Fibra inferior da camada de base cimentada	Tensão de deformação de tração (Base cimentada.) - (σ_x e ϵ_x)	Trincamento da camada de base cimentada por fadiga
Topo da superfície da camada de subleito	Tensão ou deformação de compressão (σ_y e ϵ_y)	Deformação permanente

Fonte: do Autor

Nesta análise será utilizado o programa AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas, para o cálculo das tensões e deformações solicitantes na estrutura do pavimento.

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 – Jan/2016). Assim, foram selecionados os seguintes modelos:

a) Deslocamento Vertical Recuperável (Deflexão).

O deslocamento vertical recuperável máximo da superfície do pavimento que também é denominado deflexão. Para a verificação deste critério foi considerada a equação do método **DNER-PRO 11/79**.

– **DNER-PRO 11/79**

$$\log D_{Adm} = 3,01 - 0,176 \times \log N^{(USACE)}$$

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) Deformação Específica de Tração (ϵt) da Fibra Inferior da Camada de Concreto Asfáltico.

Dentre as inúmeras equações de fadiga desenvolvida por pesquisadores em estudos nacionais e internacionais, recomenda-se para a camada de revestimento de concreto asfáltico o emprego de umas das expressões matemáticas cujos parâmetros são indicados nas seguintes equações:

$$N = K \times (1 / \epsilon t)^n$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ϵt : deformação específica horizontal na tração;

K e **n**: coeficientes determinados por regressões lineares.

– **FHWA (1976):**

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

Obs: Deve-se considerar que o número *N* resultante é o obtido pela metodologia da **AASHTO**.

c) Para a base ou sub-base de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), as deformações horizontais de tração, ε_t , ou tensões horizontais de tração, σ_t , na fibra inferior da camada de BGTC, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, podem causar sua ruptura por fadiga se forem excessivas. Para a análise mecânica recomenda-se utilização de equação de fadiga quanto à flexão de misturas de BGTC desenvolvida por Balbo (1993), apresentada a seguir:

$$N = 10^{(17,137 - 19,608 \times SR)}$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

SR: relação entre tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada e a resistência a tração na flexão do material aos 28 dias. Com: $SR = \frac{\sigma_t}{f_{ctk}} \therefore f_{ctk} = 10$ kgf/cm².

Deve-se considerar que o número “N” resultante é o obtido pela metodologia da **USACE**.

d) Deformação Vertical no Topo da Camada de Subleito.

Para análise da deformação específica vertical de compressão atuante no topo do subleito foi utilizada a equação desenvolvida por *Dormon & Metcalf* (1965), constante da Instrução de Pavimentação do DER-SP, expressos pelas seguintes equações:

$$N = K \times (1/\varepsilon_v)^n$$

– **Dormon & Metcalf (1965):**

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

Sendo:

N = número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 KN. Acumulado para o período de projeto, segundo metodologia do *USACE*;

ϵ_v = deformação específica de compressão no topo do subleito.

5.0 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 – IP-DE-P00/001 - DER/SP – Jan/2006 – apresenta alguns valores típicos de coeficientes de Poisson, também são apresentados valores típicos de módulo de resiliência ou elasticidade para os materiais das camadas de pavimentos, conforme Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Valores Usuais de Coeficiente de Poisson

Material	Intervalo de Valores de Coeficiente de Poisson	Valor Recomendado de Coeficiente de Poisson
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

Fonte: Instrução de Projeto de Pavimentação – IP-DE-P00/001 - DER/SP – Jan/2006

Tabela 4 – Valores Típicos de Módulos de Resiliência

CAMADAS	TIPOS	ESTIMATIVAS EM MPa
SUBLEITO	LATERÍTICO (LA' e LG')	$E_{SL} = 22,0 (CBR)^{0,8}$
	NÃO LATERÍTICO (NS' e NG')	$E_{SL} = 18,0 (CBR)^{0,64}$
	ARENOSO <i>POUCO</i> OU NÃO COESIVO (LA, NA e NA')	$E_{SL} = 14,0 (CBR)^{0,7}$
REFORÇO	LATERÍTICO (LA' e LG')	$E_{REF} = 22,0 (CBR)^{0,8}$
	NÃO LATERÍTICO (NA' e NG')	$E_{REF} = 18,0(CBR_{REF})^{0,64} \times \sqrt[3]{\frac{3CBR_{SL}}{CBR_{REF}}}$
SUB-BASE	GRANULAR	$E_{REF} = 18,0(CBR_{SB})^{0,64} \times \sqrt[3]{\frac{3CBR_{SL}}{CBR_{SB}}}$
BASE	GRANULAR	$100 \leq E_B \leq 500$
	BETUMINOSA	$800 \leq E_B \leq 1.000$
	CIMENTADA (BGTC)	$5.000 \leq E_B \leq 15.000$
MISTURAS BETUMINOSAS	CONCRETO ASFÁLTICO (C.A.)	$3.000 \leq E_{CA} \leq 5.000$
	PRÉ-MISTURADO A QUENTE (PMQ)	$2.000 \leq E_{PMQ} \leq 2.500$
	BINDER	$1.400 \leq E_{BD} \leq 1.800$
	PRÉ-MISTURADO A FRIO (PMF) OU MACADAME BETUMINOSO SELADO	$1.000 \leq E_{PMF} \leq 1.400$

Fonte: Instrução de Projeto de Pavimentação – IP-DE-P00/001 - DER/SP – Jan/2006

Na IP-08/2004 PMSP Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento também são apresentados valores típicos de módulo de resiliência ou elasticidade para os materiais das camadas de pavimentos, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Estimativas dos Módulos de Resiliência

Materiais	Intervalo de Valores de Módulos 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 Estab. Quimicamente	
Solo Cimento	5000 – 10000
Brita Graduada Tratada com Cimento	7000 – 18000
Concreto Compactado com Rolo	7000 – 22000
Concreto de Cimento Portland	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 Portland	28000 – 45000

Fonte: Instrução de Projeto de Pavimentação – IP-08/2004-PMSP

Em seguida são apresentados os dados para o desenvolvimento dos cálculos, tais como: Módulos de Resiliência e Coeficientes de Poisson, de acordo com a tabela 28, localizada na página 52/370 do Relatório **Anexo A**.

Tabela 6 – Módulos de Resiliência e Coeficientes de Poisson – Empresa STE

Tabela 28. Estrutura do pavimento e valores usuais de Módulo de Resiliência e Poisson

Camada	Tipo	Módulo de Resiliência			Poisson	CBR (%)
		Estimativa em MPa	Fonte	Estimativa em kgf/cm ²		
Mistura Betuminosa	Concreto Asfáltico ⁽¹⁾	3.000 < E < 5.000	IP-08/2004	37.500	0,30	-
		2.000 < E < 5.000	IP-DE-P00/001			
	Binder ⁽¹⁾	1.400 < E < 1.800	IP-08/2004	20.500	0,30	-
		2.000 < E < 3.000	IP-DE-P00/001			
Base	Brita Graduada Simples ⁽¹⁾ ou Cascalho Amarelo	100 < E _B < 500	IP-08/2004	2.600	0,35	100
		150 < E _B < 300	IP-DE-P00/001			
	BGTC ⁽¹⁾	5.000 < E _B < 15.000	IP-08/2004	112.500	0,35	100
		7.000 < E _B < 18.000	IP-DE-P00/001			100
	Solo + BGS + Cimento	100 < E _B < 500	IP-08/2004	3.000	0,35	100
		-	IP-DE-P00/001			100
Sub-base	Solo local com 4% de cal ou Cascalho Amarelo	$E_{REF} = 18,0(CBR_{SB})^{0,64} \times \sqrt{\frac{3CBR_{SL}}{CBR_{SB}}}$	IP-08/2004	1.750	0,20	20
		150 < E _B < 300	IP-DE-P00/001			
Subleito	Não Laterítico	$E_{SL} = 18,0 (CBR)^{0,64}$ (2)	IP-08/2004	570 ⁽³⁾	0,40	5,0
		25 < E _B < 75	IP-DE-P00/001			

Fonte: Projeto de Pavimentação da Duplicação da DF-010, página 52/370 – Empresa STE

5.1 Determinação dos Módulos de Resiliência

Os Módulos de Resiliência e Coeficientes de Poisson foram definidos pela Empresa Projetista conforme Tabela 2 – **Anexo A**, anexada anteriormente.

5.1.1 Módulo de Resiliência, Massa Específica Aparente Seca e Coeficiente de Poisson

5.1.1.1 Módulo de Resiliência – Subleito

$MR_{\text{subleito}} = 57,0 \text{ MPa}$.

Massa Específica Média Aparente Seca igual a 1,57 g/cm³.

Coeficiente de Poisson adotado igual a 0,40.

5.1.1.2 Módulo de Resiliência – Sub-base

$MR_{\text{sub-base}} = 175,0 \text{ MPa}$.

Massa Específica Média Aparente Seca igual a $1,780 \text{ g/cm}^3$.

Coeficiente de Poisson adotado igual a 0,20.

5.1.1.3 Cálculo do Módulo de Resiliência – Base (Solo Local + BGS + 2,0% de Cimento Portland – CP-II F)

$MR_{\text{sub-base}} = 300 \text{ MPa}$.

Massa Específica Média Aparente Seca igual a $1,950 \text{ g/cm}^3$.

Coeficiente de Poisson adotado igual a 0,35.

5.1.1.4 Módulo de Resiliência – Revestimento Asfáltico

Para a camada de ligação composta por Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) – Binder – Faixa “B”, adotou-se o Módulo de Resiliência igual a **2.050 MPa** . A Densidade igual a $2,4 \text{ g/cm}^3$ e Coeficiente de Poisson igual a 0,30.

Para a camada de rolamento composta por Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) – Faixa “C”, adotou-se o Módulo de Resiliência igual a **3.750 MPa** . A Densidade igual a $2,4 \text{ g/cm}^3$ e Coeficiente de Poisson igual a 0,30.

6.0 Readequação da Estrutura do Pavimento da Duplicação da DF-010

Conforme solicitado pela SUTEC, será realizado um estudo com o propósito de verificar a melhor e mais adequada configuração das camadas, observando as espessuras que irão compor o pavimento proporcionando a vida útil (horizonte de projeto) determinada, de modo que esta estrutura do pavimento resista aos rigores do tráfego de veículos comerciais de cargas, ônibus e demais veículos que trafegarem pela rodovia com desempenho satisfatório observando as referências e determinações contidas no Manual de Pavimentação do DNIT – Publicação 719/2006 – IPR. Os Números N (AASHTO e USACE) a serem utilizados para o desenvolvimento dos cálculos das espessuras das camadas da estrutura do pavimento serão os determinados pela Empresa Projetista conforme descrito em seu Relatório de Projeto

de Pavimentação – **Anexo A**. Para o horizonte de projeto (vida útil) serão utilizados os seguintes Números N:

$$N_{USACE} = 2,70 \times 10^7$$

$$N_{AASHTO} = 9,41 \times 10^6$$

Primeiramente cada estrutura será testada mecanisticamente para verificar se esta atende aos critérios mecanísticos em empíricos, conforme citado anteriormente será utilizado para este estudo o Software – Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC.

De acordo com o Relatório de Projeto, no subitem 5.6 Considerações Finais, localizado na página 75/370 – **Anexo A**, a solução mais economicamente viável foi a composta por base em Material Terroso + BGS + 2,0% de Cimento Portland, Sub-base composta por Material Terroso com adição de 4,0% de Cal Hidratada tipo CH-I - Calcítica. Com isso, iniciaremos utilizando a seguinte estrutura:

- Camada de Rolamento em CAUQ (30/45), Faixa C – e = 4,0 cm;
- Camada em CAUQ (30/45), Faixa C – e = 6,0 cm;
- Base em Solo local + BGS + 2,0% de Cimento Portland CP – 32 F – e = 18,0 cm;
- Sub-base em Material Terroso + 4,0% Cal Hidratada – CH-I – e = 17,0 cm;
- Sub-base em Material Terroso + 4,0% Cal Hidratada – CH-I), com e = 18,0 cm;
- Subleito – ISC = 7,1%.

Tabela 7 – Verificação Mecânica – DF-010 – Base em Material Terroso + BGS + 2,0% de Cimento Portland e CAUQ Convencional

VERIFICAÇÃO MECÂNICA							
N USACE	2,70E+07						
N AASHTO	9,41E+06						
DADOS DA ESTRUTURA ANALISADA 12 - DF-010 - (Vida útil de 10 anos)							
CAMADA	MATERIAL	ESP. (cm)	MR (Kgf/cm²)	Poisson			
Revestimento	CBUQ (FAIXA C)	3,50	37500	0,30			
Revestimento	CBUQ (FAIXA C)	6,00	37500	0,30			
Base	Solo + BGS + 2,0% Cimento	18,00	3000	0,35			
Sub-base	Solo + 4,0% de Cal Hidratada	17,00	1750	0,20			
Sub-base	Solo + 4,0% de Cal Hidratada	18,00	1750	0,20			
Subleito	Material Terroso	Infinita	570	0,40			
1 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE TRAÇÃO (ET) DA FIBRA INFERIOR DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO							
Autor	Ano	K	n	N-AASHTO	Admissível Modelo Et	Solicitante AEMC Et	Verificação
FHWA (1976)	1976	1,092E-06	3,512	9,41E+06	2,07E-04	1,97E-04	Aprovado
2 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE COMPRESSÃO (EV) DO TOPO DA CAMADA DE SUBLEITO							
Autor	Ano	K	n	N-USACE	Admissível Modelo Et	Solicitante AEMC Ev	Verificação
Dormon & Metcalf	1965	6,069E-10	4,762	2,70E+07	3,19E-04	3,24E-04	Reprovado
3 - DEFLEXÃO NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO							
Procedimento	Ano	K	n	N-USACE	Admissível Modelo Dadm (x0,01 mm)	Solicitante AEMC Daemc	Verificação
DNER - PRO 11/79	1979	3,01	0,176	2,70E+07	50,36	45,17	Aprovado

Fonte: do Autor (dados obtidos no software AEMC)

Diante dos resultados apresentados acima, verificou-se que a estrutura apresentada, não atendeu, quando avaliado pelo Método Mecanicista Empírico, ao critério de deformação específica de compressão no topo da camada de subleito.

Diante do exposto, prosseguiremos com a verificação mecânica da estrutura de pavimento a seguir:

- Camada de Rolamento em CAUQ (30/45), Faixa C – e = 4,0 cm;
- Camada em CAUQ (30/45), Faixa C – e = 6,0 cm;
- Base em Solo local + BGS + 2,0% de Cimento Portland CP – 32 F – e = 18,0 cm;
- Sub-base em Material Terroso + 4,0% Cal Hidratada – CH-I – e = 18,0 cm;
- Sub-base em Material Terroso + 4,0% Cal Hidratada – CH-I), com e = 18,0 cm;
- Subleito – ISC = 7,1%.

Tabela 8 – Verificação Mecânica – DF-010 – Base em Material Terroso + BGS + 2,0% de Cimento Portland e CAUQ Convencional – Aprovada.

VERIFICAÇÃO MECÂNICA							
N USACE	2,70E+07						
N AASHTO	9,41E+06						
DADOS DA ESTRUTURA ANALISADA 6 - DF-010 - (Vida útil de 10 anos)							
CAMADA	MATERIAL	ESP. (cm)	MR (Kgf/cm²)	Poisson			
Revestimento	CBUQ (FAIXA C)	4,00	37500	0,30			
Revestimento	CBUQ (FAIXA C)	6,00	37500	0,30			
Base	Solo + BGS + 2,0% Cimento	18,00	3000	0,35			
Sub-base	Solo + 4,0% de Cal Hidratada	18,00	1750	0,20			
Sub-base	Solo + 4,0% de Cal Hidratada	18,00	1750	0,20			
Subleito	Material Terroso	Infinita	570	0,40			
1 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE TRAÇÃO (ET) DA FIBRA INFERIOR DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO							
Autor	Ano	K	n	N-AASHTO	Admissível Modelo Et	Solicitante AEMC Et	Verificação
FHWA (1976)	1976	1,092E-06	3,512	9,41E+06	2,07E-04	1,97E-04	Aprovado
2 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE COMPRESSÃO (EV) DO TOPO DA CAMADA DE SUBLEITO							
Autor	Ano	K	n	N-USACE	Admissível Modelo Et	Solicitante AEMC Ev	Verificação
Dormon & Metcalf	1965	6,069E-10	4,762	2,70E+07	3,19E-04	3,17E-04	Aprovado
3 - DEFLEXÃO NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO							
Procedimento	Ano	K	n	N-USACE	Admissível Modelo Dadm (x0,01 mm)	Solicitante AEMC Daemc	Verificação
DNER - PRO 11/79	1979	3,01	0,176	2,70E+07	50,36	44,93	Aprovado

Fonte: do Autor (dados obtidos no software AEMC)

Pelo resultado exposto acima, verificamos que a estrutura testada foi aprovada e atende aos critérios mecanicistas empíricos.

7.0 Solução de Pavimento – Duplicação da DF-010.

7.1 Base composta por mistura de: Material Terroso + Brita Graduada Simples + 2,0% de Cimento Portland e Concreto Asfáltico Convencional.

Tabela 9 – Intervenções Necessárias – DF-010 – Base em Material Terroso + BGS + 2,0% de Cimento Portland e CAUQ Convencional

DF-010 – Pavimentação (Duplicação)
Número N (USACE) = $2,70 \times 10^7$
Número N (AASHTO) = $9,41 \times 10^6$
<u>Estrutura do Pavimento</u>
- Camada de Rolamento em CAUQ (30/45), Faixa C – e = 4,0 cm;
- Camada em CAUQ (30/45), Faixa C – e = 6,0 cm;
- Base em Material Terroso + BGS + 2,0% de Cimento Portland – e = 18,0 cm;
- Sub-base em Material Terroso + 4,0% Cal Hidratada – CH-I – e = 18,0 cm;
- Sub-base em Material Terroso + 4,0% Cal Hidratada – CH-I) – e = 18,0 cm;
- Subleito – ISC = 7,1%.
<u>Intervenções Necessárias</u>
- Executar camada de subleito com 60,0 cm de espessura, sendo 03 camadas de 20,0 cm cada uma, compactadas na Energia Intermediária com GC $\geq 100,0\%$, com ISC $\geq 7,1\%$, conforme a Especificação DNIT 108/2009-ES;
- A deflexão recuperável a ser obtida sobre a superfície acabada deverá ser de 130 centésimos de milímetros;
- Executar a 1ª camada de sub-base com 18,0 cm de espessura, em Material Terroso, conforme orientação que consta no Relatório de Projeto com relação as Caixas de Empréstimo + 4,0% de Cal Hidratada Tipo CH-I, compactada na Energia Intermediária com GC $\geq 100,0\%$, ISC $\geq 20,0\%$; conforme Especificação Técnica ET-DE-P00/005 – abril de 2006 – DER-SP, com exceção do subitem 3.1, onde quando da execução da obra, a Cal Hidratada CH-I, deverá atender o subitem 5.1 Exigências químicas, conforme Especificação Técnica ABNT NBR 7175/2003, concomitantemente atendendo a Especificação DNIT 421/2019-ES. Para o cálculo da massa de Cal Hidratada a ser adicionada a mistura, considerar

a Massa Específica Aparente Seca do Material Terroso igual a $1,670 \text{ g/cm}^3$. Sugerimos que a distribuição da Cal CH-I, seja realizada por meio de caminhão distribuidor;

- A deflexão recuperável a ser obtida sobre a superfície acabada deverá ser de 114 centésimos de milímetros;

- Executar a 2ª camada de sub-base com 18,0 cm de espessura, em Material Terroso, conforme orientação que consta no Relatório de Projeto com relação as Caixas de Empréstimo + 4,0% de Cal Hidratada Tipo CH-I – Calcítica, compactada na Energia Intermediária com $GC \geq 100,0\%$, $ISC \geq 20,0\%$; conforme Especificação Técnica ET-DE-P00/005 – abril de 2006 – DER-SP, com exceção do subitem 3.1, onde quando da execução da obra, a Cal Hidratada CH-I, deverá atender o subitem 5.1 Exigências químicas, conforme Especificação Técnica ABNT NBR 7175/2003, concomitantemente atendendo a Especificação DNIT 421/2019-ES. Para o cálculo da massa de Cal Hidratada a ser adicionada a mistura, considerar a Massa Específica Aparente Seca do Material Terroso igual a $1,670 \text{ g/cm}^3$. Sugerimos que a distribuição da Cal CH-I - Calcítica, seja realizada por meio de caminhão distribuidor;

- A deflexão recuperável a ser obtida sobre a superfície acabada deverá ser de 107 centésimos de milímetros;

- Executar camada de base com 18,0 cm de espessura, estabilizada granulometricamente e quimicamente, composta por Brita Graduada Simples (BGS) + Material Terroso Fino + 2,0% de Cimento Portland, o material terroso deverá ser retirado das Caixas de Empréstimo, conforme orientação que consta no Relatório do Projeto – **Anexo A**;

Deverá ser utilizada a Especificação Técnica DNIT 141/2022, com $ISC \geq 80,0\%$ para Número N $> 5 \times 10^6$. Para o cálculo da massa de Cimento Portland a ser adicionada a mistura, considerar a Massa Específica Aparente Seca igual a $1,82 \text{ g/cm}^3$. Sugerimos que a distribuição da Brita Graduada Simples e do Cimento Portland sejam realizadas por meio de caminhão distribuidor;

- A deflexão recuperável a ser obtida sobre a superfície acabada deverá ser de 80 centésimos de milímetros;

- Execução de Imprimação com Emulsão Asfáltica Imprimante (EAI), taxa de aplicação de 0,9 a $1,3 \text{ l/m}^2$, conforme Especificação DNIT 144/2014 – ES;

- Executar Pintura de Ligação, com emulsão asfáltica diluída com água com proporção de 1:1, tipo RR-1C, taxa de aplicação de 0,8 a 1,0 l/m² e taxa residual entre 0,4 e 0,5 l/m², conforme Especificação DNIT 145/2014 – ES;
- Executar Camada Asfáltica com 6,0 cm de CAUQ Faixa C – CAP 30/45, em toda a plataforma, conforme Especificação DNIT 031/2006 – ES e ET-DE-P00/027 – Rev. A – Jul/2005. Para fins de Licitação considerar teor de CAP igual a 5,5%;
- A deflexão recuperável a ser obtida sobre a superfície acabada deverá ser de 52 centésimos de milímetros;
- Executar Pintura de Ligação, com emulsão asfáltica diluída com água com proporção de 1:1, tipo RR-1C, taxa de aplicação de 0,8 a 1,0 l/m² e taxa residual entre 0,4 e 0,5 l/m², conforme Especificação DNIT 145/2014 – ES;
- Executar Camada Asfáltica com 4,0 cm de CAUQ Faixa C – CAP 30/45, somente nas faixas de rolamento, conforme Especificação DNIT 031/2006 – ES e ET-DE-P00/027 – Rev. A – Jul/2005. Para fins de Licitação considerar teor de CAP igual a 5,5%;
- A deflexão recuperável a ser obtida sobre a superfície acabada deverá ser de 45 centésimos de milímetros.

Fonte: do Autor

Brasília, 21 de dezembro de 2023.



Eng. Civil Willkerson Victor da Silva
Gerente de Estudos Tecnológicos
SUTEC/DITEC/GETEC
Mat. 221.148-3