



**RODOVIA MUNICIPAL MICHEL FERÉS HADDAD –
CORNÉLIO PROCÓPIO/PR**

**RELATÓRIO TÉCNICO DESTINADO À ANÁLISE DE
SOLUÇÕES DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO**

JANEIRO/2024



SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	3
2. MAPA DE SITUAÇÃO.....	4
3. ESTUDOS GEOTÉCNICOS	6
4. ESTIMATIVA DE TRÁFEGO ATUANTE.....	7
5. PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO.....	8
5.1. Capacidade de Suporte do Subleito	8
5.2. Classificação MCT	12
5.3. Retroanálise de Pavimento Existente – Métodos e Resultados.....	15
5.3.1. Análise das Condições Estruturais	16
5.3.2. Conceitos de Deformabilidade de Pavimentos	17
5.3.3. Definição dos Segmentos Homogêneos	29
5.3.4. Cálculo de Valores Característicos	31
5.3.5. Resultado da Análise de Dados.....	31
5.3.6. Diagnóstico do Pavimento Existente.....	40
5.4. Dimensionamento do Pavimento – Método Mecanístico	41
5.4.1. Modelos de Ruptura.....	44
5.4.1.1. Propriedades dos Materiais Constituintes da Estrutura	49
5.4.2. Condição de Aderência.....	53
5.4.3. Análise das Estruturas Projetadas	54
5.4.4. Validação das estruturas e proposição de alternativas.....	54
5.4.4.1. Alternativa F-1 (8,0cm): Flexível - CAUQ.....	54
5.4.4.2. Alternativa F-2 (8,0cm): Flexível - CAMP	56
5.4.4.3. Alternativa F-3 (5,0cm): Flexível - CAMB.....	58
5.4.5. Definição da Solução de Pavimento	60
5.5. Estrutura Final	61
5.6. Particularidades Construtivas	61
6. ESPECIFICAÇÕES DE SERVIÇO	63



1. APRESENTAÇÃO

O presente documento tem por objetivo apresentar a memória de cálculo e relatório técnico referente à análise de pavimento asfáltico a ser restaurado na Estrada Municipal Michel Ferrés Haddad, após a interseção entre a BR-369 – km 83 e o acesso ao Aeroporto Municipal de Cornélio Procópio/PR.

O escopo deste trabalho foi delimitado ao segmento compreendido entre o acesso do aeroporto e a OAE existente após a Coopersmota – Frigorífico do Peixe, não intervindo na BR-369, nem quaisquer marginais e acostamentos. A figura da seção seguinte ilustra o empreendimento descrito.

A análise de pavimento foi elaborada fundamentando-se na sondagem e levantamento deflectométrico realizados pela contratada.

A validação da estrutura foi feita pelo método mecanicista com auxílio da ferramenta do MeDiNa, o AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) que fornece os esforços solicitantes dentro da estrutura. Com isso, foi possível verificar se os materiais de cada camada do pavimento atendem os respectivos modelos de ruptura notoriamente aplicados no meio técnico e científico.

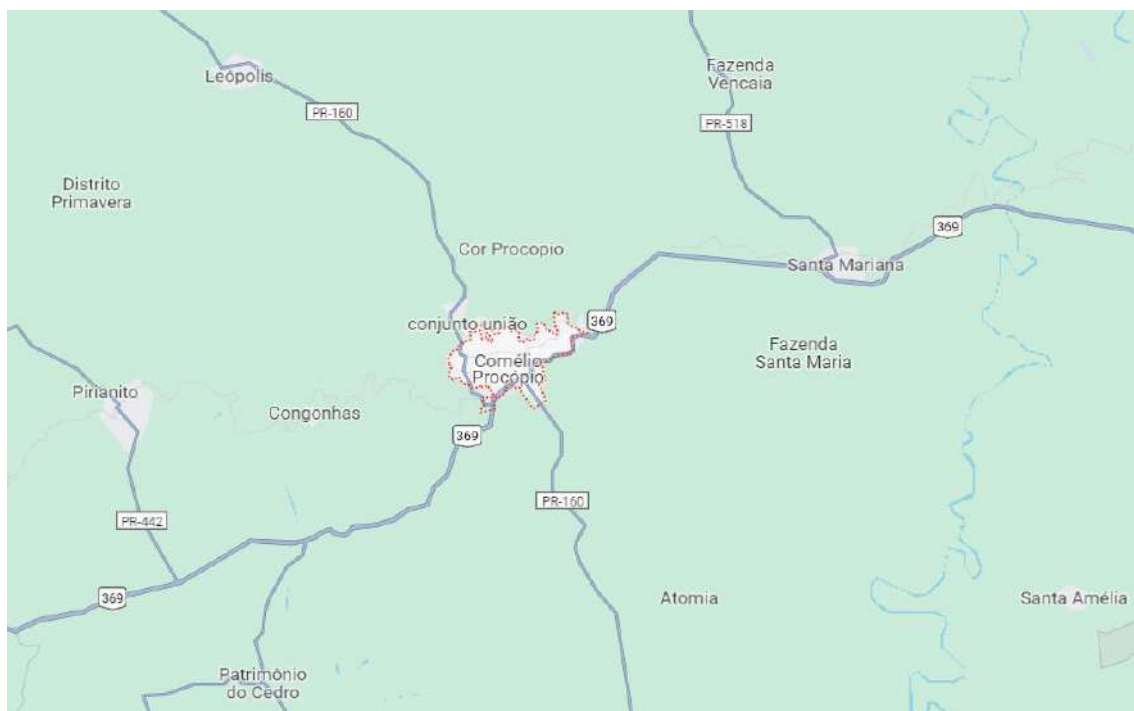
Todos os serviços descritos neste documento atendem e referenciam as Especificações de Serviços do DER/PR, emitidas em sua versão mais recente (2023).

2. MAPA DE SITUAÇÃO

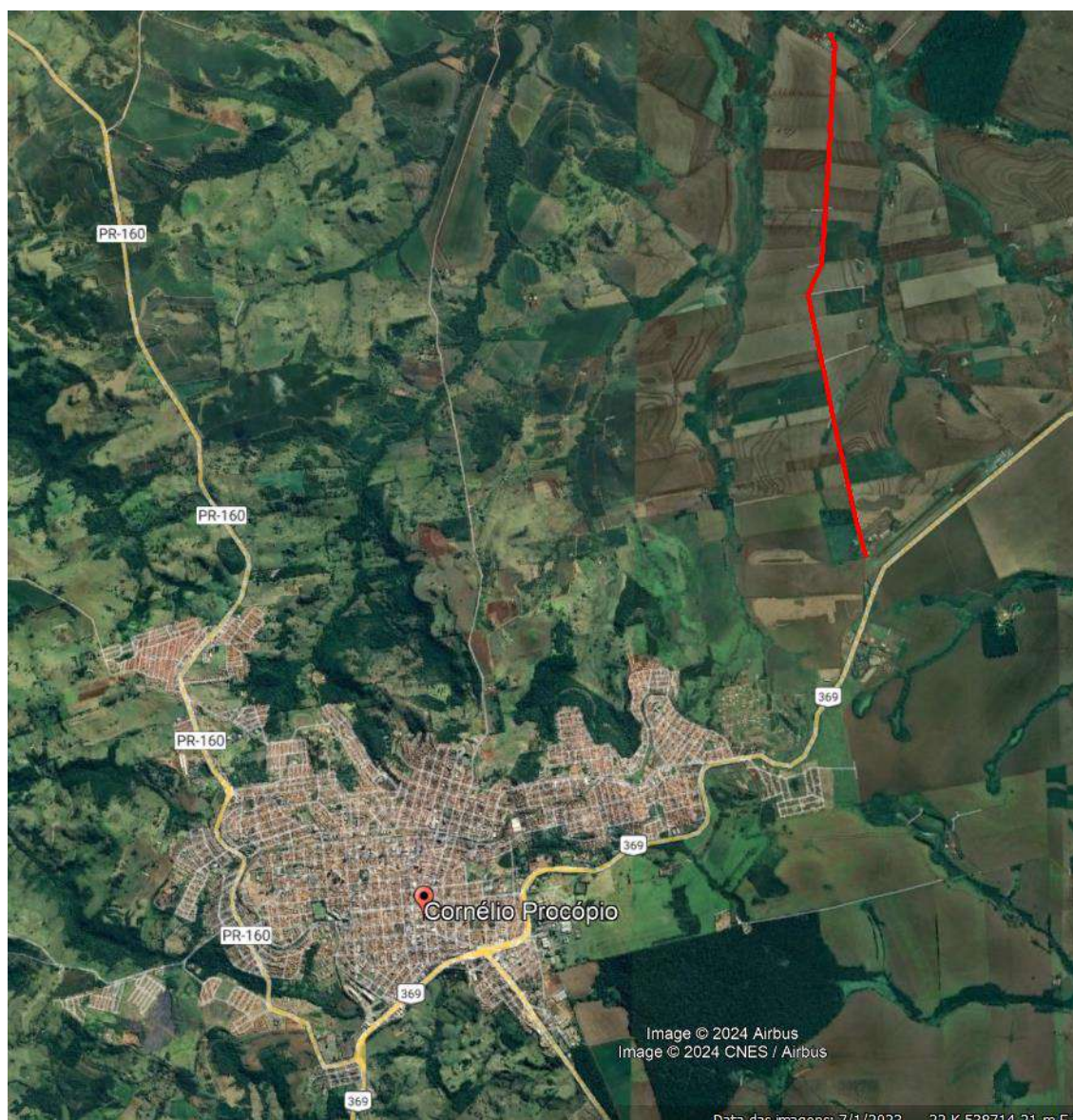
2.1. Cornélio Procópio/PR



2.2. Região de Cornélio Procópio/PR



2.3. Localização da Est. Mun. Michel Ferrés Haddad





3. ESTUDOS GEOTÉCNICOS

Os estudos geotécnicos têm objetivo de fazer o reconhecimento dos solos do subleito através da determinação dos perfis geotécnicos e a caracterização das camadas quanto a classificação, densidade, resistência, compactação, CBR e outros parâmetros determinados pela Mecânica dos Solos, conforme as necessidades específicas para solucionar situações especiais.

O presente estudo tomou como base os estudos geotécnicos elaborados pela contratante. Foram realizados 4 furos de sondagens, os quais foram locados na fora da faixa de rolamento da via em questão, não abrangendo, portanto, maiores extensões. O resumo dos resultados dos ensaios realizados estão compilados no quadro a seguir.

Coleta	Estudo	CBR (%)	EXP (%)	γ_d , máx (g/cm ³)	Wot (%)	Energia	LL (%)	LP (%)	IP (%)
ST-01	SUBLEITO	9,70	0,40	1,433	31,3	E.N.	46,5	18,0	28,5
ST-02	SUBLEITO	10,50	0,20	1,464	29,9	E.N.			
ST-03	SUBLEITO	9,60	0,40	1,441	29,4	E.N.	46,5	15,5	31,0
ST-04	SUBLEITO	9,80	0,40	1,420	27,5	E.N.			

Coleta	TRB (HRB)	IG	Tipo de Solo	Análise Granulométrica (nº) - Passante # (%)			Umidade Natural (%)
				10	40	200	
ST-01	A-7-6	12,0	Argila Siltosa	99,9	93,4	79,1	13,4
ST-02	A-7-5		Argila Siltosa				12,8
ST-03	A-7-5	11,0	Argila Siltosa	99,9	88,0	77,7	13,1
ST-04	A-7-5		Argila Siltosa				13,0



4. ESTIMATIVA DE TRÁFEGO ATUANTE

O conhecimento do tráfego passado e atual é fundamental para a definição de um diagnóstico preciso do pavimento existente. Para o dimensionamento dos pavimentos novos é necessária a estimativa adequada do tráfego futuro, sendo este parâmetro de projeto conhecido como número N.

Uma determinada frota é composta por uma quantidade de veículos com combinações de eixos distintas. O número N é a tradução e equivalência dessa frota diversificada para um número de passagens de eixos-padrão, sendo o eixo-padrão um eixo simples de rodas duplas com carga de 80kN (8,2t).

O número N ocorre num dado intervalo de tempo, definido como período de projeto ou vida útil do pavimento, podendo variar de 10 anos para pavimentos flexíveis até 50 anos para pavimentos rígidos.

O presente trabalho tomou como base 5 (cinco) cenários distintos de tráfego, os quais foram verificados nas análises de pavimento. O quadro abaixo, resume os Números N_{USACE} e N_{AASHTO} para os Cenários 01 a 05. O horizonte de projeto considerado foi de 10 anos.

TRÁFEGO	Período de Projeto (anos)	N_{USACE}	N_{AASHTO}	N_{AASHTO}/N_{USACE}
CENÁRIO 01	10	1,10E+06	4,16E+05	0,377
CENÁRIO 02	10	1,52E+06	5,73E+05	0,376
CENÁRIO 03	10	1,94E+06	7,29E+05	0,376
CENÁRIO 04	10	2,43E+06	9,33E+05	0,383
CENÁRIO 05	10	2,98E+06	1,08E+06	0,362



5. PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO

Baseado nos estudos de tráfego e de geotecnia, foram levantadas soluções de pavimento, as quais posteriormente foram avaliadas levando em conta os aspectos construtivos, econômicos e a disponibilidade de materiais. A seguir são descritos os procedimentos realizados.

5.1. Capacidade de Suporte do Subleito

Um pavimento é um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semiespaço infinito, denominado subleito, que por sua vez, é o terreno de fundação onde será apoiado todo o pavimento. A estrutura deve ser avaliada e verificada até a profundidade em que atuem significativos esforços provenientes do tráfego. Em geral, esses esforços se dispersam entre 1,00m e 1,20m de profundidade, a partir da superfície de aplicação de carga.

A capacidade de suporte do subleito pode ser determinada diretamente por uma prova de carga estática ou por meio de correlação entre o Índice de Suporte Califórnia (CBR ou ISC) e o coeficiente de recalque (k). Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os materiais do subleito devem apresentar expansão $\leq 2\%$ e CBR $\geq 2\%$.

O presente trabalho lança mão dos resultados de ensaios geotécnicos para fins de projeto e execução de obras de pavimentação, elaborando o tratamento estatístico indicado no Manual de Pavimentação, a IPR-719 (DNIT, 2006), a fim de se obter o preliminarmente a média e os valores prováveis mínimos e máximos que podem ser encontrados no trecho, conforme modelo apresentado a seguir.

$$X_{\max} = \bar{X} + \frac{1,29\sigma}{\sqrt{N}} + 0,68\sigma$$

$$X_{\min} = \bar{X} - \frac{1,29\sigma}{\sqrt{N}} - 0,68\sigma$$

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{N}$$

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

Onde:

N = Número de amostras

X = Valor individual

$\bar{X}$ = Média aritmética

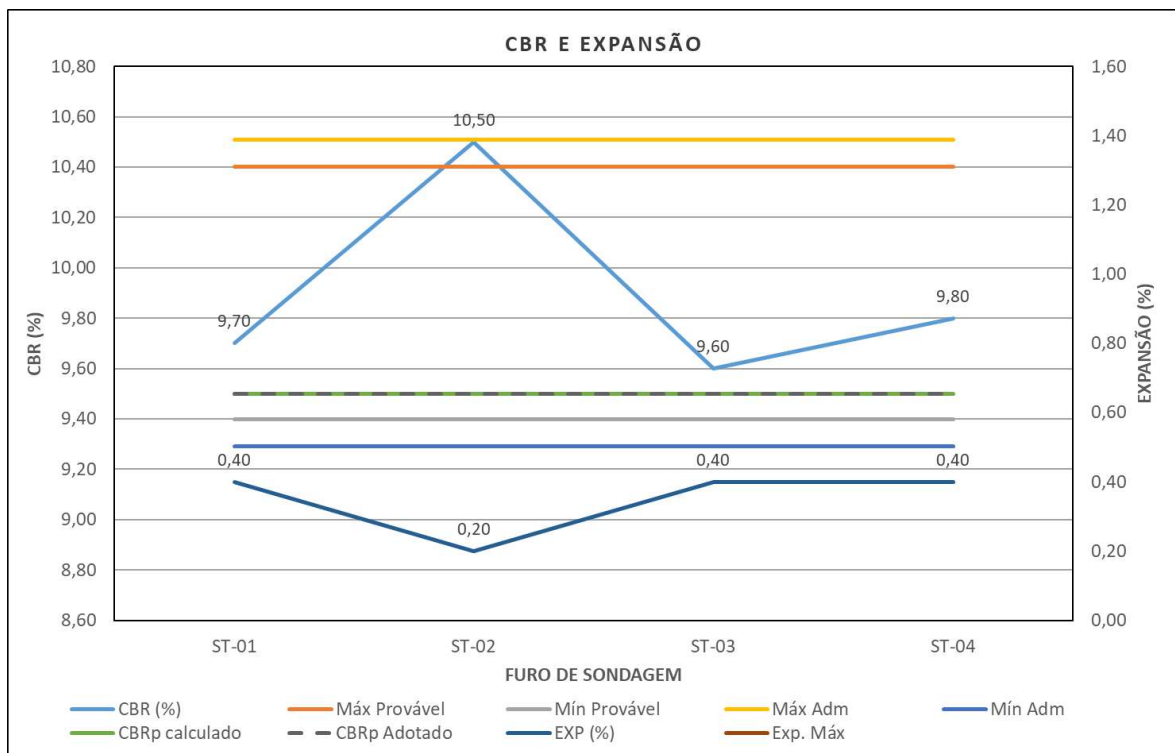
σ = Desvio Padrão

$X_{\min}$ = Valor mínimo provável, estatisticamente

$X_{\max}$ = Valor máximo provável, estatisticamente

$N > 9$ (número de determinações)

Os resultados dos 4 furos de sondagem e os respectivos valores calculados pelo método supracitado estão apresentados no gráfico a seguir.



A partir dos dados tratados é possível observar a amostra possui pequena variação em suas características físicas e mecânicas. Apresenta capacidade de

suporte do subleito pouco variável, mas com todos os valores individuais atendendo os critérios mínimos ($CBR \geq 2,0\%$; $Expansão \leq 2,0\%$).

Após a análise preliminar das características do subleito no trecho de interesse, faz-se necessário um novo tratamento estatístico com a finalidade de definir o CBR de projeto (CBR_p). Este dado, por sua vez, será utilizado também como parâmetro para correlações com módulo de elasticidade do subleito no método mecanístico de dimensionamento.

Para este efeito, o presente trabalho lança mão de uma adaptação a metodologia de cálculo contida na Norma DNER-PRO 11/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis. A metodologia consiste em avaliar a amostragem definindo valores máximos e mínimos admissíveis estatisticamente e a partir deles, excluir os valores individuais da amostragem inicial que estejam fora destes limites determinados. A operação é repetida tantas vezes quantas forem necessárias até que todos os valores da amostragem estejam dentro dos limites máximos e mínimos definidos. O tratamento estatístico é feito com as expressões, a saber:

$$X_{máx} = \bar{X} + Z\sigma$$

$$X_{mín} = \bar{X} - Z\sigma$$

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{N}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

Onde:

N = Número de amostras

X = Valor individual

$\bar{X}$ = Média aritmética

σ = Desvio Padrão

$X_{mín}$ = Valor mínimo admissível

$X_{máx}$ = Valor máximo admissível

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05

Z = Constante da equação, função de N , mediante o critério da tabela apresentada a seguir, do “Highway Research Board” – Report 17.

N	Z
3	1
4	1,5
5 - 6	2
7 - 19	2,5
≥ 20	3

Posteriormente a este tratamento, faz-se o cálculo do CBR_p , cuja expressão está contida na Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP – IP-DE-P00/001:

$$CBR_p = \overline{CBR} - \frac{\sigma \times t_{0,90}}{\sqrt{N - 1}}$$

$$\overline{CBR} = \frac{\sum CBR_i}{N}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (CBR - \overline{CBR})^2}{N - 1}}$$

Onde:

N = Número de amostras

CBR_i = Valor individual

$\overline{CBR}$ = Média aritmética

σ = Desvio Padrão

$t_{0,90}$ = Coeficiente de Student relativo ao intervalo de confiança de 90%, mediante critério da tabela apresentada a seguir.

n - 1	$t_{0,90}$	n - 1	$t_{0,90}$	n - 1	$t_{0,90}$	n - 1	$t_{0,90}$
1	3,08	11	1,36	21	1,32	40	1,30
2	1,89	12	1,36	22	1,32	60	1,30
3	1,64	13	1,35	23	1,32	120	1,29
4	1,53	14	1,34	24	1,32	∞	1,28
5	1,48	15	1,34	25	1,32		
6	1,44	16	1,34	26	1,32		
7	1,42	17	1,33	27	1,31		
8	1,40	18	1,33	28	1,31		
9	1,38	19	1,33	29	1,31		
10	1,37	20	1,32	30	1,31		

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA
CNPJ: 035.190.568/0001-05

A tabela a seguir apresenta o tratamento dos dados para aceitação dos valores mínimos e máximos, bem como o cálculo do CBR_p , de acordo com normas e instruções admitidas. O CBR estatístico calculado e adotado foi de 9,50%.

	Parâmetro	CBR (%)	EXP (%)	γ_d (g/cm ³)	Wot (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Análise Granulométrica (nº) - Passante # (%)			Umidade Natural (%)
									10	40	200	
IPR-719 (DNIT, 2006)	Nº DE AMOSTRAS	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	4
	MÉDIA	9,90	0,35	1,440	29,53	46,5	16,8	29,8	99,90	90,70	78,40	13,1
	DESVIO PADRÃO	0,41	0,10	0,018	1,57	0,00	1,77	1,77	0,00	3,82	0,99	0,3
	CONSTANTE I	1,29	1,29	1,290	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,3
	CONSTANTE II	0,68	0,68	0,680	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,7
	X máx	10,40	0,50	1,464	31,60	46,5	19,6	32,6	99,90	96,80	80,00	13,4
	X mín	9,40	0,20	1,416	27,40	46,5	13,9	26,9	99,90	84,60	76,80	12,7
	CV (%)	4,12	28,57	1,284	5,32	0,0	10,6	5,9	0,00	4,21	1,26	1,9

	Parâmetro	CBR (%)	EXP (%)	γ_d (g/cm ³)	Wot (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Análise Granulométrica (nº) - Passante # (%)			Umidade Natural (%)
									10	40	200	
DNER-PRO 11/79_IP-DE-P00	Nº DE AMOSTRAS	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	4
	MÉDIA	9,90	0,35	1,440	29,53	46,5	16,8	29,8	99,90	90,70	78,40	13,1
	DESVIO PADRÃO	0,41	0,10	0,018	1,57	0,00	1,77	1,77	0,00	3,82	0,99	0,3
	Z	1,50	1,50	1,500	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,50
	X máx	10,51	0,50	1,470	31,89	46,5	18,5	31,5	99,90	94,52	79,39	13,5
	X mín	9,29	0,20	1,410	27,17	46,5	15,0	28,0	99,90	86,88	77,41	12,7
	t _{0,90}	1,53	1,53	1,530	1,53	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,5
	CBRp Calculado	9,50	0,40	1,400	30,90	46,5	13,4	26,4	99,90	83,50	76,50	13,3

CBRp Adotado	9,50
CBR ramo úmido	7,50
CBRp ramo úmido	3,70

5.2. Classificação MCT

Paralelamente faz-se necessário analisar as amostras segundo suas características físicas e classificação. Tal medida se justifica, uma vez que durante a etapa de projeto de dimensionamento, estes parâmetros possibilitam estimar o comportamento resiliente do solo do subleito.

Para tanto, o presente trabalho lança mão da classificação de solos MCT (Miniatura Compactada Tropical), que foi desenvolvida por Nogami & Villibor. O método possibilita correlacionar os solos tropicais com as classificações clássicas de solos norte-americanas (USCS e TRB), conforme exposto a seguir.

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05

GRANULOMETRIAS TÍPICAS			argilas siltos (q,s)	areias siltosas	siltos (k,m) siltos arenosos	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltos argilosos	areias siltosas	areias argilosas	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltos argilosos
Designações do T1-71 do DER-SP (equivalentes da Mississippi River Commission, USA)									
k=caolínico m=micáceo s= sericítico q= quartzoso									
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico				L = Laterítico		
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI-CBR (%)	sem imersão perda por imersão	M, E B, M	E B	M, E E	E E	E B	E, EE B	E B
	EXPANSÃO		B	B	E	M, E	B	B	B
	CONTRAÇÃO		B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEF. DE PERMEABILIDADE (k)		M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)		E	B, M	E	M, E	B	B	B
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal			EE = Muito Elevado (a) E = Elevado (a)		M = Médio (a) B = Baixo (a)		Vide Tabela III.3 para equivalente numérico		
Utilização	Base de pavimento		n	4°	n	n	2°	1°	3°
	Reforço do subleito compactado		4°	5°	n	n	2°	1°	3°
	Subleito compactado		4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
	Aterro (corpo) compactado		4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
	Proteção à erosão		n	3°	n	n	n	2°	1°
	Revestimento primário		5°	3°	n	n	4°	1°	2°
			n = não recomendado						
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas		USCS	SP SM	MS SC ML	SM, CL ML, MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
		AASHO	A - 2	A - 2 A - 4 A - 7	A - 4 A - 5 A - 7 - 5	A - 6 A - 7 - 5 A - 7 - 5	A - 2	A - 2 A - 4	A - 6 A - 7 - 5

Como pode ser notado, ao se comparar o universo de grupos de solos da classificação MCT com a classificação clássica, um mesmo solo tropical poderia se encaixar em dois ou mais grupos da classificação TRB, que por sua vez podem levar a interpretações ambíguas, pois irá traduzir o solo como um material de excelente e péssimo comportamento ao mesmo tempo.

Além disso, dados complementares como expansão e limites físicos foram agrupados de maneira qualitativa na classificação MCT, conforme estão apresentados no Manual de Pavimentação IPR-719 (DNIT, 2006), bem como na literatura de Villibor.

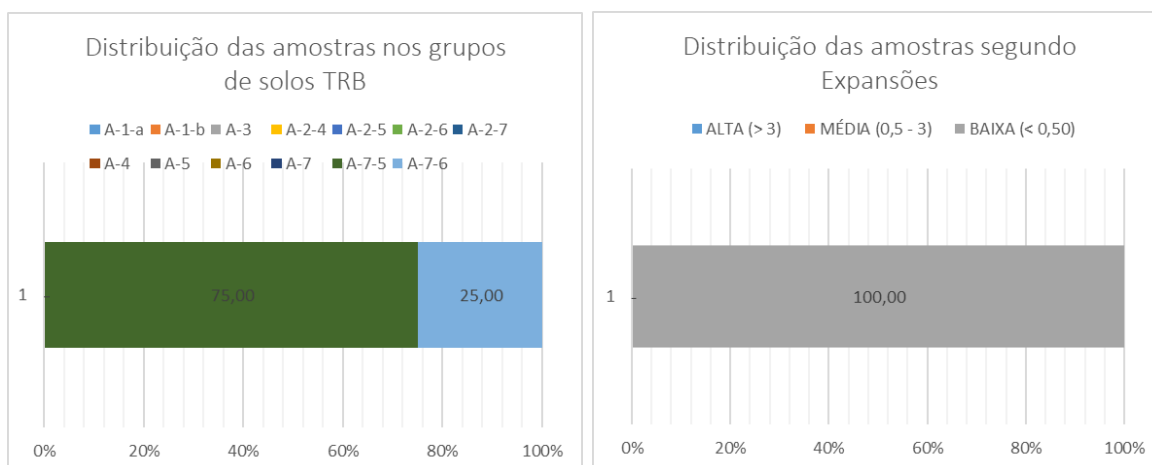
A partir dos dados obtidos nos ensaios geotécnicos, buscou-se identificar a qual dos grupos de solos pela classificação MCT as amostras majoritariamente ou provavelmente venham a pertencer.

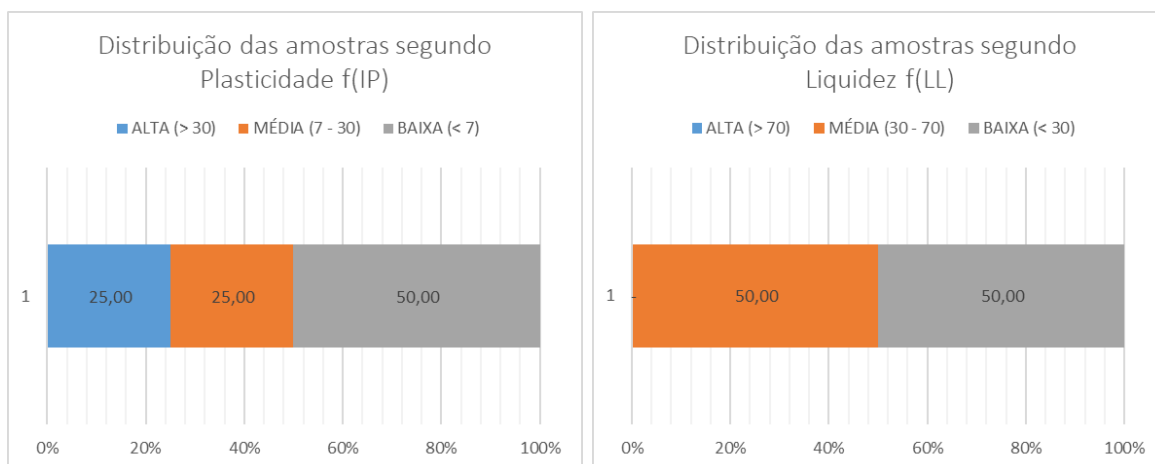
G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05

Propriedades Típicas dos Solos dos grupos da classificação MCT									
Classes			N- Solos de Comportamento "Não Laterítico"				L- Solos de Comportamento "Laterítico"		
Grupos			NA Areias	NA' Arenosos	NS' Siltosos	NG' Argilosos	LA Areias	LA' Arenosos	LG' Argilosos
Granulometrias (Minerais)	Típicas (1)		- areias - areias siltosas - siltes	- areias siltosas - areias argilosas	- siltes (k,m) - siltes arenosos e argilosos	- argilas - argilas arenosas - argilas siltosas	- areias com pouca argila	- areias argilosas - argilas arenosas	- argilas - argilas arenosas
Cap. Suporte (2)	Mini-CBR sem imersão (%)	Muito alto > 30	Alto a Médio	Alto	Médio a Alto	Alto	Alto	Alto a Muito Alto	Alto
		Alto 12-30							
		Médio 4-12							
		Baixo < 4							
	Perda de Suporte por imersão (%)	Alta > 70	Média a Baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
		Média 40-70							
		Baixa < 40							
Expansão (%) (2)	Contração (%) (2)	Alta > 3	Baixa	Baixa	Alta	Alta a Média	Baixa	Baixa	Baixa
		Média 0,5 - 3							
		Baixa < 0,5							
Permeabilidade log (K (cm/s))		Alta > (-3)	Média a Alta	Baixa	Média a Baixa	Baixa a Média	Média a Baixa	Baixa	Baixa
		Média (-3) a (-5)							
		Baixa < (-6)							
Plasticidade		Ip (%)	Baixa a Média	Média a MP	Média a MP	Alta	MP a baixa	Baixa a Média	Média a Alta
		Li (%)							
		Alta > 30							
		Média 7 - 30							
		30 - 70							
		Baixa < 7							
		< 30							

Para isso, foram plotados gráficos de barras agrupando as amostras segundo classificação TRB, expansão e plasticidade em função do Índice de Plasticidade (IP) e Limite de Liquidez (LL), conforme segue.





Com base na leitura dos gráficos foi possível correlacionar as amostras ensaiadas ao grupo de solos de comportamento Não-Laterítico NG', sendo este, o grupo da classificação MCT mais provável: baixa/média expansão, médio IP, médio LL, classificados como A-7-6 e A-7-5. Fato condizente com a caracterização em argilas siltosas encontradas.

A admissão desta classificação de solo segundo MCT, bem como o CBR_p adotado, servirão para a determinação do módulo de resiliência do solo local, parâmetro necessário para o método de dimensionamento mecânico.

Ressalta-se que o método adotado neste trabalho é uma alternativa utilizada para obter o módulo de resiliência dos solos do subleito, através da correlação entre o CBR e a classificação MCT, haja vista a ausência de ensaios de módulo resiliente. No Item 5.3.2.2 é demonstrado o cálculo deste parâmetro.

5.3. Retroanálise de Pavimento Existente – Métodos e Resultados

Todos os conceitos apresentados nesta seção encontram-se no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (IPR-720, do DNIT, 2006). Ao final, é apresentado o inventário de obra, parecer técnico (diagnóstico) e proposta de restauração das vias que fazem parte do escopo de projeto.

Segundo o manual, a condição de um pavimento representa o nível de degradação resultante dos processos associados as intempéries e ao uso contínuo do tráfego. Portanto, durante a seleção da alternativa de Restauração mais

apropriada, anterior ao dimensionamento. Os fatores de projeto mais comumente utilizados são:

- a) condição atual do pavimento com relação aos defeitos de superfície;
- b) solicitação de tráfego, em termos de número de repetições de carga por eixo padrão durante o período de projeto;
- c) capacidade estrutural do pavimento existente.

O tipo, intensidade e severidade dos defeitos na superfície do pavimento existente são considerações importantes na escolha da provável medida de Restauração.

5.3.1. Análise das Condições Estruturais

O levantamento da condição estrutural do pavimento fornece informações valiosas quanto a sua adequação estrutural, o grau de restauração e permite a seleção e dimensionamento da alternativa mais adequada de Restauração.

Quanto à aplicação dos parâmetros deflectométricos à avaliação estrutural, analisa-se o emprego da deflexão máxima, do raio de curvatura e da avaliação de módulos por retroanálise.

A avaliação estrutural do pavimento pode ser efetuada por meio dos elementos obtidos nos levantamentos dos defeitos de superfície, nos ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos.

Os defeitos existentes no pavimento causados principalmente pelas cargas de tráfego, fornecem informações importantes sobre o efeito do tráfego na estrutura do pavimento.

Os indicativos de comprometimento estrutural podem ser valores como:

- a) trincamento por fadiga > 20% da área;
- b) afundamento nas trilhas de roda > 1,2 cm

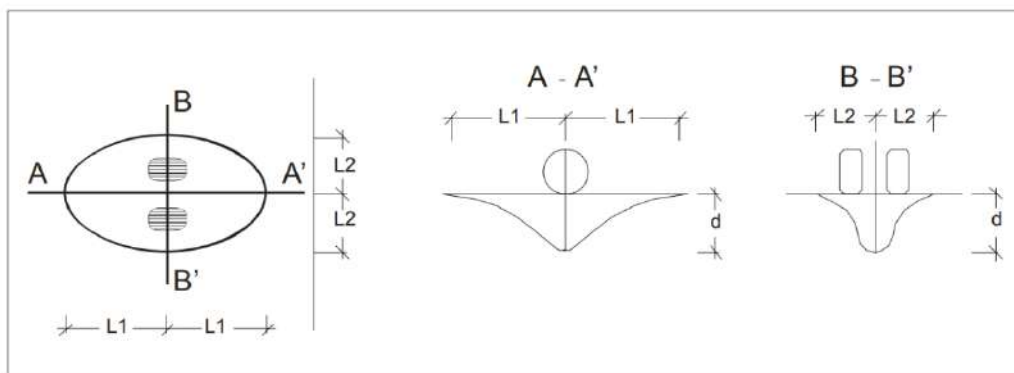
5.3.2. Conceitos de Deformabilidade de Pavimentos

A ação das cargas de tráfego sobre os pavimentos asfálticos provoca deformações de dois tipos: permanentes e recuperáveis. As deformações permanentes são aquelas que permanecem após da atuação da carga, ou seja, têm caráter residual. São exemplos de deformações permanentes aquelas geradas nas trilhas de roda pela consolidação adicional pelo tráfego, bem como as rupturas de natureza plástica.

Já as deformações ou deflexões recuperáveis representam um indicativo de comportamento elástico da estrutura, deixando de existir após a retirada da carga. As deflexões recuperáveis provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e a sua repetição é a responsável pelo fenômeno de fadiga de camadas betuminosas e cimentadas.

O estudo das deflexões ou das condições de deformabilidade dos pavimentos asfálticos é fundamental à compreensão de seu comportamento, já que estas refletem, em última análise, as condições estruturais das diversas camadas e do próprio subleito. A magnitude das deformações é variável e depende não só da geometria do carregamento, do valor da carga e da pressão de inflação do pneu, como também da posição do ponto de medida em relação à posição da carga.

Considerando-se a aplicação de uma carga de roda dupla estática, a área anexa à carga que sofrerá deformação recuperável assume a forma aproximada de uma elipse, cujo eixo maior coincide com a direção de deslocamento do tráfego. À superfície assim formada dá-se o nome de bacia de deformação, vide figura abaixo.



Uma seção longitudinal da bacia de deformação mostra que a máxima deflexão ocorre sobre o centro de carga, e que seus raios horizontais são iguais. À linha correspondente a esta seção longitudinal dá-se o nome de deformada.

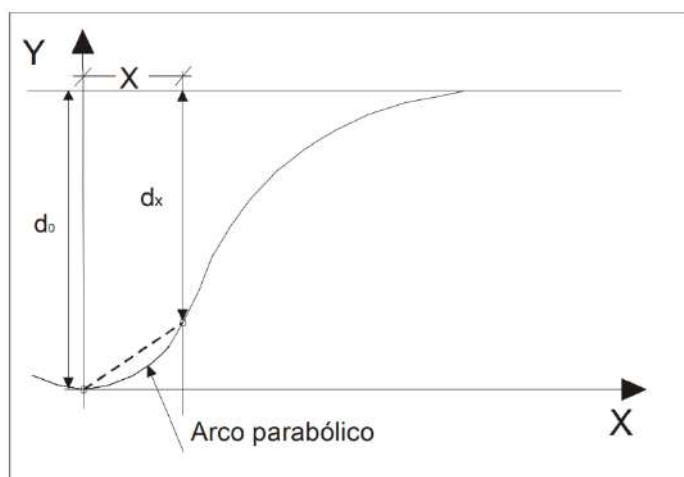
Já uma seção transversal à bacia permite verificar que seus raios horizontais são também simétricos, porém de valor inferior ao dos raios horizontais verificados na seção longitudinal. Observa-se ainda que a severidade do arqueamento transversal é maior, o que explica o fato de que as trincas de fadiga têm inicialmente sentido longitudinal.

A prática rodoviária e os equipamentos de medição desenvolvidos subentendem a determinação da deformada segundo o sentido longitudinal, ou seja, no sentido de atuação do tráfego.

A deflexão recuperável máxima (d_0) é um parâmetro importante para a compreensão do comportamento da estrutura. Quanto maior o seu valor, mais elástica ou resiliente é a estrutura, e maior o seu comprometimento estrutural.

No entanto, a análise isolada de seu valor pode não esclarecer completamente a questão, já que estruturas de pavimentos distintas podem apresentar a mesma deflexão máxima, porém com arqueamentos diferenciados na deformada. Conclui-se que a forma da deformada é um fator a ser levado em consideração na avaliação estrutural.

Um dos parâmetros ligados à forma das deformadas mais difundidos é o raio de curvatura (R), sendo um indicativo do arqueamento da deformada na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga.



A expressão de cálculo mais utilizada é a que corresponde ao ajuste de um arco parabólico que passa pelo ponto considerado, afastado genericamente do centro da carga de um valor x , e que depende da deflexão máxima e da deflexão no ponto considerado (d_x):

$$R = \frac{10x^2}{2(d_0 - d_x)}$$

Sendo: R em metros, d_0 e d_x em 0,01mm

No caso de se considerar o raio de curvatura a 25 cm, a expressão passa a ter a seguinte forma:

$$R = \frac{6250}{2(d_0 - d_{25})}$$

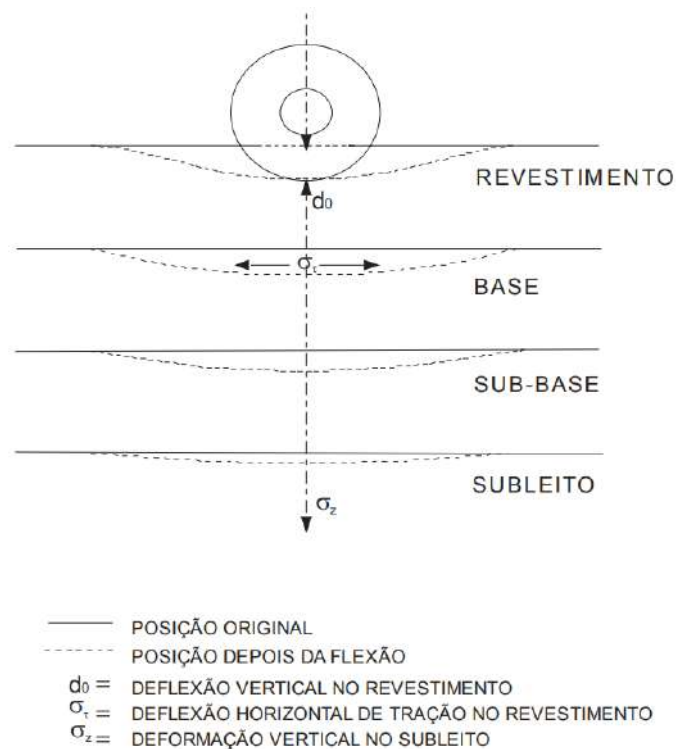
Um raio de curvatura baixo é indicativo de um severo arqueamento da deformada, denotando uma condição estrutural crítica. A análise conjunta de deflexão máxima e raio de curvatura já permite uma melhor compreensão do complexo comportamento das estruturas de pavimentos.

5.3.2.1. Medição das Deflexões

A deflexão de um pavimento representa a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto (ou uma área) da superfície do pavimento, todas as camadas fletam devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento.

Como mostrado a seguir, o valor da deflexão em cada camada geralmente diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga e depende ainda do módulo de elasticidade das camadas. A partir de certas distâncias e profundidades as deflexões tornam-se negligenciáveis.

Os pavimentos mais sadios estruturalmente fletam menos do que outros pavimentos mais debilitados. A significativa diferença na “resposta” entre os pavimentos sadios e debilitados indica os efeitos no desempenho estrutural. Assim sendo, pavimentos com deflexões mais baixas suportam maior número de solicitações de tráfego.



Os ensaios não destrutivos avaliam a deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento (d_0) e são bastante apropriados para avaliação da capacidade estrutural. Os equipamentos mais utilizados podem ser divididos em:

- a) vigas de deflexão;
- b) equipamentos dinâmicos de vibração;
- c) equipamentos dinâmicos de impacto.

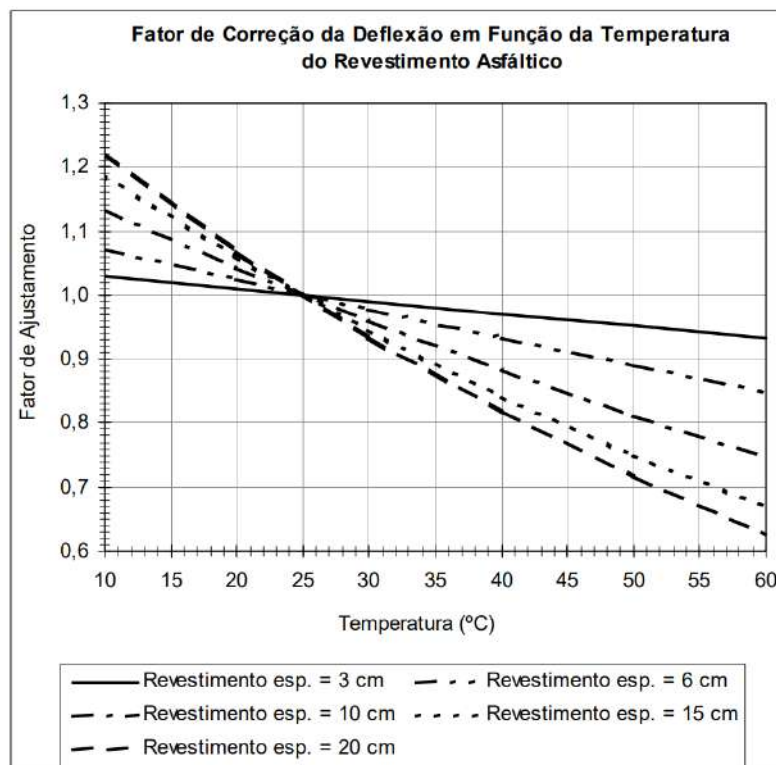
Para o presente estudo, foi empregado o uso de viga Benkelman, sendo o dispositivo mais simples e difundido para o levantamento de deflexões. Todos os procedimentos para sua utilização encontram-se nas seguintes normas:

- a) DNER-ME 24/94 - Pavimento - Determinação das deflexões no pela viga Benkelman;
- b) DNER-PRO 175/94 - Aferição de viga Benkelman;
- c) DNER-ME 061/94 - Pavimento - Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman.

Durante os levantamentos no trecho de avaliação, deve ser anotada a temperatura do revestimento asfáltico com termômetro de precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$. Deve

ser registrada, também, a ocorrência ou não de precipitação pluviométrica durante os levantamentos e nos dias da última semana anterior ao levantamento, com estimativa de sua intensidade. Estes dados são importantes para posterior correção dos valores deflectométricos.

O gráfico abaixo apresenta os fatores de correção em função da espessura do revestimento e da temperatura do revestimento no momento do ensaio.



Na etapa de retroanálise das bacias, o BackMedina opera com deflexões referentes ao FWD (*Falling Weight Deflectometer*), equipamento mais moderno para realização de levantamentos deflectométricos.

Para conversão dos valores obtidas na Viga Benkelman (D_{VB}) em FWD (D_{FWD}), emprega-se a seguinte expressão abaixo, apresentada no IPR-720 (2006).

$$D_{VB} = -5,73 + 1,396D_{FWD}$$

5.3.2.1.1. Deflexão Total (D0)

A deflexão recuperável máxima (D0) é um parâmetro importante para a compreensão do comportamento da estrutura, no qual é afetado pela condição do subleito e pelas camadas constituintes do pavimento. Quanto maior seu valor, mais

elástica ou resiliente é a estrutura, e maior o seu comprometimento estrutural. No entanto, a análise isolada de seu valor pode não esclarecer completamente a questão, já que estruturas de pavimentos distintas podem apresentar a mesma deflexão máxima, porém com arqueamentos diferenciados na deformada.

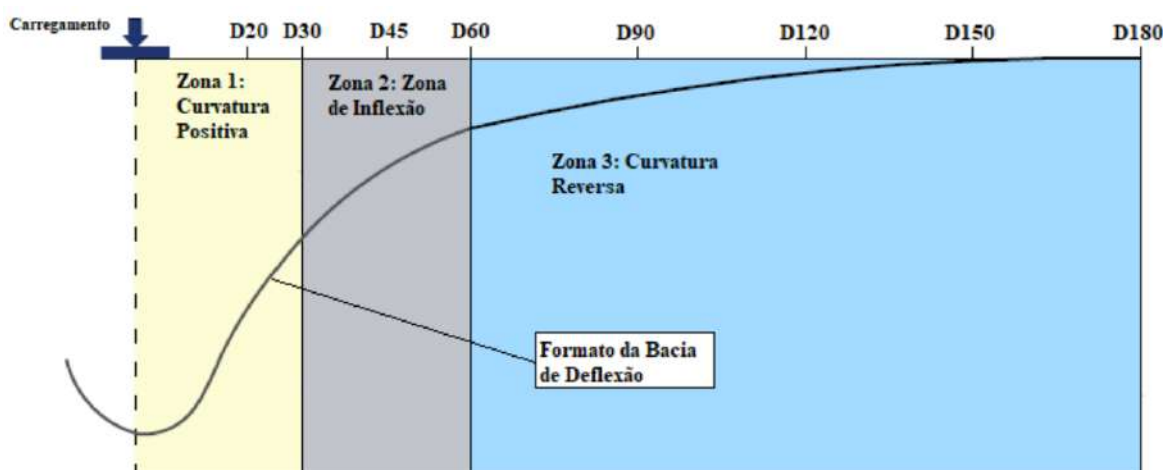
5.3.2.1.2. Raio de Curvatura (R)

O pavimento é definido por um modelo estrutural caracterizado por um sistema elástico de múltiplas camadas, que, quando submetido à ação de uma carga de roda dupla, deforma-se, apresentando o perfil longitudinal da bacia de deformação, com valores de deslocamentos verticais decrescentes com o aumento do afastamento medido a partir do centro de aplicação da carga.

5.3.2.1.3. Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação (PBD's)

O formato e a dimensão de uma bacia deflectométrica são importantes informações para as características estruturais do pavimento e do subleito. As equações de correlação (tabela a seguir), formam um conjunto de medições adequadas para fornecer informações que representem todas as camadas do pavimento, do subleito até o revestimento.

A bacia pode ser basicamente descrita em termos de três zonas distintas (Figura a seguir): Zona 1: próxima ao ponto de aplicação da carga, onde a curvatura é positiva; Zona 2: onde a bacia de deflexão muda de uma curvatura positiva para uma reversa; Zona 3: mais longe da aplicação da carga, onde a deflexão tende ao valor zero.



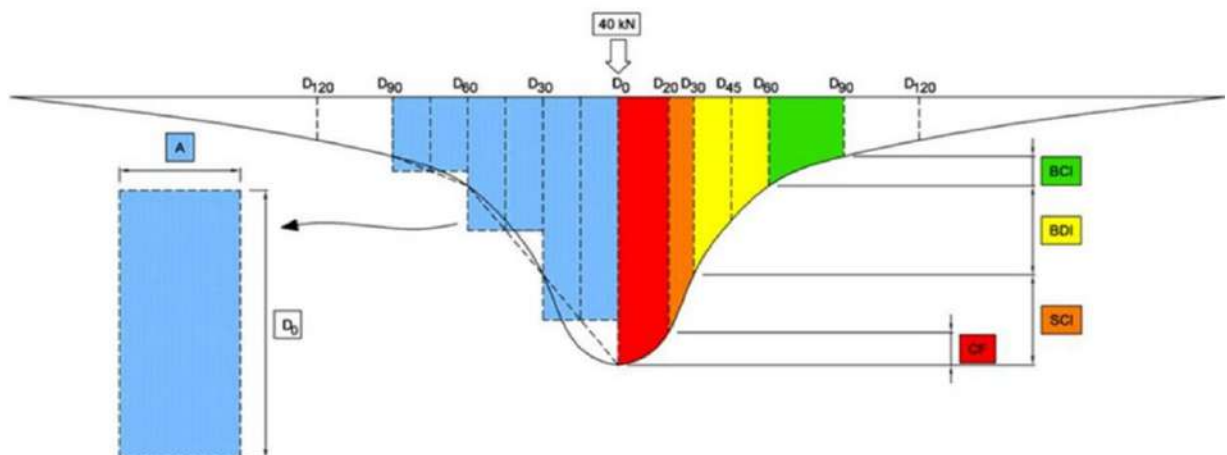
G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05

D_0 - DEFLEXÃO MÁXIMA	-	$D_0 [10^{-2} \text{ mm}]$
R - RAO DE CURVATURA	$R = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})}$	R [m]
SCI - ÍNDICE DA CURVATURA DA SUPERFÍCIE	$SCI = D_0 - D_{30}$	SCI [10^{-2} mm]
BDI - ÍNDICE DE DANOS À BASE	$BDI = D_{30} - D_{60}$	BDI [10^{-2} mm]
BCI - ÍNDICE DA CURVATURA DA BASE	$BCI = D_{60} - D_{90}$	BDI [10^{-2} mm]
CF - FATOR DE CURVATURA	$CF = D_0 - D_{20}$	CF [10^{-2} mm]
A - PARÂMETRO ÁREA	$A = 15 \times \left[1 + 2 \times \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \times \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right]$	A [cm]
S - ACHATAMENTO	$S = \frac{D_0 + D_{30} + D_{60} + D_{90}}{4 \times D_0}$	S [%] (porcentagem)
D_{120}	-	$D_{120} [10^{-2} \text{ mm}]$
$R \times D_0$	-	$R \times D_0 [\text{m} \times 10^{-2} \text{ mm}]$
R / D_0	-	$R / D_0 [\text{m} / 10^{-2} \text{ mm}]$
F_1 e F_2 - FATORES DE FORMA	$F_1 = \frac{D_0 - D_{60}}{D_{30}}$ $F_2 = \frac{D_{30} - D_{90}}{D_{60}}$	F_1 e F_2 - Adimensional

OBS: $D_0, D_{20}, D_{25}, D_{30}, D_{60}, D_{90}$ [10^{-2} mm]

Deflexões com afastamento de 20 cm, 25 cm, 30 cm, 60 cm e 90 cm do ponto de aplicação de carga.



O SCI descreve a área positiva da curvatura, ou seja, a área ao redor da aplicação da carga. Portanto reflete a capacidade estrutural da camada asfáltica e da base. O BDI descreve a zona de transição da bacia, entre a parte positiva da

curvatura e a parte reversa, refletindo a capacidade estrutural da base e sub-base das camadas. E por fim o BCI descreve a área da curvatura reversa, refletindo fortemente na capacidade estrutural das camadas inferiores, tal como as camadas de reforço do subleito e o próprio subleito.

Os PBD's utilizados são conhecidos internacionalmente e obtidos com o levantamento deflectométrico com o equipamento FWD. No Brasil, a posição dos geofones durante a aplicação do FWD geralmente são localizadas à 0, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 e 180cm do ponto de aplicação da carga e a partir desses pode-se calcular os índices. Os parâmetros mais usuais no Brasil são o Raio de Curvatura, adotado pela Norma DNER-PRO/11-79, e os parâmetros A, SCI, BDI e BCI.

I. Parâmetro de Área (A)

O parâmetro Área (A) da bacia de deformação foi calculado através da equação apresentada a seguir, segundo as recomendações do guia da AASHTO (1993).

$$A = 15 \cdot \left[1 + 2 \cdot \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \cdot \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right]$$

Onde:

A = Parâmetro Área, em cm;

D_0 , D_{30} , D_{60} e D_{90} = Deflexões às distâncias 0, 30, 60 e 90 cm respectivamente, do ponto de aplicação da carga, em 10^{-2} mm.

O valor numérico máximo que o parâmetro área pode atingir é aproximadamente 90 cm e isso ocorrerá quando as medidas de deflexões D_0 , D_{30} , D_{60} e D_{90} forem iguais, embora na prática isto seja muito difícil de verificar.

As quatro deflexões iguais ou aproximadamente idênticas numericamente indicam uma estrutura extremamente rígida, semelhante à dos pavimentos de concreto de cimento Portland ou pavimentos asfálticos espessos e de elevado módulo de resiliência.

O mínimo valor do parâmetro área é da ordem de 28cm e corresponde ao valor determinado para um sistema elástico constituído de apenas uma camada. Isto pode ocorrer quando se efetua o levantamento deflectométrico sobre o topo do subleito.

Uma estrutura constituída de três camadas elásticas que apresenta valor de área próxima do valor mínimo corresponde a uma estrutura onde os módulos do revestimento, da base e do subleito são praticamente iguais, situação indesejável para o bom desempenho real dos pavimentos. A tabela, a seguir, apresentada a seguir ilustra a faixa de valores de área para alguns tipos de pavimentos.

Tabela 1. Faixas e Parâmetro Área (WsDOT, 2005)

PAVIMENTAÇÃO	A – Área (cm)
Rígido de Concreto - CCP	60 - 90
Asfálticos espessos – CA > 12 cm	55- 75
Asfálticos delgados – CA < 12 cm	40 - 55
Flexíveis Fracos	28 - 40

A título de ilustração a Tabela a seguir apresenta de maneira qualitativa as condições típicas estruturais do pavimento em função dos parâmetros deflectométricos obtidos de levantamento, empregando-se o equipamento FWD. Naturalmente exceções podem ocorrer.

Tabela 2. Condição estrutural de pavimentos em função da forma da bacia (WsDOT, 2005)

Parâmetro		Condição Genérica	
Área - A	Deflexão – D ₀	Estrutura	Subleito
Baixa	Baixa	Fraca	Forte
Baixa	Alta	Fraca	Fraca
Alta	Baixa	Forte	Forte
Alta	Alta	Forte	Fraca

Em resumo, as características geométricas da bacia de deformação estão geralmente associadas à condição estrutural do pavimento, isto é, elevadas deflexões máximas e curvatura acentuada da bacia indicam situação de pavimentos fracos, enquanto baixas deflexões e curvaturas suaves correspondem à condição de pavimentos robustos.

II. Índice de Curvatura de Superfície (SCI)

O parâmetro SCI (*Surface Curvature Index*) ou Índice da Curvatura da Superfície, é definido como a diferença entre as deflexões sob o ponto de aplicação da carga e a deflexão a 30cm de distância da mesma. Este parâmetro é conhecido como o indicador mais sensível em relação à camada asfáltica.

O objetivo deste parâmetro é apresentar um indicativo da resistência das camadas superiores do pavimento (sensível em relação à camada asfáltica). Quanto menor o valor do SCI menor será a contribuição das camadas superiores do pavimento (Revestimento) na deflexão total (D_0).

$$SCI = D_0 - D_{30}$$

Onde:

SCI = índice da curvatura da superfície, em 10^{-2} mm;

D_0 , D_{30} = deflexão no centro de aplicação de carga a 0 e a 30 cm, do ponto de aplicação da carga, em 10^{-2} mm;

Como valor limite para o parâmetro apresentado é utilizado o valor de 25×10^{-2} mm, segundo a literatura. Valores de ICS acima deste limite indicam camadas superiores do pavimento pouco resistente ou de pequenas espessuras, acentuado arqueamento da bacia.

III. Índice de Dano à Base (BDI)

O parâmetro BDI (*Base Damage Index*), designado por Índice de Danos à Base, é definido com a diferença entre as deflexões a 30 cm e a 60 cm de distância do ponto de aplicação da carga.

O objetivo deste parâmetro é apresentar um indicativo da condição da camada de base do pavimento. Quanto maior o valor de BDI menor será a resistência da estrutura do pavimento, ou seja, é um parâmetro inversamente proporcional à espessura equivalente do pavimento. À medida que a espessura equivalente aumenta, os valores de BDI diminuem.

$$BDI = D_{30} - D_{60}$$

Onde:

BDI = índice da curvatura da superfície, em 10^{-2} mm;

D_{30} , D_{60} = deflexões medidas a 30 e 60 cm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga, em 10^{-2} mm;

Como valor limite para o parâmetro apresentado foi utilizado o valor de 40×10^{-2} mm (bom e/ou aceitável), apresentado pela literatura. Valores de BDI acima deste limite indicam baixa resistência do conjunto das camadas de revestimento, base e sub-base do pavimento. Para a classificação das bacias foi utilizado o valor limite mencionado, valores com variação menor que 40×10^{-2} mm foram considerados aceitáveis.

IV. Índice de Curvatura da Base (BCI)

O parâmetro BCI (*Base Curvature Index*), traduzido por Índice da Curvatura da Base, corresponde à diferença entre as deflexões a 60 cm e a 90 cm de distância do ponto de aplicação da carga.

O objetivo deste parâmetro é apresentar um indicativo da resistência do subleito. O BCI é um parâmetro que varia pouco durante a vida útil do pavimento. Desta maneira o BCI não sofre influência das camadas estruturais do pavimento. Quanto menor o seu valor maior será o valor do CBR do subleito.

$$SCI = D_{60} - D_{90}$$

Onde:

BCI = índice da curvatura da superfície, em 10^{-2} mm;

D_{60} , D_{90} = deflexões medidas a 60 e 90 cm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga, em 10^{-2} mm;

Como valor limite para o parâmetro apresentado foi utilizado o valor de 10×10^{-2} mm (bom e/ou aceitável), apresentado pela literatura. Valores de ICB acima deste limite indicam baixa resistência do subleito e também estão associados à valores de CBR próximos a 10% ou menores. Para a classificação das bacias foi utilizado o valor limite mencionado, valores com variação menor que 10×10^{-2} mm foram considerados aceitáveis.

5.3.2.2. Módulo Resiliente

O fenômeno da fadiga de um revestimento asfáltico consiste na sua ruptura (fissuração) quando solicitado inúmeras vezes por cargas menores do que a sua resistência à tração. A repetição das deformações recuperáveis é a responsável pela fadiga dos revestimentos asfálticos. Por outro lado, as deformações permanentes são as responsáveis pela formação de flechas nas trilhas de roda.

O termo deformação resiliente foi introduzido na pavimentação pelo renomado engenheiro norte-americano Francis Hveen, buscando diferenciar as deformações elásticas ocorrentes nos pavimentos flexíveis, sob cargas repetidas, de deformações típicas de outras estruturas, não caracterizadas por carregamentos aleatórios como os rodoviários. Ademais as deformações resilientes são de pequena magnitude, quando comparadas com as suportadas por outras estruturas.

Na teoria elástica clássica, define-se para um sólido elástico ideal, “módulo de elasticidade” ou “módulo de Young” (E) como a constante de proporcionalidade entre a tensão aplicada (σ) e a deformação específica axial resultante (ϵ):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Ocorrendo proporcionalidade entre tensões e as deformações axiais resultantes o módulo de elasticidade é uma constante, e se está trabalhando no campo da elasticidade linear.

Portanto, o módulo de resiliência (M_r) de um material é a relação entre a tensão vertical aplicada repetidamente (σ) e a deformação axial recuperável que lhe corresponde (ϵ), após um determinado número de aplicações da carga:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon}$$

Não se pode confundir os dois conceitos, já que no caso do módulo resiliente utiliza-se tensões repetidas e situadas bem abaixo da tensão de ruptura elástica do material, em regime elástico.

No estudo de solos e materiais granulares, a técnica laboratorial empregada é a dos ensaios triaxiais de carga repetida. Neste ensaio, a tensão vertical

empregada no cálculo do módulo resiliente é a tensão-desvio (σ_d), correspondente à diferença entre a tensão principal maior (σ_1) e a tensão principal menor (σ_3).

Já no estudo das misturas asfálticas, tem sido empregado com maior frequência no Brasil o ensaio de compressão diametral dinâmico (ou de tração indireta). Neste ensaio, a tensão a adotar no cálculo é a tensão de tração verificada no plano diametral vertical da amostra. Pode ser empregado ainda o ensaio de flexão dinâmico, que consiste em submeter a um carregamento cíclico uma vigota de mistura asfáltica bi-apoiada.

Os materiais empregados em pavimentação se caracterizam, usualmente, por apresentar um comportamento elástico não-linear. No caso dos solos e materiais granulares, o valor é dependente, para uma dada condição de moldagem, do estado de tensões a que o material é submetido. Já as misturas asfálticas apresentam valores modulares dependentes, principalmente, da temperatura e da frequência de aplicação da carga.

5.3.3. Definição dos Segmentos Homogêneos

De posse de todos os elementos angariados durante a avaliação do pavimento, deve-se procurar fazer uma análise global, com vistas à definição de segmentos que apresentem um comportamento homogêneo, cálculo dos valores característicos e diagnóstico da situação existente.

Os parâmetros que serão considerados para a divisão em termos de homogeneidade, serão aqueles que mais interessam para o desempenho do pavimento existente e para a eficácia de medidas de Restauração (e/ou Reabilitação), entre as quais: estaqueamento ou quilometragem, perfil de deflexões e raios de curvatura, flechas nas trilhas de roda, módulos elásticos, constituição do pavimento existente, defeitos ocorrentes, irregularidade longitudinal e tráfego solicitante (Para resultados obtidos ver Item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

A definição dos segmentos homogêneos pode ser feita normalmente em bases subjetivas, valendo muito a experiência e o bom senso do projetista. Os valores individuais dos parâmetros de avaliação são plotados nos gráficos e, a partir

de suas integrações gráficas, se estabelece o desenvolvimento longitudinal de cada parâmetro. Dada as limitações de ordem construtiva, pouco recomendável se torna promover o parcelamento excessivo, traduzido por segmentos de curtas extensões. Por outro lado, é aconselhável que não sejam tomados segmentos homogêneos com extensão superior a 5 km.

O seguinte processo de diferenças acumuladas da AASHTO a ser aplicado aos resultados dos diversos parâmetros selecionados. O método das diferenças acumuladas consiste na seguinte sequência de cálculo:

- Calcula-se o valor médio para toda a rodovia do parâmetro a ser analisado (a deflexão Benkelman é um dos parâmetros mais usados);
- Calcula-se a diferença entre o valor pontual e o valor médio;
- Calcula-se os valores acumulados das diferenças;
- Plota-se um gráfico onde as abcissas são as distâncias e as ordenadas, os valores acumulados das diferenças.

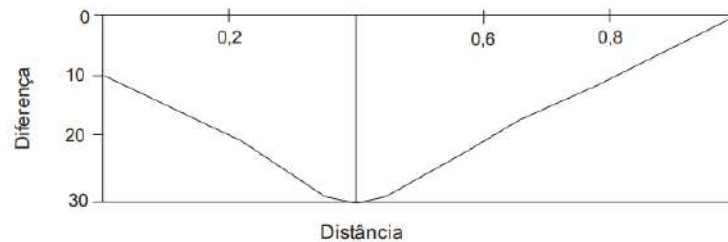
A variação do coeficiente angular da curva assim obtida indica uma mudança do comportamento médio de um determinado segmento para outro, caracterizando matematicamente, as extremidades dos segmentos homogêneos.

O exemplo a seguir (IPR-720, 2006) organizado para um parâmetro médio de $X = 80$ ilustra o processo e está enfocado nas Tabela 21 e Figura 29:

Tabela 21 - Métodos das diferenças acumuladas

DISTÂNCIA	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	DIF. ACUMULADA
0	70	-10	-10
0,2	7	-10	-20
0,4	70	-10	-30
0,6	90	10	-20
0,8	90	10	-10
1	90	10	0

Figura 29 - Valores acumulados das diferenças



Verifica-se pelo gráfico, que o ponto de distância 0,4 é um limite de dois segmentos de comportamento distinto. Verifica-se, também, que os segmentos entre os pontos de distância 0 ao 0,4 e 0,4 ao 0,8 possuem comportamento semelhante do ponto de vista do parâmetro analisado.

Cabe ressaltar que as características do tráfego, estrutura e idade das últimas restaurações são fatores significativos e relevantes para a definição dos segmentos homogêneos.

5.3.4. Cálculo de Valores Característicos

Definidos os segmentos homogêneos, deverão ser calculados todos os valores característicos que os representam e que são utilizados na definição das soluções. As deflexões são tratadas por análise estatística, sendo seu valor característico obtido pela soma da média aritmética com o desvio-padrão da amostra. No caso de raios de curvatura e módulos elásticos, o valor característico é adotado o da média menos um desvio-padrão.

5.3.5. Resultado da Análise de Dados

Neste item são apresentados os resultados do Levantamento Deflectométrico, Retroanálise pelo BackMedina, Separação em Segmentos Homogêneos, dados fundamentais para alimentar com dados o dimensionamento por Análise Mecânica.

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA
CNPJ: 035.190.568/0001-05



Resultados da Avaliação Estrutural do Pavimento Existente - Levantamento Deflectométrico

BACIAS DE DEFLEXÃO

K = 2,000

DADOS DE CAMPO					TEMPERATURA		BENKELMAN (0,01mm) - LEITURA ENSAIO										BENKELMAN (0,01mm) - CORRIGIDA 25°C									
ESTACA PROJ.	TRILH O	REV. (cm)	B (cm)	TOTAL (cm)	T°C PISTA	FATOR CORR. T°	D0	D25	D50	D75	D100	D125	D150	D200	D250	D300	D0*	D25*	D50*	D75*	D100*	D125*	D150*	D200*	D250*	D300*
P01 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	82,0	76,0	54,0	32,0	18,0	14,0	10,0	4,0	2,0	0,0	82,0	76,0	54,0	32,0	18,0	14,0	10,0	4,0	2,0	0,0
P20 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	142,0	120,0	84,0	52,0	30,0	21,0	12,0	4,0	2,0	0,0	142,0	120,0	84,0	52,0	30,0	21,0	12,0	4,0	2,0	0,0
P40 INT	TRI	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	44,0	30,0	14,0	8,0	6,0	4,0	2,0	0,0	0,0	0,0	44,0	30,0	14,0	8,0	6,0	4,0	2,0	0,0	0,0	0,0
P60 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	138,0	70,0	46,0	26,0	16,0	12,0	8,0	4,0	2,0	0,0	138,0	70,0	46,0	26,0	16,0	12,0	8,0	4,0	2,0	0,0
P80 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	90,0	80,0	50,0	36,0	26,0	22,0	18,0	8,0	2,0	0,0	90,0	80,0	50,0	36,0	26,0	22,0	18,0	8,0	2,0	0,0
P99 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	74,0	54,0	34,0	18,0	10,0	8,0	6,0	2,0	0,0	0,0	74,0	54,0	34,0	18,0	10,0	8,0	6,0	2,0	0,0	0,0
P107 INT LADO DIREITO	TRI	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	40,0	16,0	6,0	6,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	16,0	6,0	6,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P 112 LADO VINDO	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	58,0	24,0	4,0	2,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	58,0	24,0	4,0	2,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P130 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	102,0	62,0	46,0	32,0	32,0	22,0	12,0	6,0	2,0	0,0	102,0	62,0	46,0	32,0	32,0	22,0	12,0	6,0	2,0	0,0
P68 VOLTANDO	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	76,0	64,0	36,0	20,0	18,0	15,0	12,0	6,0	4,0	0,0	76,0	64,0	36,0	20,0	18,0	15,0	12,0	6,0	4,0	0,0
P170 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	72,0	44,0	24,0	20,0	12,0	10,0	8,0	2,0	0,0	0,0	72,0	44,0	24,0	20,0	12,0	10,0	8,0	2,0	0,0	0,0
P190 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	50,0	34,0	28,0	20,0	14,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	34,0	28,0	20,0	14,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P211 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	84,0	48,0	24,0	18,0	14,0	11,0	8,0	2,0	0,0	0,0	84,0	48,0	24,0	18,0	14,0	11,0	8,0	2,0	0,0	0,0

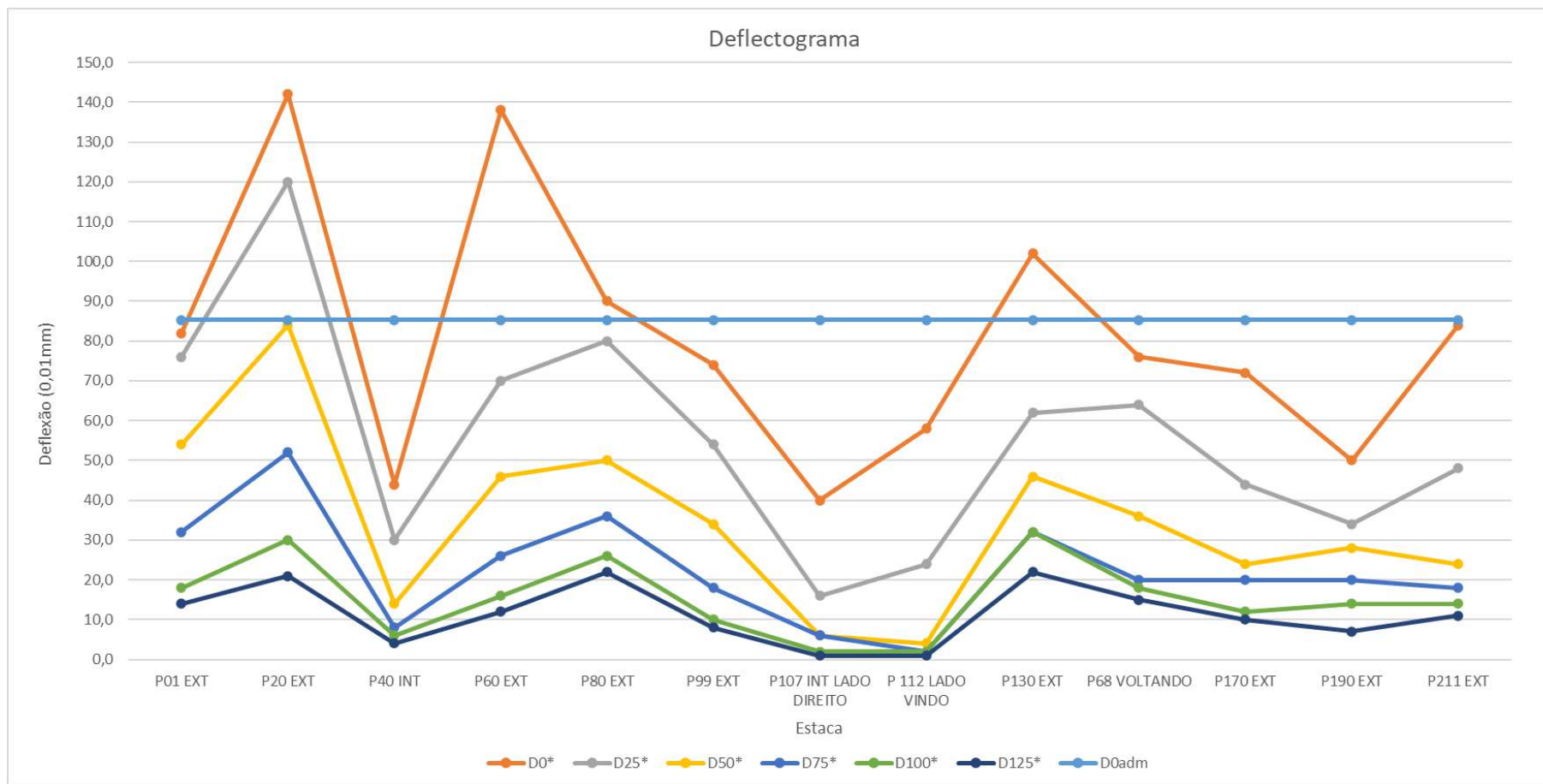
BACIAS DE DEFLEXÃO

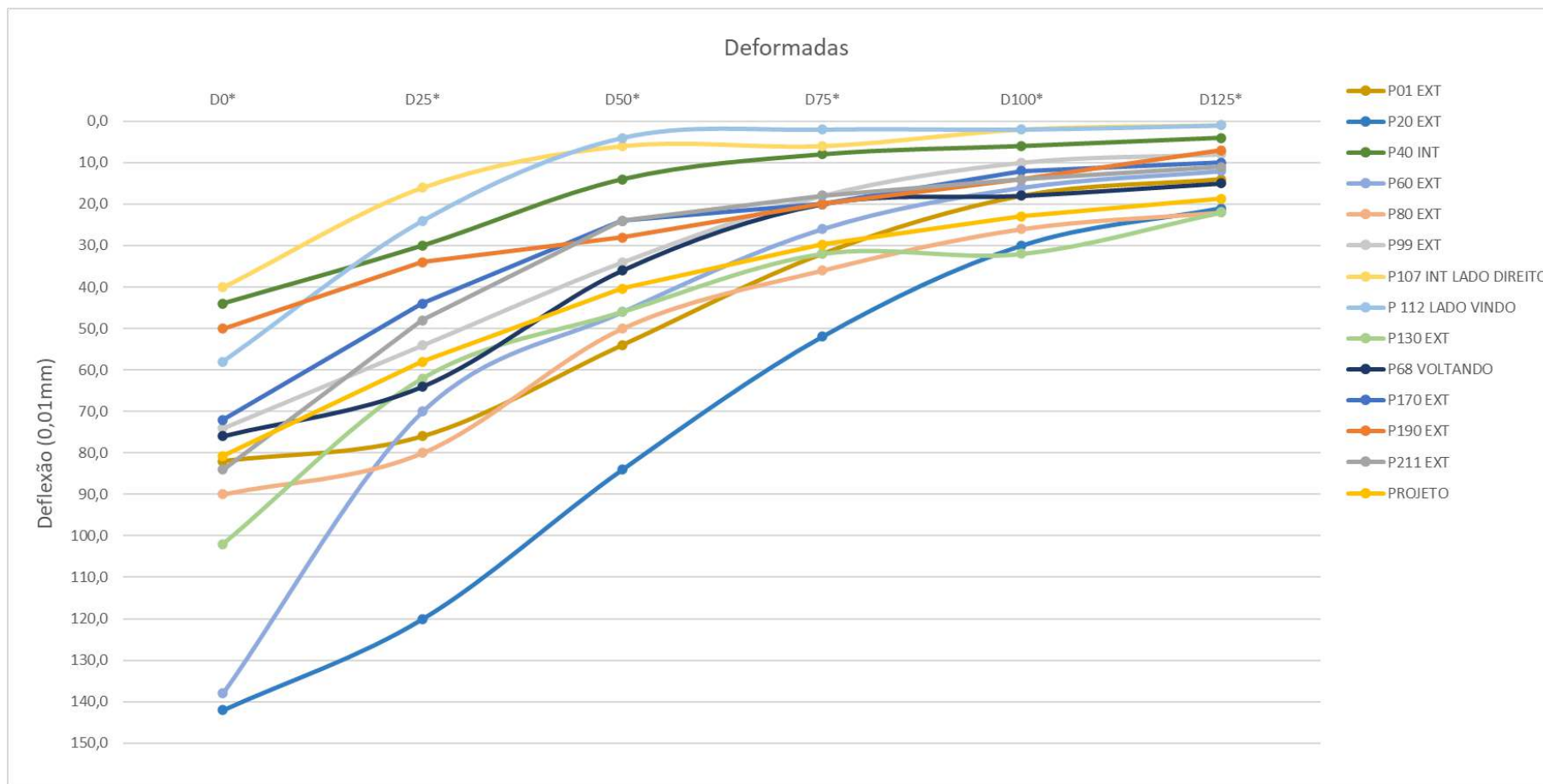
D0p (VB) (0,01 mm): 85,3

D0p (FWD) (0,01 mm):

65,2

DADOS DE CAMPO					TEMPERATURA		FWD (0,01mm) - CORRIGIDA 25°C										PARÂMETROS DE FORMA DA BACIA					
ESTACA PROJ.	TRILH O	REV. (cm)	B (cm)	TOTAL (cm)	T°C PISTA	FATOR CORR. T°	D0'	D25'	D50'	D75'	D100'	D125'	D150'	D200'	D250'	D300'	R (m)	CF (0,01 mm)	SCI (0,01 mm)	BDI (0,01 mm)	BCI (0,01 mm)	A (cm)
P01 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	62,8	58,5	42,8	27,0	17,0	14,1	11,3	7,0	5,5	4,1	520,8	3,4	7,4	18,9	15,5	63,9
P20 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	105,8	90,1	64,3	41,4	25,6	19,1	12,7	7,0	5,5	4,1	142,0	12,6	20,9	29,8	23,2	59,2
P40 INT	TRI	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	35,6	25,6	14,1	9,8	8,4	7,0	5,5	4,1	4,1	4,1	223,2	8,0	12,3	10,9	3,4	48,9
P60 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	103,0	54,2	37,1	22,7	15,6	12,7	9,8	7,0	5,5	4,1	46,0	39,0	52,1	19,5	12,9	41,6
P80 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	68,6	61,4	39,9	29,9	22,7	19,9	17,0	9,8	5,5	4,1	312,5	5,7	11,5	21,2	10,3	61,3
P99 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	57,1	42,8	28,5	17,0	11,3	9,8	8,4	5,5	4,1	4,1	156,3	11,5	17,2	16,0	10,3	52,1
P107 INT LADO DIREITO	TRI	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	32,8	15,6	8,4	8,4	5,5	4,8	4,1	4,1	4,1	4,1	130,2	13,8	18,6	5,7	1,7	38,7
P 112 LADO VINDO	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	45,7	21,3	7,0	5,5	5,5	4,8	4,1	4,1	4,1	4,1	91,9	19,5	27,2	12,0	0,9	33,1
P130 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	77,2	48,5	37,1	27,0	27,0	19,9	12,7	8,4	5,5	4,1	78,1	22,9	30,9	13,2	6,0	51,1
P68 VOLTANDO	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	58,5	49,9	29,9	18,4	17,0	14,8	12,7	8,4	7,0	4,1	260,4	6,9	12,6	20,6	7,7	56,0
P170 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	55,7	35,6	21,3	18,4	12,7	11,3	9,8	5,5	4,1	4,1	111,6	16,0	22,9	12,6	5,2	47,5
P190 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	39,9	28,5	24,2	18,4	14,1	9,1	4,1	4,1	4,1	4,1	195,3	9,2	12,3	5,7	6,0	58,1
P211 EXT	TRE	4,0	40,0	44,00	25,0	1,000	64,3	38,5	21,3	17,0	14,1	12,0	9,8	5,5	4,1	4,1	86,8	20,6	29,2	15,5	4,3	44,1





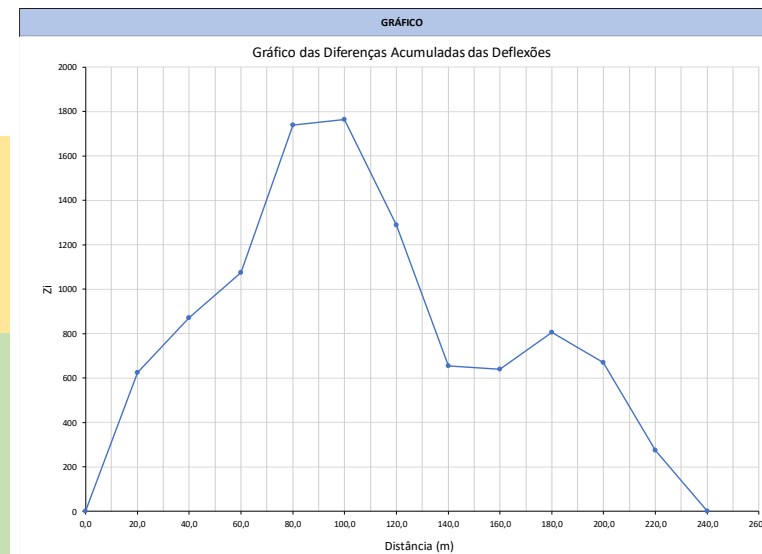


Avaliação Estrutural do Pavimento Existente – Segmentos Homogêneos a partir do Levantamento Deflectométrico (AASHTO 93)

Delimitação de segmentos homogêneos a partir de levantamentos defletométricos - AASHTO 93

ΣA_i	19.380,0
$\Sigma \Delta l_i$	240,0
$\Sigma A_i / \Sigma \Delta l_i$	80,8

Estaca	Ponto	Deflexão (0,01mm)	Def. média	Δl_i	$\Sigma \Delta l_i$	A_i	ΣA_i	Z_i	
P01 EXT	0	82,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	SH1
P20 EXT	20	142,0	112,0	20,0	20,0	2.240,0	2.240,0	625,0	SH1
P40 INT	40	44,0	93,0	20,0	40,0	1.860,0	4.100,0	870,0	SH1
P60 EXT	60	138,0	91,0	20,0	60,0	1.820,0	5.920,0	1.075,0	SH1
P80 EXT	80	90,0	114,0	20,0	80,0	2.280,0	8.200,0	1.740,0	SH1
P99 EXT	100	74,0	82,0	20,0	100,0	1.640,0	9.840,0	1.765,0	SH1
P107 INT LADO DIREITO	120	40,0	57,0	20,0	120,0	1.140,0	10.980,0	1.290,0	SH2
P 112 LADO VINDO	140	58,0	49,0	20,0	140,0	980,0	11.960,0	655,0	SH2
P130 EXT	160	102,0	80,0	20,0	160,0	1.600,0	13.560,0	640,0	SH2
P68 VOLTANDO	180	76,0	89,0	20,0	180,0	1.780,0	15.340,0	805,0	SH2
P170 EXT	200	72,0	74,0	20,0	200,0	1.480,0	16.820,0	670,0	SH2
P190 EXT	220	50,0	61,0	20,0	220,0	1.220,0	18.040,0	275,0	SH2
P211 EXT	240	84,0	67,0	20,0	240,0	1.340,0	19.380,0	0,0	SH2





Resultados da Avaliação Estrutural do Pavimento Existente – Retroanálise das Bacias de Deflexão pelo BackMedina (Diagramas)

D0 (0,01mm)						D0 (0,01mm)				D0 (0,01mm)			
SH	ESTACA	TRI	TRE	ESTACA	SH	Pista	Ponto	SH1	SH2	SH	ESTACA	TRI	TRE
SH1	P01 EXT	-	82	P01 EXT	SH1	PS	1	82,0	-	SH1	P01 EXT	133	133
SH1	P20 EXT	-	142	P20 EXT	SH1	PS	2	142,0	-	SH1	P20 EXT	133	133
SH1	P40 INT	44	-	P40 INT	SH1	PS	3	44,0	-	SH1	P40 INT	133	133
SH1	P60 EXT	-	138	P60 EXT	SH1	PS	4	138,0	-	SH1	P60 EXT	133	133
SH1	P80 EXT	-	90	P80 EXT	SH1	PS	5	90,0	-	SH1	P80 EXT	133	133
SH1	P99 EXT	-	74	P99 EXT	SH1	PS	6	74,0	-	SH1	P99 EXT	133	133
SH2	07 INT LADO DIREI	40	-	07 INT LADO DIREI	SH2	PS	7	-	40,0	SH2	P107 INT LADO DIREITO	90	90
SH2	P 112 LADO VINDO	-	58	P 112 LADO VINDO	SH2	PS	8	-	58,0	SH2	P 112 LADO VINDO	90	90
SH2	P130 EXT	-	102	P130 EXT	SH2	PS	9	-	102,0	SH2	P130 EXT	90	90
SH2	P68 VOLTANDO	-	76	P68 VOLTANDO	SH2	PS	10	-	76,0	SH2	P68 VOLTANDO	90	90
SH2	P170 EXT	-	72	P170 EXT	SH2	PS	11	-	72,0	SH2	P170 EXT	90	90
SH2	P190 EXT	-	50	P190 EXT	SH2	PS	12	-	50,0	SH2	P190 EXT	90	90
SH2	P211 EXT	-	84	P211 EXT	SH2	PS	13	-	84,0	SH2	P211 EXT	90	90
							Média	95,0	68,9				
							Desvio Padrão	38,2	21,2				
							Coef. Var.	40,2%	30,8%				
							Nº Amostras	6	7				
							z	2,0	2,5				
							Dmín	18,6	15,9				
							Dmáx	171,4	121,8				
							Dcarac.	133,2	90,1				
						t-student (t0,90)		1,44	1,42				
						Dcarac.		119,6	81,1				
						Fator Corr. Saz.		1,0	1,0				
						Dproj.		133,2	90,1				
						Dif.		11,4%	11,0%				



Resultados da Avaliação Estrutural do Pavimento Existente – Mr do Subleito Existente

MRsl (MPa)					
SH	ESTACA	TRI	TRE	ESTACA	SH
SH1	P01 EXT	-	77	P01 EXT	SH1
SH1	P20 EXT	-	72	P20 EXT	SH1
SH1	P40 INT	132	-	P40 INT	SH1
SH1	P60 EXT	-	76	P60 EXT	SH1
SH1	P80 EXT	-	76	P80 EXT	SH1
SH1	P99 EXT	-	96	P99 EXT	SH1
SH2	07 INT LADO DIREIT	116	-	07 INT LADO DIREIT	SH2
SH2	P 112 LADO VINDO	-	109	P 112 LADO VINDO	SH2
SH2	P130 EXT	-	76	P130 EXT	SH2
SH2	P68 VOLTANDO	-	73	P68 VOLTANDO	SH2
SH2	P170 EXT	-	94	P170 EXT	SH2
SH2	P190 EXT	-	128	P190 EXT	SH2
SH2	P211 EXT	-	93	P211 EXT	SH2

SUBLEITO - MRsl (MPa)			
Pista	Ponto	SH1	SH2
PS	1	77	-
PS	2	72	-
PS	3	132	-
PS	4	76	-
PS	5	76	-
PS	6	96	-
PS	7	-	116
PS	8	-	109
PS	9	-	76
PS	10	-	73
PS	11	-	94
PS	12	-	128
PS	13	-	93
Média		88	98
Desvio Padrão		23	20
Coef. Var.		0	0
Nº Amostras		6	7
z		2	3
MRmín		42	47
MRmáx		134	149
MRcarac.		65	78
t-student (t0,90)		1,44	1,42
MRcarac.		73	87
Fator Corr. Saz.		1,0	1,0
MRproj.		65	78
Dif.		0	0



Resultados da Avaliação Estrutural do Pavimento Existente – Mr da Base Existente

MRsl (MPa)						SUBLEITO - MRsl (MPa)			
SH	ESTACA	TRI	TRE	ESTACA	SH	Pista	Ponto	SH1	SH2
SH1	P01 EXT	-	58	P01 EXT	SH1	PS	1	58	-
SH1	P20 EXT	-	19	P20 EXT	SH1	PS	2	19	-
SH1	P40 INT	201	-	P40 INT	SH1	PS	3	201	-
SH1	P60 EXT	-	203	P60 EXT	SH1	PS	4	203	-
SH1	P80 EXT	-	20	P80 EXT	SH1	PS	5	20	-
SH1	P99 EXT	-	241	P99 EXT	SH1	PS	6	241	-
SH2	07 INT LADO DIREIT	257	-	07 INT LADO DIREIT	SH2	PS	7	-	257
SH2	P 112 LADO VINDO	-	202	P 112 LADO VINDO	SH2	PS	8	-	202
SH2	P130 EXT	-	29	P130 EXT	SH2	PS	9	-	29
SH2	P68 VOLTANDO	-	319	P68 VOLTANDO	SH2	PS	10	-	319
SH2	P170 EXT	-	453	P170 EXT	SH2	PS	11	-	453
SH2	P190 EXT	-	127	P190 EXT	SH2	PS	12	-	127
SH2	P211 EXT	-	366	P211 EXT	SH2	PS	13	-	366
						Média		124	250
						Desvio Padrão		102	145
						Coef. Var.		1	1
						Nº Amostras		6	7
						z		2	3
						MRmín		-80	-111
						MRmáx		328	612
						MRcarac.		22	106
						t-student (t0,90)		1,44	1,42
						MRcarac.		58	167
						Fator Corr. Saz.		1,0	1,0
						MRproj.		22	106
						Dif.		-1	0



5.3.6. Diagnóstico do Pavimento Existente

O diagnóstico da situação existente constitui o fechamento da avaliação do pavimento, sendo uma etapa que requer extrema atenção do projetista, que deverá fazer uso de toda a sua percepção, experiência e bom senso. Muitas vezes os elementos angariados na avaliação são consistentes, porém, uma interpretação inadequada pode levar a um erro de diagnóstico. Devem fazer parte do diagnóstico indicações claras sobre as causas das falhas existentes e orientações para a concepção das soluções de e/ou Reabilitação.

No que se refere aos resultados da retroanálise das bacias de deflexões, nota-se que ocorreram poucos valores de D_0 acima do admissível (4 de 13 bacias) para as hipóteses de tráfego (inclusive o Cenário 5), indicando boa capacidade de suporte do pavimento de maneira geral. Entretanto, os PBD's apontam pequenos raios de curvatura e deficiência do subleito e/ou do revestimento em 9 de 13 bacias. Até então, a camada de base é a única que apresentou valores satisfatórios em todos os pontos analisados ($200 < M_r < 300\text{Mpa}$). O subleito se apresenta em condições razoáveis ($M_r > 73\text{MPa}$).

Pelo levantamento fotográfico de campo foi possível observar diversos defeitos de superfície, especialmente trincamento por fadiga (fissuras, trincas e fendas, couro de jacaré), desgaste e formação de panelas. O comprometimento do revestimento é severo e por hora não se sabe com precisão da integridade da base. Estas patologias ocorrem de maneira geral em quase toda extensão da via, mas com diferentes graus de severidade.

Nota-se falta de drenagem superficial ocasionando transporte e acúmulo de sedimentos nos bordos da pista e em pontos baixos do greide. Deduz-se que o empoçamento resulta em infiltração e isso pode acarretar em saturação das camadas do pavimento e subleito, diminuindo sua resistências em períodos de chuva. Nota-se falta de tratamento anti-reflexão de trincas entre o revestimento e a base cimentada, fato que ocasiona grande gradiente térmico e de tensões destes materiais, culminando no trincamento excessivo.



5.4. Dimensionamento do Pavimento – Método Mecanístico

No Brasil, a metodologia de dimensionamento dos pavimentos tem passado por muitas modificações, haja vista que os modelos puramente empíricos pouco traduzem a vida de serviço do pavimento, pois não levam em consideração diversos fatores aos quais os pavimentos estão sujeitos.

Logo, faz-se necessário a adoção de modelos mais precisos, como o mecanístico e/ou mecanístico-empírico. Tais modelos consideram as propriedades inerentes à cada material constituinte da estrutura do pavimento, os carregamentos e demais condições específicas, como por exemplo a aderência entre as camadas, que é de fundamental importância na abordagem de análises de tensões, deformações e deslocamentos.

Neste projeto, as seções típicas propostas foram analisadas através do programa computacional AEMC, desenvolvido pela COPPE/RJ, o qual permite a análise elástica em estruturas de pavimento com camadas múltiplas, sob a ação de carregamentos formados por áreas de contato circulares. O AEMC foi formulado segundo as premissas matemáticas da Teoria da Elasticidade desenvolvida por Bursmister, para meios semi-infinitos estratificados.

O procedimento de cálculo adotado pelo programa idealiza o pavimento como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas, semi-infinito no plano horizontal, bem como assume que os materiais são isotrópicos e homogêneos, com comportamento elástico linear.

Os dados de entrada deste programa são:

- a) Com relação às cargas: quantidade, valor, distanciamento entre as mesmas (coordenadas x , y), e pressão dos pneus;
- b) Com relação às camadas e seus materiais constituintes: espessura, coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade e/ou resiliência;
- c) Com relação à aderência: condição de aderido ou não aderido;
- d) Com relação aos pontos de análise: coordenadas (x , y e z).

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05

As solicitações usualmente impostas pelo tráfego rodoviário são de natureza dinâmica e apresentam particularidades no que diz respeito à distribuição e à conformação geométrica das cargas, em função dos tipos de veículos considerados. Neste projeto, foi adotado um eixo padrão rodoviário simples com rodas duplas (ESRD), aplicando uma carga de 8,20 toneladas (4 x 2,05 toneladas).

Para definir a pressão de contato, considerou-se as características técnicas dos veículos comerciais, os tipos de pneu mais usuais, constatando que a IP-08/2004 (Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento) recomenda, para efeito de análise, a pressão mínima de contato dos pneumáticos com a superfície do pavimento de 5,60kgf/cm² (0,56Mpa).

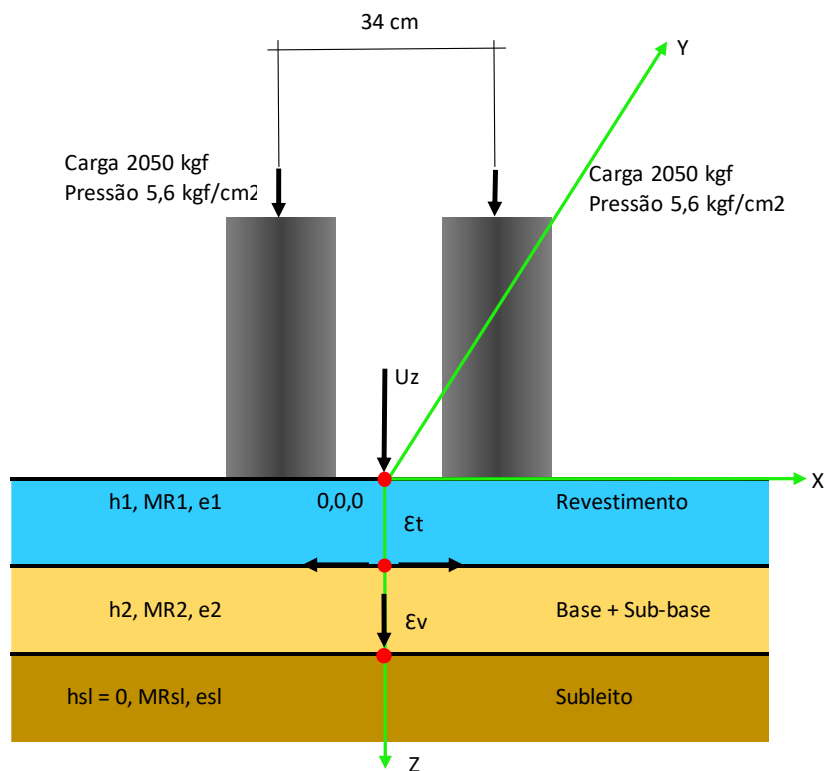
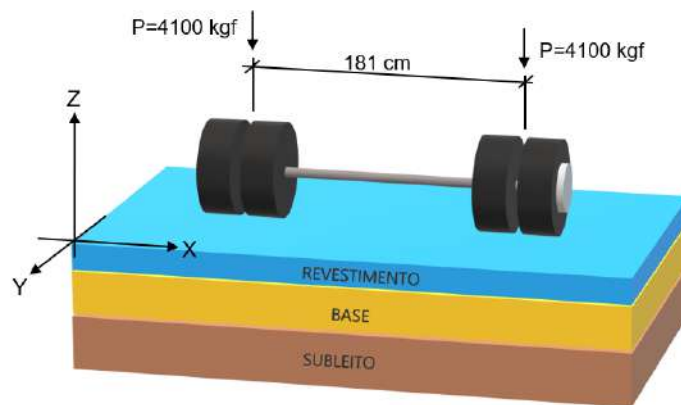
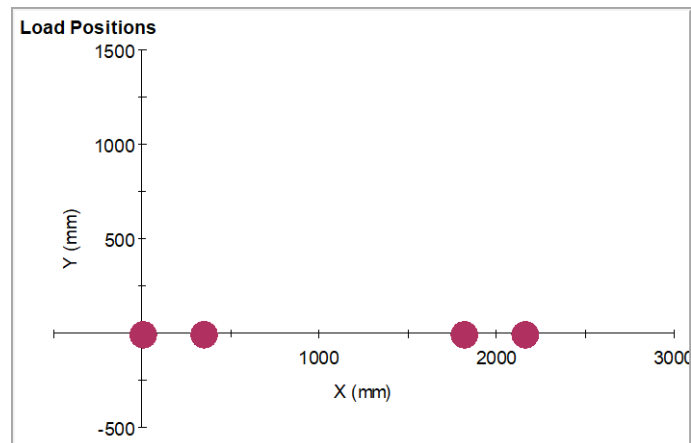
Quanto à forma e às dimensões da superfície de contato pneu-pavimento, vários estudos revelam contornos, em geral, irregulares e distribuição de pressão de contato não uniforme, com maior concentração nos bordos do que no centro do pneu, principalmente a baixas pressões de enchimento.

Com a finalidade de se definir uma forma geométrica de carregamento e considerando a dificuldade de se ter em conta uma distribuição heterogênea de pressões no contato pneu-pavimento, admitiu-se que as cargas se distribuem uniformemente em uma área circular de raio igual a 10,79 cm.

Este procedimento, além de simplificar os cálculos analíticos para determinação das tensões e deformações que se desenvolvem em sistemas estratificados, conduz a resultados sensivelmente análogos àqueles obtidos a partir de considerações mais elaboradas, com outras formas de impressão de contato e distribuições de carga não uniformes.

O modelo para cálculo de tensões, deformações e deflexões adotado para a estrutura dos pavimentos novos é ilustrado na figura a seguir.

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA
CNPJ: 035.190.568/0001-05



Nas figuras apresentadas indicam-se os pontos de análise, a saber:

- a) Deslocamento vertical na superfície do revestimento (D_0), chamado de U_z .
- b) Deformação máxima específica horizontal de tração (ϵ_t) na fibra inferior do revestimento e camadas cimentadas, chamados de ϵ_x e ϵ_y .
- c) Deformação máxima específica vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v), chamado de ϵ_z ;
- d) Serão tomadas nove coordenadas no eixo “x”, no intuito de se identificar os valores máximos para cada um dos três critérios acima.

5.4.1. Modelos de Ruptura

A estrutura de pavimento deve atender três a quatro critérios, tais quais são os pontos críticos a serem verificados no dimensionamento.

a) Deflexão Admissível na Superfície do Revestimento Asfáltico (D_0)

O modelo utilizado para o cálculo da deflexão admissível na superfície do revestimento asfáltico é o preconizado na norma técnica DNER-PRO 269/94 - Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV.

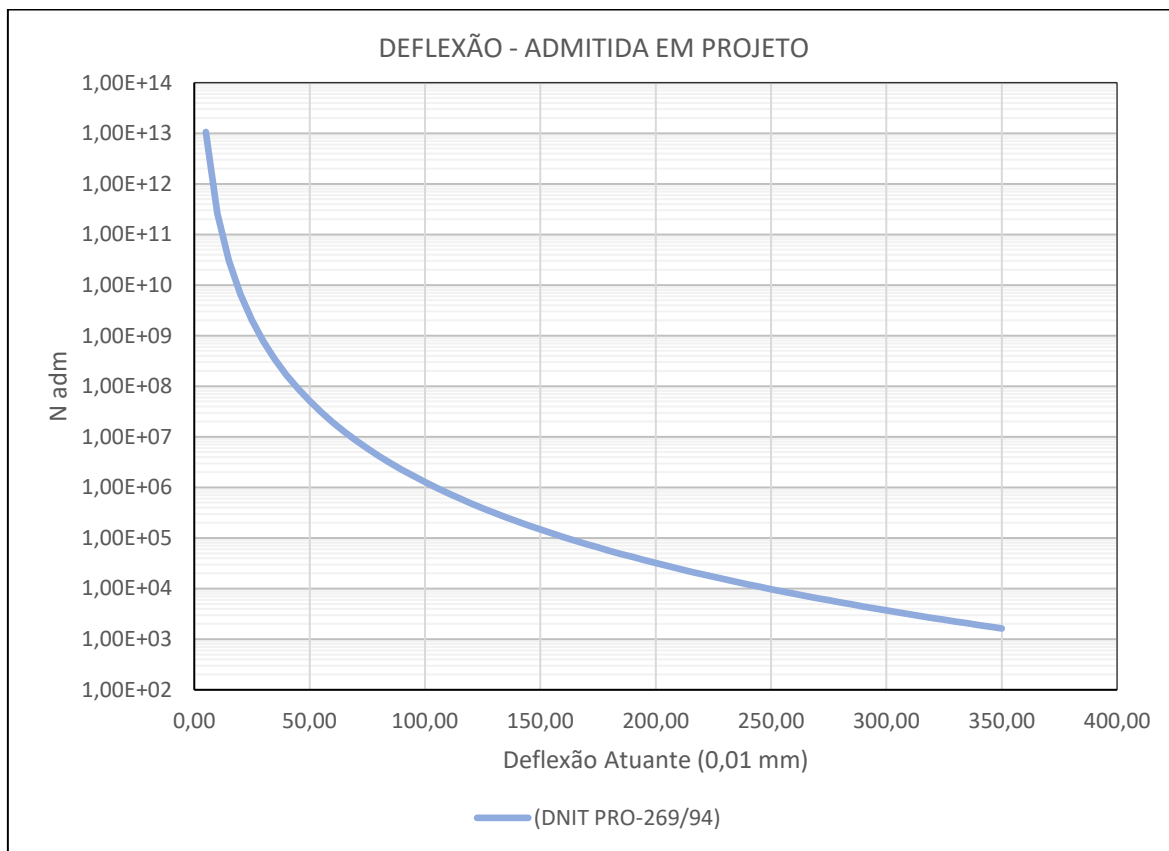
$$\log(D_{adm}) = 3,148 - 0,188 \times N$$

Onde:

N = Número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80kN acumulado para o período de projeto (critério de equivalência USACE);

D_{adm} = Deslocamento vertical recuperável máximo admissível no topo do revestimento;

O gráfico abaixo ilustra o número de solicitações admissíveis em função das deflexões atuantes no topo do revestimento.



b) Deformação Horizontal de Tração Admissível na Fibra Inferior do Revestimento Asfáltico

A deformação horizontal máxima (ϵ_t) na fibra inferior da camada betuminosa é associada ao Número N_f , que é o número terminal equivalente de solicitações do eixo padrão (80kN ou 8,20tf), tomado igual ao número N calculado com os fatores de equivalência da AASHTO.

Diversos autores e órgãos rodoviários internacionais divulgaram relações tensão-deformação limites de fadiga e número de solicitações N_f , definindo “Lei de Fadiga”, tendo sido adotado neste trabalho o critério proposto na tese de doutorado de Franco (2007), intitulada Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV.

Neste trabalho, Franco compilou dados de diversos estudos da base de dados da COPPE, e através destes dados obteve três modelos de fadiga, um para cada tipo de asfalto: convencional, modificado por polímero tipo SBS/EVA e asfalto-borracha.

Segundo Franco (2007), foram analisados 675 resultados de ensaios de fadiga, com diversas amostras, sendo 536 para misturas convencionais, 51 com misturas modificadas por polímero e 88 misturas com asfalto borracha. Os modelos admitidos neste trabalho, que tomam como base a tese supracitada estão apresentados conforme segue:

i. Modelo de fadiga para misturas com asfalto convencional

$$N_{lab} = fcl \times 1,904 \times 10^{-6} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} \times \left(\frac{1}{M_R}\right)^{0,74} R^2 = 0,805$$

ii. Modelo de fadiga para misturas com asfalto modificado por polímero tipo SBS ou EVA

$$N_{lab} = fcl \times 4,455 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,798} \times \left(\frac{1}{M_R}\right)^{1,493} R^2 = 0,813$$

iii. Modelo de fadiga para misturas com asfalto borracha

$$N_{lab} = fcl \times 7,265 \times 10^{-3} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,103} \times \left(\frac{1}{M_R}\right)^{1,918} R^2 = 0,676$$

Onde:

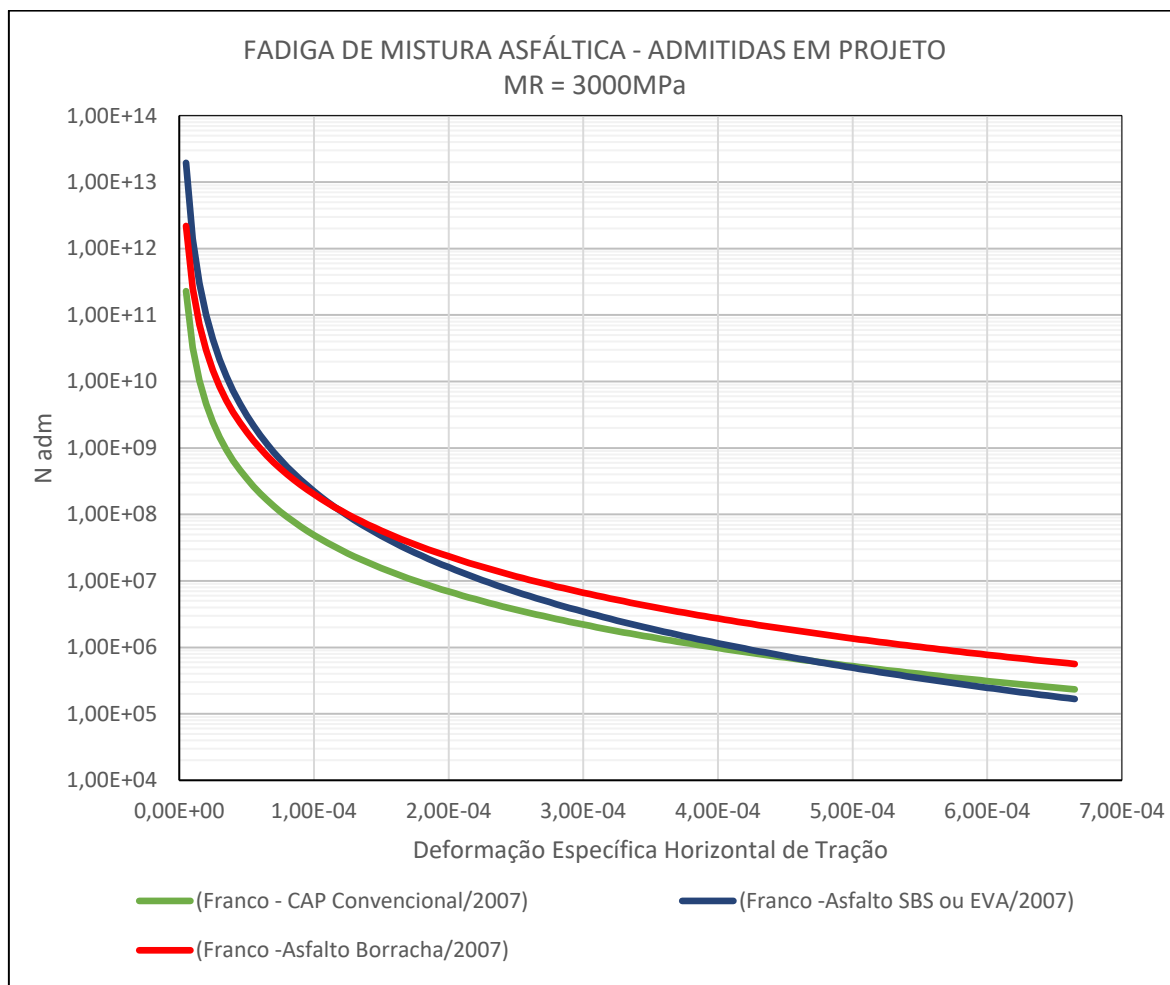
N = Número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80kN acumulado para o período de projeto (critério de equivalência AASHTO);

fcl = Fator campo-laboratório = 10^4 ;

ε_t = Deformação máxima específica horizontal de tração (ε_t) na fibra inferior do revestimento;

M_R = Módulo de resiliência da mistura asfáltica, em MPa.

O uso de mais de alternativas de materiais a serem empregados na camada de revestimento asfáltico acarreta a otimização das soluções propostas, haja vista que depender do contexto dos problemas a serem solucionados, poderá ser possível optar pela solução que apresente a melhor relação custo-benefício. O gráfico abaixo ilustra a curva de fadiga dos modelos admitidos.



Através da leitura do gráfico é possível observar que para uma dada deformação específica, esta, por sua vez, resultará num N admissível, para cada tipo de material a ser empregado.

Todavia, ressalta-se que a curva plotada é utilizada como exemplo, visto que os módulos de elasticidade das misturas diferem entre si, resultando em curvas diferentes das apresentadas. É o que será mostrado item que trata dos parâmetros mecânicos dos materiais constituintes da estrutura.

c) Deformação Vertical de Compressão Admissível no Topo do Subleito

O solo de fundação é normalmente o material menos resistente da estrutura, portanto é por ele que se inicia a verificação estrutural. Entretanto, uma vez confirmado o seu desempenho, é importante efetuar-se também a análise global para assegurar eventuais problemas devido ao fenômeno da deformação permanente.

A análise é feita comparando-se a máxima deformação específica vertical de compressão (ϵ_v) atuante no topo do subleito, considerando-se um sistema de camadas elásticas, comparando-as com os valores admissíveis correspondentes ao material utilizado.

Nos pavimentos rodoviários onde o tráfego é canalizado, a deformação permanente em geral se manifesta nas chamadas trilhas de roda. Essa deformação devida ao cisalhamento é um dos fatores que precisa ser levado em conta no projeto racional de pavimentos, objetivando-se minimizar as deformações totais dos mesmos.

O modelo utilizado para o cálculo da deformação vertical admissível de compressão no topo da camada de subleito é o proposto por Monismith & Brown (1999), Asphalt Institute.

$$N = K \times \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^n$$

Onde:

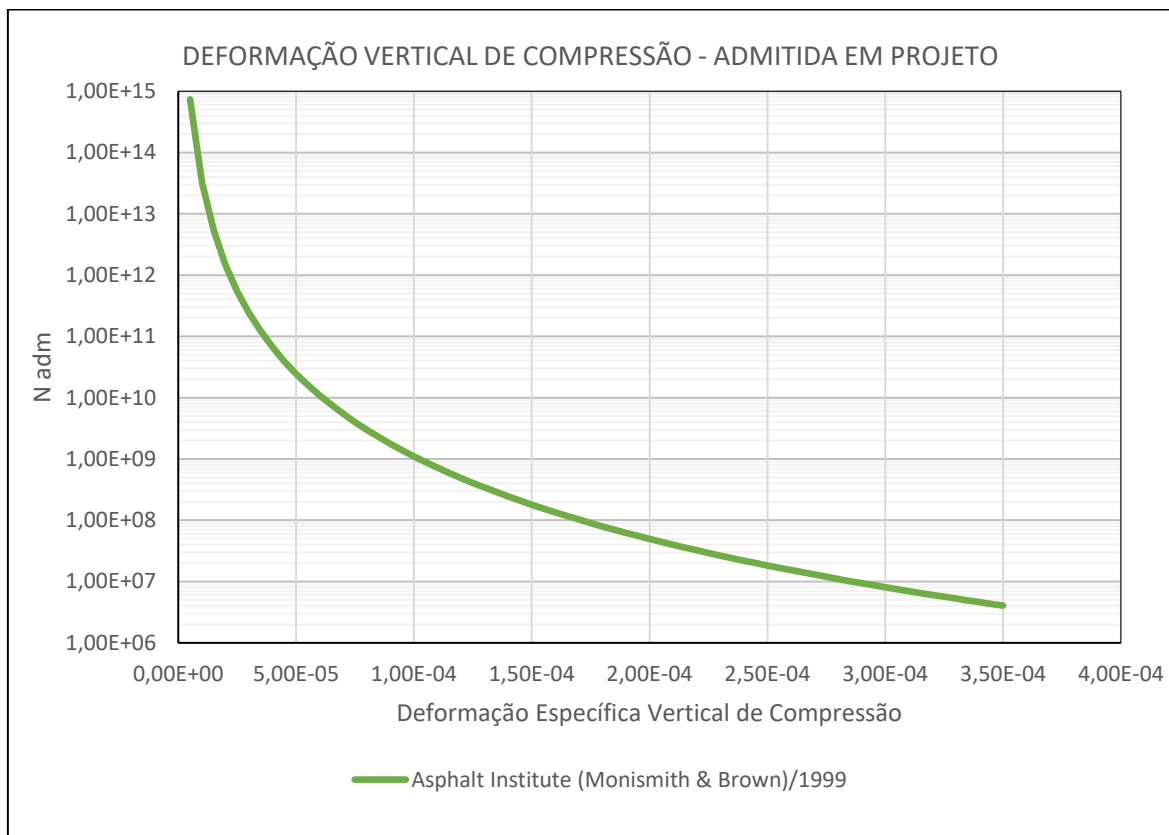
N = número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80kN acumulado para o período de projeto (N da USACE);

ϵ_v = Deformação máxima específica vertical de compressão no topo do subleito;

K = Coeficiente de regressão do modelo = $1,365 \times 10^{-9}$

n = Coeficiente de regressão do modelo = 4,477

O gráfico abaixo representa o número admissível de passagens em função das deformações características.



5.4.1.1. Propriedades dos Materiais Constituintes da Estrutura

Para a determinação das respostas elásticas (tensões, deformações e deslocamentos), foram utilizados os parâmetros apresentados a seguir, e que são obtidos através de consultas de literaturas técnicas, como a instrução de projeto IP-08/004 – Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento da Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras da Prefeitura da Cidade de São Paulo (SIURB) e da instrução de projeto de pavimentação IP-DE-P00-001_A do Departamento e Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP).

a) Solo do Subleito

Em função do CBR estatístico, bem como das características físicas das amostras ensaiadas e classificação, obteve-se a correlação destes com a classificação de solos tropicais MCT, possibilitando estimar o módulo de resiliência linear dos solos do subleito.

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05

Para esta finalidade, lança-se mão da seguinte expressão a fim de se obter valor de módulo de resiliência, a saber:

- CBR = 9,50%, com grau de CG = 100% do Proctor Normal (PN).
- Módulo Resiliente NG' com 9,50%: $M_R = 18,0 \times CBR^{0,64}$, adotado 76Pa
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,45$

b) Brita Corrida

Em função do intervalo de valores apresentado na IP-08/2004 da SIURB, admite-se para este trabalho, o valor de referência para base de material granular, que se situa no intervalo de 100 a 500MPa.

- Módulo Resiliente: $M_R = 250,0MPa$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,35$

c) Capa de rolamento de concreto asfáltico

i. Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) - CAP 50/70

Para a camada de revestimento asfáltico, lançou-se mão da expressão de correlação que leva em consideração as características de dosagem Marshall da mistura, e para isso, utilizou-se os valores de dosagem de misturas asfálticas fornecidas por usinas da região metropolitana de Curitiba, cujos projetos são fornecidos antecipadamente a execução das obras.

Os valores de referência, bem como a origem dos mesmos estão contidos na tabela a seguir, e trata-se de misturas asfálticas tipo Faixa C do DER/PR e seus respectivos módulos são obtidos através da seguinte expressão:

$$E = 340 \times \sqrt{\frac{E_B}{F}}$$

Onde:

E_B = Estabilidade, em kgf

F = Fluência, em polegadas x 0,01"

Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,30$

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA
CNPJ: 035.190.568/0001-05

ASFALTO CONVENCIONAL - FAIXA C								
Construtora	FAIXA DE PROJETO	DATA DE REVISÃO	TEOR ÓTIMO (%)	RTCD (MPa)	E _B (kgf)	F (mm)	F (pol x 0.01")	E (MPa)
DAMORIM	C - DER/PR	out-18	4,70	?	878,00	3,27	13,08	2.786
TUCUMANN/ PISÃO JORGE	C - DER/PR	mar-19	4,88	1,03	1.022,00	3,48	13,92	2.913
TUCUMANN/ PISÃO JORGE	C - DER/PR	ago-20	5,10	1,12	1.015,00	3,60	14,40	2.855
PEDREIRA OCA ENGENHARIA	C - DER/PR	fev-21	4,15	1,70	1.550,00	2,80	11,20	4.000
PEDREIRA CENTRAL	C - DER/PR	jan-21	4,70	1,23	1.347,00	3,15	12,60	3.515
GRUPO SIQUEIRA	C - DER/PR	out-20	5,00	1,29	1.004,00	1,29	5,16	4.743
PEDREIRA CENTRAL	C - DER/PR	jun-20	4,70	1,56	1.208,00	3,50	14,00	3.158
PEDREIRA COTRAGON	C - DER/PR	fev-20	4,80	0,97	1.386,00	3,53	14,12	3.369
VENTURI ZEN	C - DER/PR	jul-19	5,20	0,91	1.200,00	3,50	14,00	3.148

NÚMERO DE AMOSTRAS	9
MÉDIA	3387
DESVIO PADRÃO	633

t _{0,90}	1,38
Módulo médio	3078

ii. Concreto Asfáltico Modificado por Polímero (CAMP):

Para o uso de revestimento modificado por polímero tipo SBS, adotou-se o valor de módulo de resiliência contido na tese de Franco (2007), que conta com a base de dados de ensaios realizados pela COPPE entre os anos de 2003 e 2006. Os resultados dos ensaios foram tratados estatisticamente neste trabalho no a fim de se obter um valor médio.

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,30$

iii. Concreto Asfáltico Modificado por Borracha (CAMB):

Para o uso de revestimento modificado por polímero tipo SBS, adotou-se o valor de módulo de resiliência contido na tese de Franco (2007), que conta com a base de dados de ensaios realizados pela COPPE entre os anos de 2003 e 2006. Os resultados dos ensaios foram tratados estatisticamente neste trabalho no a fim de se obter um valor médio.

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,30$

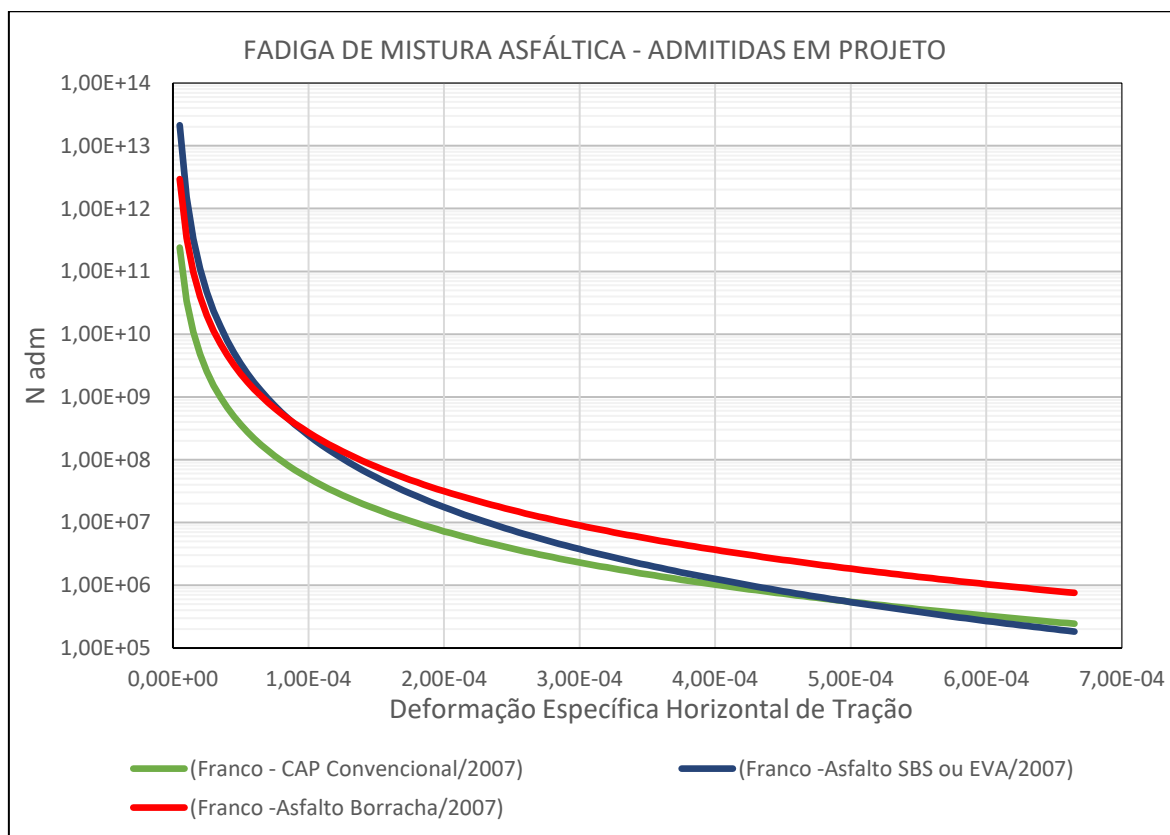
G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA
CNPJ: 035.190.568/0001-05

ASFALTO POLÍMERO			ASFALTO BORRACHA		
REGISTRO	DATA	MR (MPa)	REGISTRO	DATA	MR (MPa)
F21-02	março-03	2484	F17-3	junho-03	2206
F03-03	março-03	2095	F21-3	junho-03	2105
F39-03	junho-04	10982	F63-03	março-04	2929
F28-05	outubro-05	8101	F64-03	março-04	2171
F35-05	novembro-05	3942	F65-03	abril-04	1605
F06-06	fevereiro-06	5248	F22-05	setembro-05	6205
			F36-05	novembro-05	3668
			F44-05	fevereiro-06	4052
			F05-06	fevereiro-06	4832

NÚMERO DE AMOSTRAS	6	NÚMERO DE AMOSTRAS	9
MÉDIA	5475	MÉDIA	3308
DESVIO PADRÃO	3464	DESVIO PADRÃO	1516

t _{0,90}	1,44	t _{0,90}	1,38
Módulo médio	3244	Módulo médio	2568

Após obtenção dos módulos médios, foi possível elaborar as curvas de fadiga corrigidas, conforme gráfico a seguir.



A tabela apresentada a seguir apresenta consolidação dos parâmetros adotados para dimensionamento pelo método mecanístico.

MATERIAL	MÓDULO RESILIENTE LINEAR (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
CBUQ fx - C - Asfalto Convencional	3078	0,30
CBUQ fx - C - Asfalto Polímero	3244	0,30
CBUQ fx - C - Asfalto Borracha	2568	0,30
Brita Corrida (sobre camada cimentada)	350	0,35
Brita Corrida (sobre camada granular)	250	0,35
Base Solo-Cimento Existente	200	0,25
Solo Local Retroanalísado	73	0,45
Solo Local CBR $\geq 9,5\%$ (Mr pela MCT)	76	0,45

5.4.2. Condição de Aderência

Além dos parâmetros de carregamento e características elástico-lineares dos materiais constituintes da estrutura, faz-se necessário admitir também que as camadas estão parcialmente aderidas, este fator, por sua vez é de suma importância para análise mecanicista, uma vez que o mesmo contribui significativamente nas deformações atuantes no pavimento, sobretudo, a deformação horizontal específica na fibra inferior do revestimento.

A admissão de camadas aderidas se dá entre revestimentos asfálticos, uma vez que estudos técnicos mais modernos conduzem a conclusão de que, embora haja pinturas de ligação entre o revestimento e as camadas subjacentes que não são constituídas de material asfáltico, o fenômeno de aderência não é total, sendo o contrário observado na interface entre materiais asfálticos.

Assim, pode-se dizer que a aderência entre o revestimento asfáltico e a camada subjacente não asfáltica ocorre devido à imprimação e à pintura de ligação, com alguma parcela de aderência por atrito, haja vista que a interface das duas camadas possui rugosidade. Entre a base e a sub-base não-asfálticas, a aderência se dá por meio do atrito, assim como entre a sub-base e o subleito.

Para este efeito, o AEMC permite que seja adotada a condição de aderência entre as camadas, sendo que este fator varia 0,00, quando a condição é dada como não-aderida e 1,00 como condição de totalmente aderida.

O presente trabalho adotará a condição de aderência entre os revestimentos, camadas cimentadas e de mesmo material (1,00) e de não-aderência entre as demais camadas granulares e de solo (0,00).

5.4.3. Análise das Estruturas Projetadas

A seguir são apresentados os dimensionamentos através da metodologia mecanística. Tal como orienta o Manual de Pavimentação – DNIT (2006), para este projeto está se considerando o dimensionamento obtido pelo método mecanístico que é o que melhor representa a realidade em campo e as tendências atuais de dimensionamento de pavimentos.

5.4.4. Validação das estruturas e proposição de alternativas

Com apoio nos preceitos enumerados anteriormente pela metodologia mecanística, através da aplicação do AEMC, propôs-se alternativas de estrutura e então foi realizada a análise de tensões nos pontos críticos.

Dessa forma, foram validadas 03 concepções de pavimento distintas, buscando aquelas aprovadas em todos os critérios, para então determinar quais apresentam as melhores relações custo-benefício, sendo assim:

- a) *03 alternativas de pavimento flexível (F-1, F-2, F-3)* onde empregou-se diferentes tipos de concretos asfálticos: convencional (CAUQ), modificado por polímeros (CAMP) e modificado por borracha (CAMB);

5.4.4.1. Alternativa F-1 (8,0cm): Flexível - CAUQ

A Alternativa F-1 verificou revestimento em concreto asfáltico em CAUQ. O quadro abaixo resume as espessuras, materiais, propriedades e condições de aderência de cada camada do pavimento, bem como os modelos de ruptura considerados.

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05

SOLUÇÃO TIPO: **CENÁRIO 03**

- **SL CBR = 9,50%**

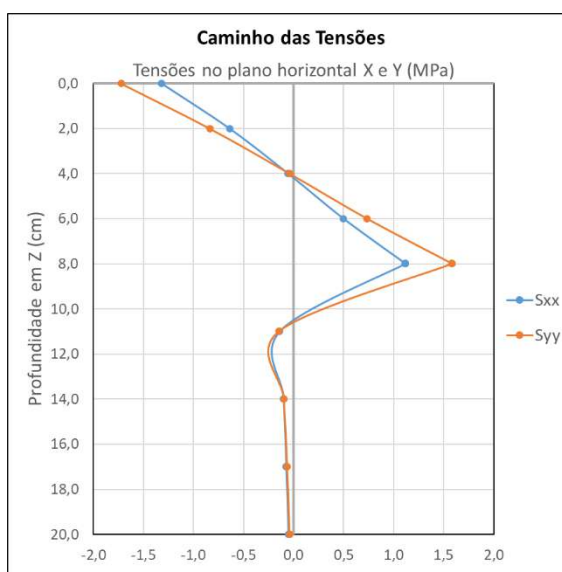
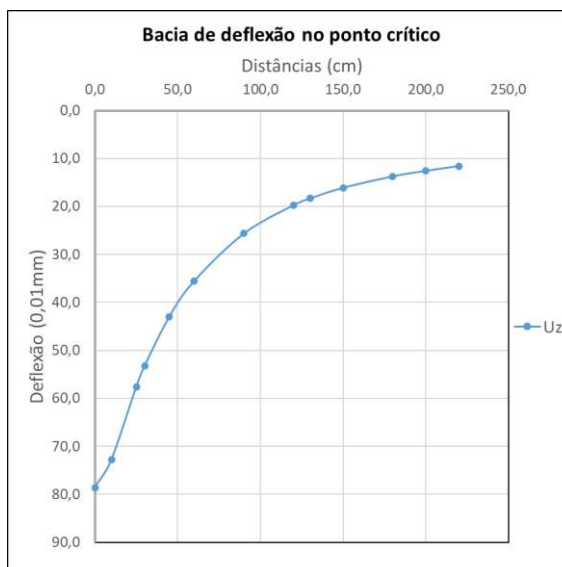
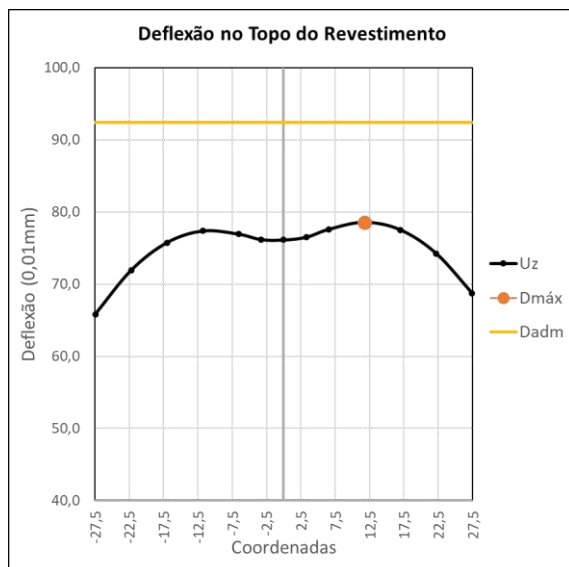
8 (CAUQ + GEOGRELHA)

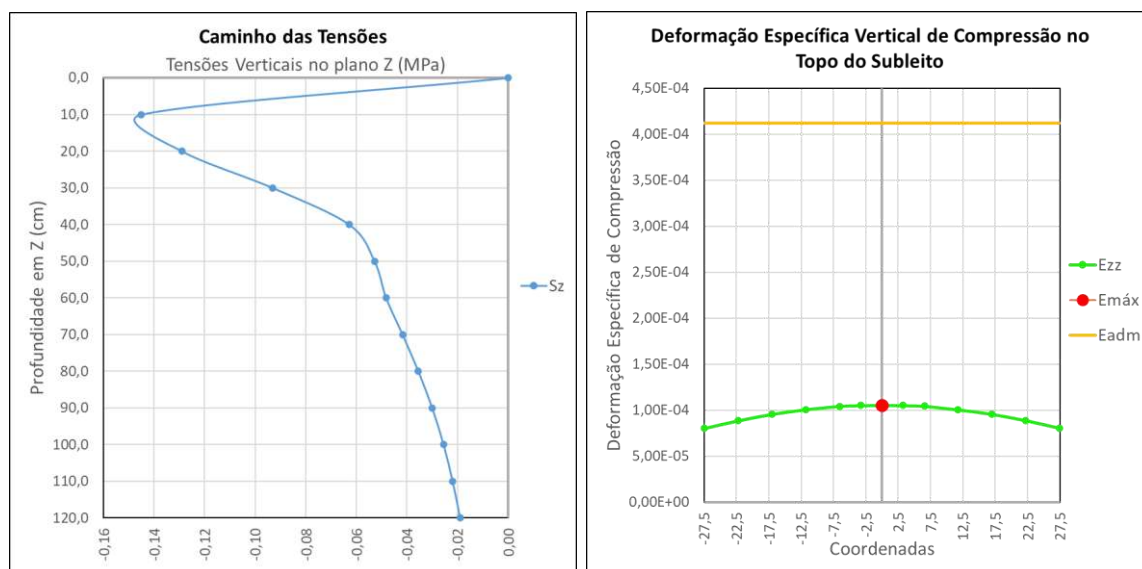
CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	Mr (MPa)	Coef. Poisson	Aderência	Nº da Camada
Capa	CBUQ fx - C - Asfalto Convencional	8,00	3078	0,30	0,0	1
Base	Base Solo-Cimento Existente + Geogrelha	40,00	200	0,25	0,0	2
Subleito	Solo Local CBR ≥ 9% (Mr pela MCT)	∞	73	0,45	0,0	3

TOTAL DIMENSIONADO (cm): 48,00

PARÂMETROS	ATUANTE	MODELO ADOTADO	ADMISSÍVEL	VERIFICAÇÃO	NÚMERO N ATENDIDO
Deflexão recuperável no topo da camada de rolamento (0,01 mm)	78,58	(DNER PRO-269/94)	92,44	ATENDE	4,60E+06
Deformação horizontal de tração máxima na fibra inferior do revestimento (mm/mm)	4,26E-04	(Franco - CAP Convencional/2007)	4,41E-04	ATENDE	8,05E+05
Deformação vertical de compressão máxima no topo do subleito (mm/mm)	1,05E-04	Asphalt Institute (Monismith & Brown)/1999	4,12E-04	ATENDE	8,78E+08

NUSACE =	1,94E+06
NAASHTO =	7,29E+05





A partir da análise gráfica, nota-se que os valores de deflexão no topo do revestimento (D_0); de deformação de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t); de compressão do topo do subleito (ϵ_v) encontram-se abaixo dos valores admissíveis representado pelas linhas laranjas e, portanto, satisfatórios para o 3 de tráfego.

5.4.4.2. Alternativa F-2 (8,0cm): Flexível - CAMP

A Alternativa F-2 verificou concreto asfáltico em CAMP (Modificado por Polímero). O quadro abaixo resume as espessuras, materiais, propriedades e condições de aderência de cada camada do pavimento, bem como os modelos de ruptura considerados.

SOLUÇÃO TIPO: CENÁRIO 03

- SL CBR = 9,50%

8' (CAMP + GEOGRELHA)

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	Mr (MPa)	Coef. Poisson	Aderência	Nº da Camada
Capa	CBUQ fx - C - Asfalto Polímero	8,00	3244	0,30	0,0	1
Base	Base Solo-Cimento Existente + Geogrelha	40,00	200	0,25	0,0	2
Subleito	Solo Local CBR ≥ 9% (Mr pela MCT)	∞	73	0,45	0,0	3

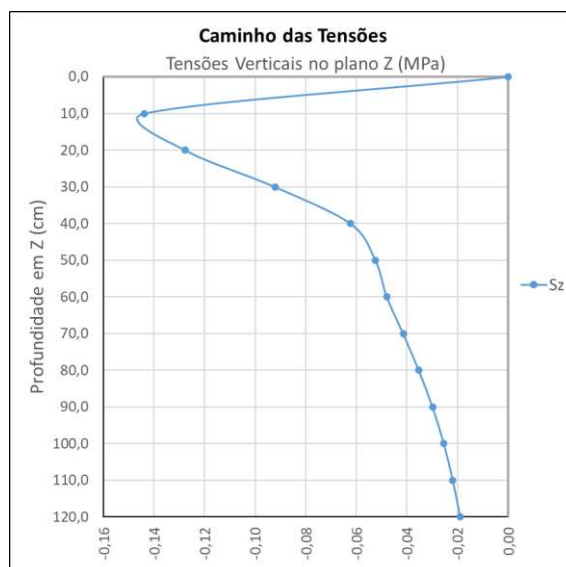
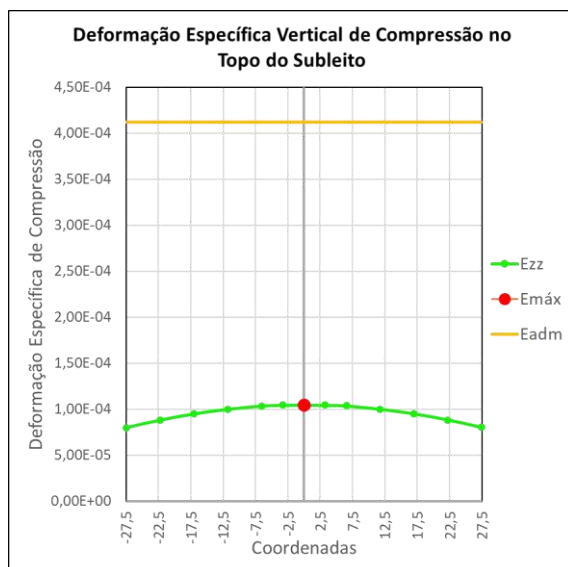
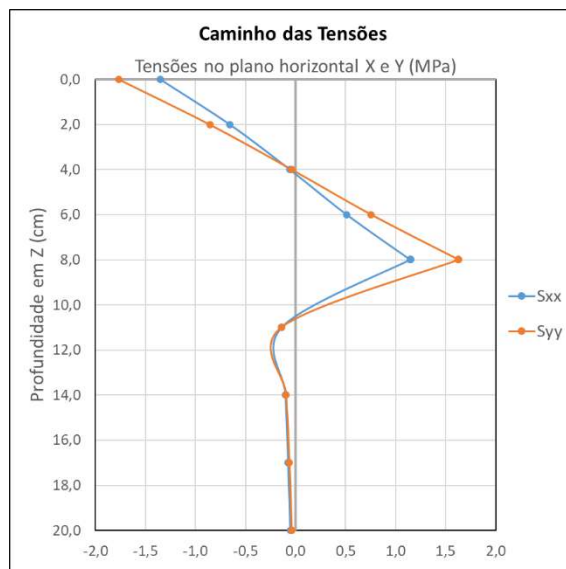
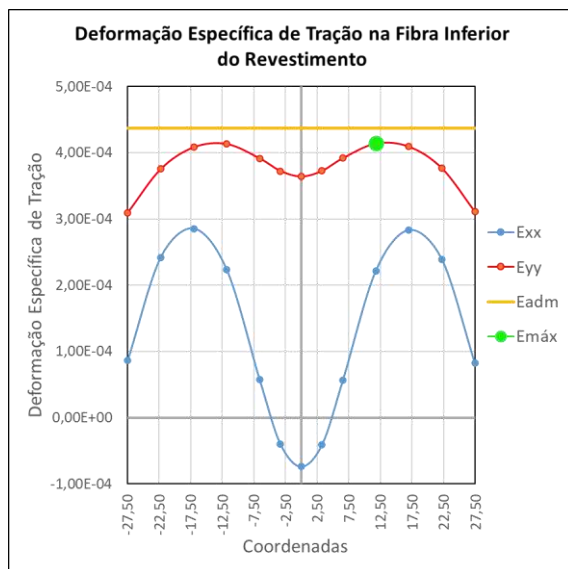
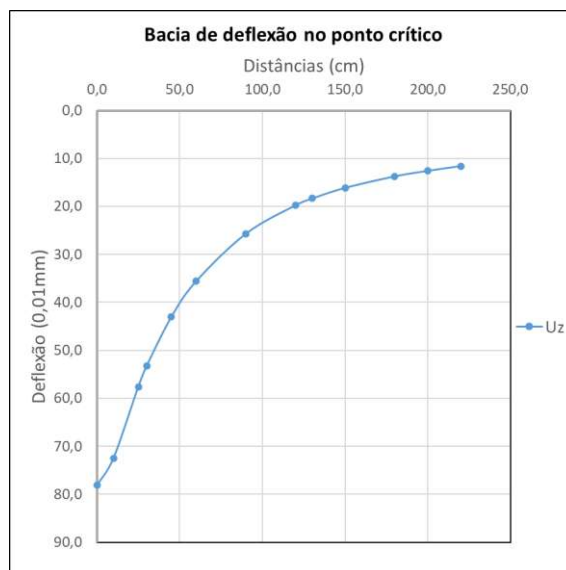
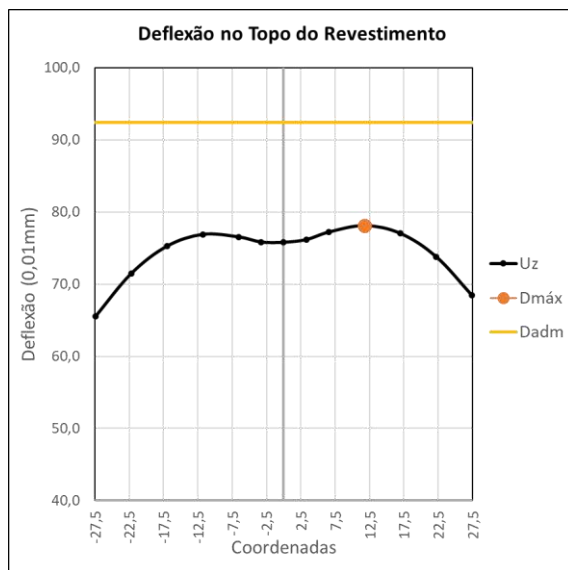
TOTAL DIMENSIONADO (cm): 48,00

PARÂMETROS	ATUANTE	MODELO ADOTADO	ADMISSÍVEL	VERIFICAÇÃO	NÚMERO N ATENDIDO
Deflexão recuperável no topo da camada de rolamento (0,01 mm)	78,10	(DNER PRO-269/94)	92,44	ATENDE	4,76E+06
Deformação horizontal de tração máxima na fibra inferior do revestimento (mm/mm)	4,14E-04	(Franco -Asfalto SBS ou EVA/2007)	4,38E-04	ATENDE	9,00E+05
Deformação vertical de compressão máxima no topo do subleito (mm/mm)	1,05E-04	Asphalt Institute (Monismith & Brown)/1999	4,12E-04	ATENDE	9,04E+08

NUSACE =	1,94E+06
NAASHTO =	7,29E+05

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA

CNPJ: 035.190.568/0001-05



A partir da análise gráfica, nota-se que os valores de deflexão no topo do revestimento (D_0); de deformação de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t); de compressão do topo do subleito (ϵ_v) encontram-se abaixo dos valores admissíveis representado pelas linhas laranjas e, portanto, satisfatórios para o Cenário 03 de tráfego.

Nota-se que o uso de CAMP, em relação a Alternativa F-1, não permite redução do revestimento mas melhora o desempenho e vida útil do pavimento.

5.4.4.3. Alternativa F-3 (5,0cm): Flexível - CMB

A Alternativa F-3 verificou concreto asfáltico em CMB (Modificado por Borracha). O quadro abaixo resume as espessuras, materiais, propriedades e condições de aderência de cada camada do pavimento, bem como os modelos de ruptura considerados.

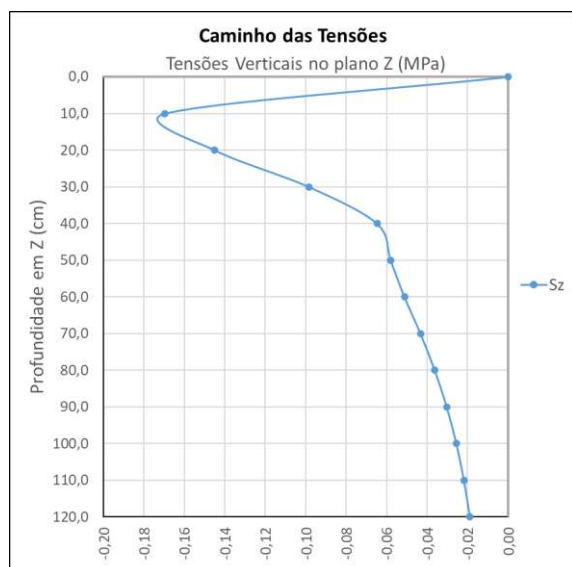
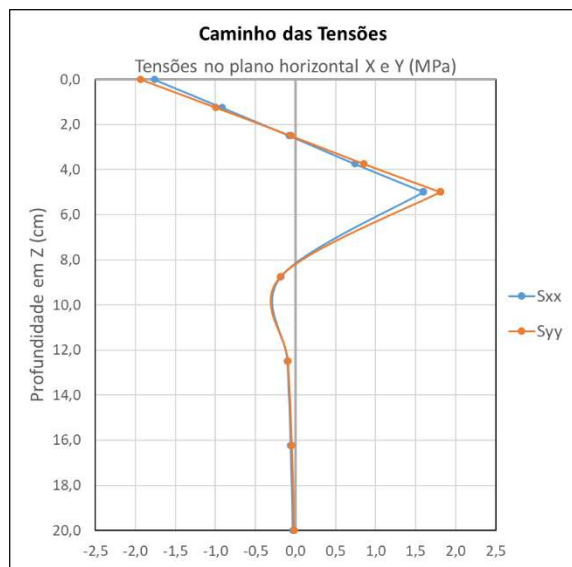
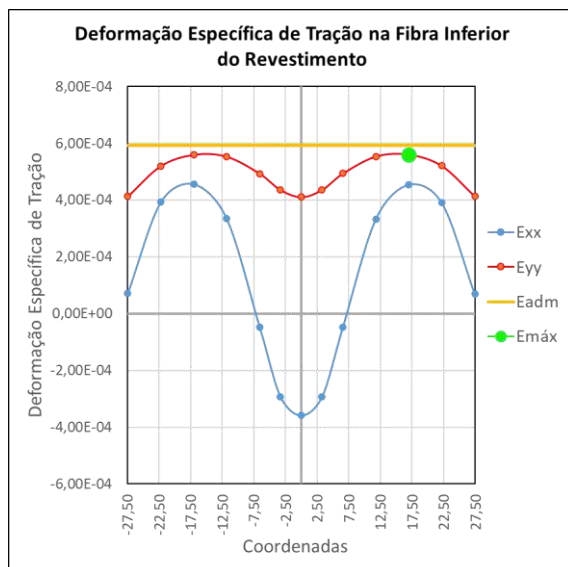
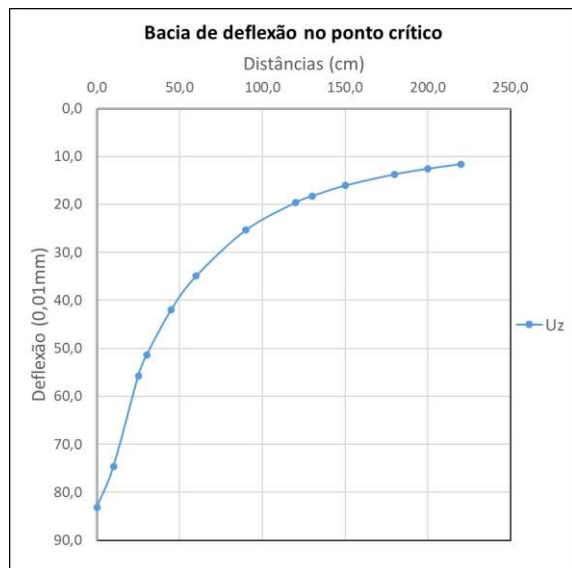
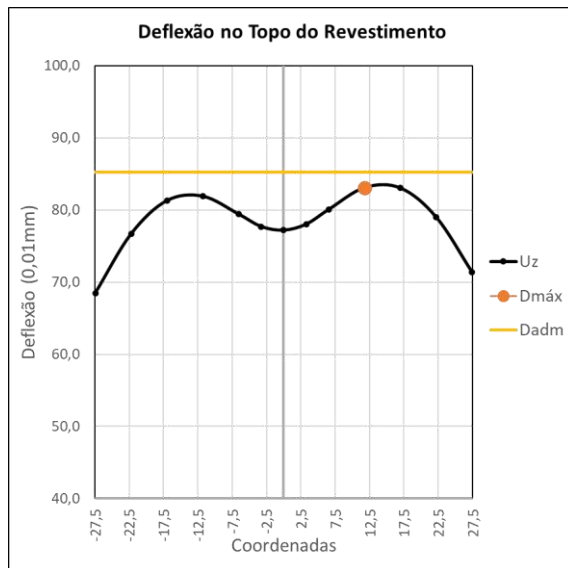
SOLUÇÃO TIPO: CENÁRIO 05		- SL CBR = 9,50%		5" (CMB + GEOGRELHA)		
CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	Mr (MPa)	Coef. Poisson	Aderência	Nº da Camada
Capa	CBUQ fx - C - Asfalto Borracha	5,00	2568	0,30	0,0	1
Base	Base Solo-Cimento Existente + Geogrelha	40,00	200	0,25	0,0	2
Subleito	Solo Local CBR ≥ 9% (Mr pela MCT)	∞	73	0,45	0,0	3
TOTAL DIMENSIONADO (cm):		45,00				

PARÂMETROS	ATUANTE	MODELO ADOTADO	ADMISSÍVEL	VERIFICAÇÃO	NÚMERO N ATENDIDO
Deflexão recuperável no topo da camada de rolamento (0,01 mm)	83,09	(DNER PRO-269/94)	85,27	ATENDE	3,42E+06
Deformação horizontal de tração máxima na fibra inferior do revestimento (mm/mm)	5,61E-04	(Franco -Asfalto Borracha/2007)	5,93E-04	ATENDE	1,29E+06
Deformação vertical de compressão máxima no topo do subleito (mm/mm)	1,19E-04	Asphalt Institute (Monismith & Brown)/1999	3,75E-04	ATENDE	5,13E+08

NUSACE =	2,98E+06
NAASHTO =	1,08E+06

A partir da análise gráfica, nota-se que os valores de deflexão no topo do revestimento (D_0); de deformação de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t); de compressão do topo do subleito (ϵ_v) encontram-se abaixo dos valores admissíveis representado pelas linhas laranjas e, portanto, satisfatórios para o Cenário 05 de tráfego.

Nota-se que o uso de CMB, em relação a Alternativa F-1 e F-2, permite a redução de 3,0cm de concreto asfáltico, e aumento da capacidade de tráfego graças à vida de fadiga desta mistura asfáltica.



5.4.5. Definição da Solução de Pavimento

No item anterior foi possível constatar que, embora existam diversas soluções de pavimento para o empreendimento, é sabido que a localização geográfica da obra possui relativa distância de transporte (DMT) para alguns tipos de materiais.

Sabe-se também que a região apresenta média de temperaturas altas ao longo do ano e por conta disso o emprego de materiais cimentados (BGTC, CCR, solo-cimento, solo-cal) necessitaria de um controle tecnológico e logístico muito rigoroso para transporte e cura, havendo grandes riscos econômicos envolvidos nestas concepções semirrígidas.

Além disso, a reciclagem com cimento seria viável somente se a camada de base fosse de material granular pétreo. Seria possível inclusão de material virgem para tornar o solo-cimento existente em sub-base, entretanto esta opção tornaria o custo do empreendimento muito mais elevado.

A inclusão de uma nova camada granular (BGS) ou cimentada (BGTC) sobre o solo-cimento apresentaria ótimos resultados, tanto pelo aumento da capacidade de suporte, quanto pela elevação do greide, tornando a drenagem do pavimento mais simples e efetiva. Entretanto, esta opção também resulta em elevados custos de implantação, quando comparada a solução proposta neste trabalho.

Diante do exposto, propõe-se a fresagem do revestimento existente, inclusão de geogrelhas como reforço do novo revestimento e como controle da reflexão de trincas provenientes da base cimentada (solo-cimento existente). O mecanismo de funcionamento da geogrelha é: com a passagem do tráfego, é tracionada, absorvendo esforços horizontais e transferindo esforços verticais em uma área maior, reduzindo assim as tensões que chegam nas camadas inferiores e além de atuar como “armadura positiva” para o revestimento.

O revestimento adotado é o Concreto Asfáltico Modificado por Borracha (CAMB), com espessura de 5,0cm. O CAMB é uma mistura asfáltica de maior flexibilidade, com maior resistência à fadiga. Esta solução é de menor custo, menor espessura, menor intervenção e de fácil aquisição dos materiais e de simples execução.

5.5. Estrutura Final

A estrutura de pavimento proposta para este trabalho, em atendimento ao dimensionamento, está apresentada a seguir.

EST. MICHEL FERRÉS HADDAD - CORNÉLIO PROCÓPIO/PR - PAVIMENTO TIPO		
Camada	Esp. (cm)	Material
Revestimento	5,0	CAMB - Concreto Asfáltico Modificado por Borracha - Faixa C (1 x 5,0cm)
Pintura de Ligação	-	Emulsão asfáltica tipo RR-1C (1 aplicação)
Reforço com Geossintético	-	Geogrelha Flexível Tecida Biaxial - Resistência à Tração 50x50kN/m
Subleito	∞	CBR ≥ 9,5%, Mr ≥ 73MPa
TOTAL	5,0	

5.6. Particularidades Construtivas

O uso de geossintéticos como reforço de revestimento deve apresentar alguns cuidados como: fresagem do revestimento, limpeza da superfície, pintura de ligação da superfície, disposição das peças, transpasses longitudinais e transversais, salgamento com massa asfáltica para assentar e fixar as peças, compactação, lançamento do restante da massa asfáltica e então compactação final.

Todos os serviços de pavimentação devem ser executados em total conformidade com as especificações previstas neste relatório, sem as quais as soluções definidas perdem a validade. Ressalta-se que deverão ser periodicamente consultadas especificações atualizadas, devendo fazer o uso destas, desde que sejam substitutas daquelas adotadas.

Para a utilização de especificações que diferem daquelas previstas, a executora deverá proceder com requerimento formalizado, que deverá ser apreciado pelo corpo técnico de fiscalização de controle tecnológico e/ou corpo técnico de projetos.

G. ANDRADE SERVICOS DE ENGENHARIA
CNPJ: 035.190.568/0001-05

Cornélio Procópio-PR, 17 de janeiro de 2024.

Maurício Roberto Ceolim

Engenheiro Civil

CREA-PR 159.719/D

Gabriel Luciano Andrade

Engenheiro Civil

CREA PR-193.463/D



6. ESPECIFICAÇÕES DE SERVIÇO

A seguir é apresentado as especificações que deverão ser obedecidas na execução das obras:

- DER/PR ES-PA 17/23 – Pinturas Asfálticas;
- DER/PR ES-PA 28/23 – Concreto Asfáltico Usinado à Quente, com Asfalto-Borracha, Tipo *Terminal Blending*
- DER/PR ES-PA 31/23 – Fresagem à Frio
DER/SP ET-DE-P00/043 – Tratamento Anti-Reflexão de Trincas com Geossintético;