



**RETROANÁLISE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PARA
DETERMINAÇÃO DA VIDA UTIL RESTANTE
Estudo de Caso da Avenida dos Autonomistas (Osasco-SP)**

SÃO PAULO
2017



JULIA HELENA CHAVES
LUIZ FERNANDO XAVIER RIBEIRO
YURI BON LEMES

**RETROANÁLISE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PARA
DETERMINAÇÃO DA VIDA UTIL RESTANTE
Estudo de Caso da Avenida dos Autonomistas (Osasco-SP)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Pavimentação Rodoviária, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito para a obtenção do Grau de Especialista em Pavimentação Rodoviária.

Orientador: Assis Rodrigues Abbud Vilella

SÃO PAULO
2017

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Eng. Dr. Assis Rodrigues Abbud Villela pelo crédito ao incentivar o tema, pela paciência, dedicação e orientação, e por contribuir com cada detalhe para que esse projeto se viabilizasse.

Aos Engº M.Sc. Paulo Sergio Peterlini e Engº M.Sc. Santi Ferri pela participação na banca, pela análise e colaboração ao nosso trabalho.

A todos os professores que participaram na nossa formação e contribuíram com o nosso desenvolvimento.

Aos nossos colegas da turma de pós graduação em Pavimentação Rodoviária pelo apoio e companheirismo, por tornarem nossas aulas divertidas e criativas.

Aos nossos pais, irmãos e amigos, que distantes ou presentes viabilizaram esse sonho, por acreditar, não desanimarem e nem desistirem.

FOLHA DE APROVAÇÃO

RETROANÁLISE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PARA DETERMINAÇÃO DA VIDA UTIL RESTANTE Estudo de Caso da Avenida dos Autonomistas (Osasco-SP)

Por

JULIA HELENA CHAVES
LUIZ FERNANDO XAVIER RIBEIRO
YURI BOM LEMES

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PAVIMENTAÇÃO
RODOVIÁRIA, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA
PELOS PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

São Paulo (SP) 04 de agosto de 2017.

Engº D.Sc. Assis Rodrigues Abbud Villela

Engº M.Sc. Paulo Sergio Peterlini

Engº M.Sc. Santi Ferri

RESUMO

A determinação da vida útil de um pavimento é vital para definir o momento de intervenção na estrutura, a demora na ação corretiva compromete as funções do pavimento, prejudicando o desenvolvimento econômico, além de afetar diretamente o conforto e a segurança. O presente trabalho tem como objetivo principal determinar a vida útil restante do pavimento flexível em um seguimento da Avenida dos Autonomistas em Osasco (São Paulo), através da retroanálise dos dados deflectométricos do projeto de recuperação da via e implantação da faixa de ônibus, empregando os programas de método empírico-mecanicista *Evercalc* 5.0 e *ELSYM5*. Para o cálculo da retroanálise dos módulos de resiliência, foram utilizados os valores de deflexão obtidos através do equipamento por impacto, Falling Weight Deflectometer (FWD). Com o emprego do programa *Evercalc* 5.0 de método empírico-mecanicista foram lançadas as bacias de deflexão identificadas pelo FWD e obtidos os valores do módulo de resiliência para as camadas da estrutura. Com os módulos de resiliência encontrados na retroanálise, utilizou-se o programa *ELSYM5* para a obtenção das características elásticas de cada camada. Obtidos todos os valores das deformações, empregou-se a instrução de projeto IP-DE-P00/001 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, que define as condições para escolha de metodologia para cada camada, estabelecendo-se então o valor da carga de tráfego da estrutura, sendo possível realizar comparações com as soluções adotadas no projeto.

Palavras-chaves: Retroanálise, vida-útil, empírico-mecanicista.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - BÁCIA DEFLECTÓMETRICA (BERNUCCI AT ALL, 2006)	25
FIGURA 2 - ESTUDO DE CASO	32
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DA PISTA ANALISADA	32
FIGURA 4 - CROQUI ESQUEMATICO DA REALIZAÇÃO DO ENSAIO COM O FWD	46
FIGURA 5 - ESPAÇAMENTO DOS SENSORES DE LEITURA DA DEFLEXÃO (AUTOR).....	62
FIGURA 6- EXEMPLO EVERCALC - TELA 1 (AUTOR).....	66
FIGURA 7 - EXEMPLO EVERCALC - TELA 2 (AUTOR)	67
FIGURA 8 - COMPARATIVO DAS CURVAS DEFLECTÓMETICAS	73
FIGURA 9 - ELSYM 5 - TELA 1	74
FIGURA 10 - COORDENADAS DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS.....	74
FIGURA 11 - ELSYM 5 - TELA 2	75
FIGURA 12 - APLICAÇÃO DE CARGA	75
FIGURA 13 - POSIÇÃO DA TENSÃO E DEFORMAÇÃO NAS CAMADAS	76
FIGURA 14 - ELSYM 5 - TELA 3	77
 FOTO 1 - TRECHO INICIAL PRÓXIMO AO CRUZAMENTO COM A RUA GENERAL FLORÊNCIO, COM ALGUNS REMENDOS E DESGASTE DO REVESTIMENTO	41
FOTO 2 - TRINCAS INTERLIGADAS TIPO COURO DE JACARÉ, PRÓXIMO À ESTACA 1.023+0,00.....	41
FOTO 3 - TRECHO PRÓXIMO Á ESTAÇÃO QUITAÚNA - PAVIMENTO EM BOM ESTADO E RECAPEAMENTO RECENTE	42
FOTO 4 - PAVIMENTO EM BOM ESTADO E RECAPEAMENTO RECENTE NAS 2 FAIXAS DA DIREITA – PRÓXIMO À ESTACA 1.065+0,00	42
FOTO 5 - TRINCAS ISOLADAS E TRINCA PROVENIENTE DE JUNTA DE CONSTRUÇÃO NA DIVISÃO DE FAIXAS – PRÓXIMO À ESTAÇÃO COMANDANTE SAMPAIO	42
FOTO 6 - REMENDOS E AFUNDAMENTOS PLÁSTICOS NA ATUAL FAIXA DE ÔNIBUS – PRÓXIMO À ESTACA 1.146+0,00.....	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS EM AMOSTRAS DAS SONDAGENS A TRADO	35
TABELA 2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS EM AMOSTRAS DOS POÇOS DE INSPEÇÃO	35
TABELA 3 - CÁLCULO DO CBR ESTATÍSTICO	36
TABELA 4 - RESULTADOS DOS POÇOS DE INSPEÇÃO – ESPESSURAS DAS CAMADAS.....	37
TABELA 5 - FATORES DE EQUIVALÊNCIA CONFORME UTILIZAÇÃO DA VIA DA SIURB	38
TABELA 6 - FLUXO DE ÔNIBUS NO ANO DE ABERTURA DO CORREDOR	39
TABELA 7 - CONCEITOS DE DEGRADAÇÃO DO PAVIMENTO CONFORME VALORES DE IGG	43
TABELA 8 - MODELO DO CÁLCULO DO IGG	45
TABELA 9 - CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL	49
TABELA 10 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL – FAIXAS 1 E 2.....	50
TABELA 11 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL – FAIXA 3	50
TABELA 12 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL – FAIXA 4	50
TABELA 13 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL – FAIXAS 5 E 6.....	50
TABELA 14 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS FINOS QUANTO À RESILIÊNCIA.....	52
TABELA 15 - RESULTADOS DAS PORCENTAGENS DE SILTE NA FRAÇÃO FINA DO SOLO	54
TABELA 16 - CONSTANTES DOS SOLOS.....	55
TABELA 17 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL – FAIXAS 1 E 2 - PRO-269/94	57
TABELA 18 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL – FAIXA 3 - PRO-269/94.....	57
TABELA 19 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL – FAIXA 4 - PRO-269/94.....	57
TABELA 20 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL – FAIXAS 5 E 6 - PRO-269/94	58
TABELA 21 DEFLEXÕES DO SEGUIMENTO ESTUDE (RELATÓRIO TÉCNICO)	60
TABELA 22 - DEFLEXÕES - RAMO 1000 - FAIXA 4.....	63
TABELA 23 - DEFLEXÕES - RAMO 1000 - FAIXA 6	63
TABELA 24 - DEFLEXÕES - RAMO 2000 - FAIXA 1	64
TABELA 25 - DEFLEXÕES - RAMO 2000 - FAIXA 3	64
TABELA 26 - DEFLEXÕES CALCULADAS - RAMO 1000 - FAIXA 4.....	68
TABELA 27 - DEFLEXÕES CALCULADAS - RAMO 1000 - FAIXA 6	69
TABELA 28- DEFLEXÕES CALCULADAS - RAMO 2000 - FAIXA 1	70
TABELA 29 - DEFLEXÕES CALCULADAS - RAMO 2000 - FAIXA 3	71
TABELA 30 - RESULTADO DA RETROANÁLISE	72

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
1.2.	Objetivo Geral.....	15
1.3.	Objetivos Específicos	15
1.4.	HIPÓTESE	16
1.5.	JUSTIFICATIVAS	16
1.6.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.7.	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1.	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL	19
2.2.	MÉTODO DESTRUTIVO	21
2.3.	MÉTODO NÃO DESTRUTIVO.....	21
2.3.1.	Viga Benkelman	23
2.3.2.	FWD.....	23
2.4.	RETROANÁLISE.....	25
2.4.1	Módulo de Resiliência.....	26
2.4.2	Coeficiente de Poisson	28
2.4.3	Métodos de Retroanálise Iterativos	29
2.4.1.1.	<i>Softwares para Aplicação do Método Iterativo</i>	30
2.4.1.1.1.	<i>Evercalc 5.0</i>	30
3.	MÉTODO DE PESQUISA	31
3.1.1.	Parâmetros de projeto	32
3.1.2.1	<i>Ensaio Geotécnicos</i>	33
3.1.2.2	<i>Estudo de Tráfego</i>	37
3.1.2.3	<i>Análise da Condição Superficial e Estrutural do Pavimento Existente</i>	40
3.1.2.4	<i>Avaliação Objetiva de Superfície</i>	40
3.1.2.5	<i>Correlação entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FDW</i>	47
3.1.2	Dimensionamento do Reforço.....	47
3.1.3	Método DNER- PRO 11/79	47
3.1.4	Método DNER – PRO 269/94	50
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
4.1	Determinação da Vida Útil Através da Retroanálise	59
4.2	Levantamento das Estruturas.....	59
4.3	Dados Deflectométricos	61
4.4	Tratamento de Dados para Retroanálise.....	64
4.5	ELSYM 5 e Simulação de Tensões e Deformações	73
4.6	Critério de Fadiga	78

4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
	Considerações no Ramo 1000	83
	Considerações no Ramo 2000	84
	ANEXOS.....	88

1. INTRODUÇÃO

As iniciativas no rodoviarismo datam do início da República, mas seu real desenvolvimento no Brasil foi a partir dos anos 50 graças à lei Jopper de 1945 que conferia autonomia técnica e financeira ao extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), além da criação do Fundo Rodoviário Nacional (RIBAS, 2013).

No final dos anos 60, com exceção de Manaus e Belém, todas as capitais estavam interligadas por estradas federais, e na década seguinte o DNER continuou com as grandes obras rodoviárias, através das interligações regionais. Assim, nasceram a Transamazônica, a Belém-Brasília, a construção da Ponte Presidente Costa e Silva (Rio-Niterói), entre outros.

O Brasil chegava em 1980 com 47 mil km de rodovias federais pavimentadas, mas em 1988, o Fundo Nacional Rodoviário seria extinto e os recursos foram caindo gradativamente (DNIT, 2017).

Com o progressivo corte na área de expansão rodoviária, a ênfase foi gradualmente deslocada da construção para as atividades de recuperação e restauração, desta forma os órgãos responsáveis pela conservação da malha nacional passaram a desenvolver e aperfeiçoar métodos de avaliar a estrutura do pavimento existente, apontando as causas de suas deficiências e fornecendo elementos para o cálculo da vida útil restante ou do reforço necessário para um novo número de solicitações de eixo equivalentes ao eixo padrão durante um novo período considerado, o conhecido número N (DNIT, 2006).

Seguindo esta linha o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT), autarquia criada em 2001 e responsável pela rede rodoviária federal, criou em 2005, um programa que consolida todas as atividades de recuperação e manutenção de rodovias, prevendo o tratamento de cada uma por um período de sete anos (PINTO, 2016).

O programa criado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes estipula como 10 anos de vida útil para as soluções estruturais, considerando métodos de projetos de reforço tradicionais, como o método do DNER-

PRO 10/79 (Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento A), o método do DNER-PRO 159/85 (Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semirrígidos), o DNER-PRO 11/79 (Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento B). Porém exige que o projetista realize a comparação com o dimensionamento feito pelo método DNER-PRO 269/94 (Projeto de restauração de pavimentos flexível - Tecnapav) (FONSECA, 2013).

Esses métodos de dimensionamentos são oriundos da observação da evolução do estado de condição dos pavimentos. Dessa forma, esse método é fruto da modelagem estatística da evolução dos parâmetros físicos observados no pavimento em serviço, conhecidos como métodos empíricos (CONTECC, 2015).

Porém a metodologia empírica de dimensionamento proveniente desses métodos de reforço, com exceção do DNER PRO 269/94 que é empírico-mecanístico possui limitações, apesar de atender na restrição de deformações permanentes excessivas e de tensões que possam provocar a ruptura por cisalhamento dos solos no subleito, sub-base e base. Estes não consideram a limitação das deformações recuperáveis ou resilientes, cuja repetição sob ação do tráfego provoca a ruptura por fadiga dos revestimentos asfálticos (PINTO, 1991).

Com o intuito de prever o desempenho dos pavimentos sob a ação dos carregamentos, tem-se empregado modelos mecânicos, cuja utilização ficou facilitada devido a maior disponibilidade de recursos computacionais. As análises realizadas por esses modelos consideram a estrutura do pavimento como um sistema de multicamadas e se baseiam na teoria da elasticidade.

Essa estrutura é desenvolvida em camadas de comportamento elástico para o cálculo das tensões, deformações e deslocamento gerados pelas cargas aplicadas. Esses valores são correlacionados com o desempenho do pavimento, permitindo assim, que sejam previstos problemas associados à sua deterioração funcional (NETO, 2004).

Os principais softwares utilizados atualmente na aplicação do modelo mecânico-empírico: Sis pav, Elsym5, Everseries (Everstress, Everpave e Evercalc),

Fepave2, Kenpave. Estes programas consideram parâmetros de entrada, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson além é claro, ad espessura de cada camada pré-dimensionada. Algumas outras hipóteses também são consideradas, tais como carregamentos dinâmicos, ações climáticas, materiais viscoelásticos, etc (NETO, 2004).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise de dimensionamento da carga de tráfego de um projeto de reforço estrutural, dispondo do software Everseries para retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento, determinando a vida útil restante da estrutura e comparando com os resultados do projeto.

O TCC vai utilizar os levantamentos do projeto de reforço e recuperação da Avenida dos Autonomistas, na cidade de Osasco, SP) para implantação de corredor de ônibus urbano. Os dados foram levantados com a finalidade de elaboração de projeto de engenharia corrente e, portanto, representam a prática cotidiana para análise da estrutura dos pavimentos.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Análise crítica das camadas de um pavimento flexível, através dos softwares Evercalc 5.0 e ELSYM5, para dimensionamento da vida útil restante e comparação com os resultados do projeto estudado, tendo como estudo de caso o projeto de reforço e recuperação da Avenida dos Autonomistas em Osasco, SP para implantação de corredor de ônibus.

1.2. Objetivo Geral

O objetivo geral do TCC é através de programas computacionais de abordagens empíricas-mecanicistas determinar a vida útil restante do pavimento flexível, utilizando para isto, o Estudo de Caso da Avenida dos Autonomistas em Osasco, SP do km 21,000 ao km 22,160 (Terminal Vila Yara), com extensão de análise aproximada de 1,16 km, entre os ramos 1000 (estaca 1000+0,00 até a 1058+3,71) e 2000 (estaca 2000+0,00 até a 2057+17,38).

1.3. Objetivos Específicos

Com a finalidade de atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Desenvolver a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento flexível através do programa *Evercalc* 5.0;
- b) Compreender os métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento através deste software;
- c) Analisar os resultados obtidos para as tensões e deformações, em cada camada da estrutura, geradas pelo programa *ELSYM5*;
- d) Comparar os resultados obtidos com os valores de carga de tráfego do projeto analisado; e

- e) Estimar a vida útil da estrutura para o cenário de projeto;

1.4. HIPÓTESE

Se os métodos mecanísticos de retroanálises têm limitações, então, é possível identificar e avaliar as deficiências para que se propicie estruturas de restauração mais adequadas, logo, o estudo e comparação podem levar a futuros modelos de dimensionamento.

1.5. JUSTIFICATIVAS

Segundo a pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de 2016, existem hoje 184 mil km de rodovias pavimentadas, entre federais e estaduais. Na análise de 103.308 km dessa malha, foram identificados 49.898 km com algum tipo de problema no pavimento, correspondendo a 48,3% da extensão total avaliada.

1.5.1 Tecnológica

As falhas no processo de recuperação do pavimento impedem que o escoamento das cargas seja realizado de forma rápida e eficaz, prejudicando o fluxo.

1.5.2 Sociais

As falhas no processo de recuperação afetam diretamente o conforto e a segurança, diminui a durabilidade dos componentes veiculares, aumenta o tempo de viagem.

1.5.3 Econômicas

Segundo a tabela de custo médio de gerencial do DNIT de 2014, o gasto médio para a reconstrução de um pavimento é quase o dobro, em comparação a recuperação, que custa próximo de 55% do valor da reconstrução por km.

1.5.4 Ecológicas

As falhas no processo de recuperação afetam diretamente o trajeto, aumenta o tempo de viagem e o consumo de combustível desnecessário que agride o meio ambiente.

Portanto, o incentivo a pesquisas e trabalhos voltados a restauração de pavimentos flexíveis, colabora para minimizar os custos operacionais, aumentar a segurança dos usuários, diminuir os impactos ambientais e contribuir com o desenvolvimento social.

1.6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a análise do dimensionamento da carga de tráfego utilizou-se o estudo de caso da Avenida dos Autonomistas em Osasco – SP do km 21 ao Terminal Vila Yara, com extensão de análise aproximada de 1,16 km, entre os ramos 1000 e 2000.

Para o cálculo da retroanálise dos módulos de resiliência, foram utilizados os valores das deflexão obtidos através do equipamento por impacto, *Falling Weight Deflectometer* (FWD) a cada oitenta metros em cada uma das faixas de rolamento estudadas nos dois ramos.

Também se tomou como base para entendimento da estrutura do pavimento as informações provenientes da abertura de poços de inspeção a cada 250 m. E para a análise da deformação transversal (coeficientes de Poisson) foram adotados os valores mais tradicionais da literatura, de acordo com cada tipodematerial.

Com o emprego do programa *Evercalc 5.0* de método mecanícistico foram lançadas as bacias de deflexão identificadas pelo FWD e obtidos os valores do modulo de resiliência para todas as camadas da estrutura a cada oitenta metros(coincidindo com os pontos do ensaio deflectométrico do FWD.

Com os modulo de resiliência encontrados na retroanálise, utilizou-se o programa ELSYM5 para a obtenção das características elásticas de cada camada. Obtido todos os valores das deformações, empregou-se a instrução de projeto IP-DE-

P00/001 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP), que define as condições para escolha de metodologia para cada camada, estabelecendo-se então o valor da carga de tráfego da estrutura, sendo possível realizar comparações com as soluções adotadas no estudo de caso.

1.7. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O **Capítulo 1 – Introdução** apresenta um breve histórico do tema, o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delinea as principais justificativas para a realização do presente estudo e os procedimentos metodológicos que serão adotados.

O **Capítulo 2 – Fundamentação Teórica** aborda os fundamentos necessários para balizamento do TCC, no caso, sobre a Avaliação Estrutural e Retroanálise de um pavimento com ênfase para a utilização do Evercal e Elsym5.

O **Capítulo 3 – Método de Pesquisa**, do tipo Estudo de Caso, apresenta os detalhes do projeto escolhido como estudo de tráfego, dos solos, avaliação superficial, resultados dos métodos DNER PRO11/79 e DNER PRO 269/94.

O **Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados**, projeto e a aplicação da retroanálise através da determinação da vida útil, utilizando o levantamento deflectométrico e levantamento das estruturas. Obtém-se dados suficientes para Entrada no programa Evercalc 5.0 para cálculo da bacia deflectométrica teórica e comparando a com a levantada em campo, após, utilizou-se o programa Elsym5 para determinação das deformações decorrentes da aplicação da carga.

O **Capítulo 5 – Considerações Finais** apresenta as conclusões a respeito de toda a pesquisa realizada e recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um pavimento, segundo Balbo (2007), é uma estrutura não perene, composta por múltiplas camadas de diferentes matérias compactadas com variadas espessuras, sobre a superfície de terraplenagem (subleito), de maneira a resistir aos esforços impostos pelo tráfego de veículos e ao intemperismo, proporcionando melhores condições de rolamento aos usuários.

A pavimentação tem como seu principal objetivo garantir a trafegabilidade em qualquer condição climática, proporcionando ao usuário segurança e conforto (BERNUCCI et al, 2006).

Entretanto, ao longo do tempo de serviço o pavimento inicia um processo de degradação. Em geral, com o intuito de manter os pavimentos em condições aceitáveis, e visando aumentar a vida útil das rodovias é realizada a superposição de camadas de concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) sobre revestimentos flexíveis ou rígidos. Porém, quando o pavimento exhibe elevados índices de degradação estrutural e funcional, executar um simples recapeamento de concreto asfáltico pode não resolver o problema (NOBREGA, 2003).

Desta forma se faz necessária a avaliação da estrutura dos pavimentos com finalidade de determinar as condições que o pavimento oferece aos usuários das vias, levando em conta qual a frequência de ocorrência de defeitos na superfície dos pavimentos, a natureza da ocorrência, em que eles influenciam no conforto e segurança dos usuários e quais deverão ser as medidas corretivas a serem adotadas para a restauração das condições normais e aceitáveis da via (GONTIJO et. al., 1994).

2.1. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

A expressão avaliação estrutural abrange a caracterização de elementos e variáveis da estrutura do pavimento que possibilita uma análise objetiva de seu comportamento quando submetido a cargas do tráfego e ações do meio, de modo a

possibilitar um julgamento sobre a capacidade de suporte do pavimento existente diante das futuras demandas do tráfego.

Para Balbo (2007) tais avaliações combinadas com a observação dos defeitos superficiais, possibilitam a definição dos padrões e causas de patologias existentes nos pavimentos, visando sua reparação. Além disso, a avaliação estrutural permite emitir conclusões sobre a integridade de camadas de materiais subjacentes ao revestimento, cujos defeitos, muitas vezes, não são detectados pela avaliação visual superficial, como no caso de intensas deformações plásticas, rupturas e contaminação em camadas granulares.

Tendo o conhecimento do estágio de deterioração atual do pavimento, as espessuras das camadas, os materiais que as constituem e seus respectivos módulos elásticos, é possível estudar a adequação da estrutura quando solicitada por uma carga conhecida, simulando assim os esforços produzidos pela circulação dos automóveis.

Com uma execução periódica dessa avaliação pode-se indicar defeitos antes que atinjam totalmente o revestimento, permitindo a seleção de alternativas de reabilitação ou recuperação mais adequadas para as seções priorizadas, otimizando recursos e garantindo a vida útil de projeto (HENRIQUE, 2013).

Segundo Borges (2001), é possível, através da avaliação do pavimento, verificar duas condições. A condição funcional, que descreve a qualidade da rodovia em termos de conforto, segurança, custo ao usuário, influência do meio ambiente e aspectos estéticos, procurando-se associar a natureza dos defeitos às causas determinantes.

E a condição estrutural, que está relacionada à capacidade de suporte do pavimento, abrangendo as características de resistência e deformabilidade das camadas do pavimento e do subleito sob a ação das cargas atuantes.

Assim, de acordo com Balbo (2007) as avaliações estruturais podem ser separadas em dois métodos, destrutivos e não destrutivos.

2.2. MÉTODO DESTRUTIVO

Segundo Marcon (1996), o método é chamado destrutivo porque invalidam, para futuros testes, as áreas do pavimento onde foram feitas as remoções.

Para Henrique (2013) e Bernucci, et. al., (2006) o método destrutivo é a análise da condição estrutural das camadas que compõe o pavimento através da abertura de trincheiras transversais a pista; extração de amostras de revestimentos e bases com sondagens rotativas; ou cavas com pás e picaretas, ao longo do segmento estudado permitindo recolher amostras de cada camada até o subleito e realizar ensaios de capacidade de carga in situ, como o CBR in situ, e também, determinar a umidade e massa específica aparente seca máxima.

Amostras também podem ser coletadas para ensaios de laboratório, para a determinação de seus índices físicos (limite de liquidez e limite de plasticidade) de como categoria do material e granulometria por peneiramento e sedimentação, além de ensaios ISC/CBR, triaxiais, de resiliência e de carga permanente.

A abertura de cavas é uma das inspeções mais comuns, geralmente executada no acostamento tangenciando a pista de rolamento, tais poços possuem normalmente dimensões aproximadas de 0,8 m x 0,8 m, possibilitando a identificação da espessura das camadas, o reconhecimento visual e a avaliação das condições do material, bem como a coleta de amostras para determinação da massa específica aparente seca máxima e umidades in situ (BALBO, 2007)

2.3. MÉTODO NÃO DESTRUTIVO

Denominados *Ground Penetrating Radar* (GPR), estes processos têm como base o geofísico, Balbo (2007) descreve o processo realizado no movimento de um veículo que transporta o equipamento, consistindo por meio de uma antena emissora de ondas e outra antena receptora sobre a superfície do pavimento; a cada mudança de constantes dielétricas nas camadas, a forma de onda refletida se modifica,

permitindo a determinação da espessura.

Para determinação do material, bem como o estado de degradação é necessário à calibração de resultados para inúmeros materiais, de maneira a tornar possível a identificação através de padrões de resposta eletromagnética.

Ao longo da vida útil de um pavimento em serviço, este está sujeito a deformações devido às solicitações causadas pelos veículos. Segundo Borges (2001), a deflexão do pavimento, da forma como é medida, é o resultado de uma parcela de deformação elástica e uma parcela visco-elástica.

Assim, as deformações elásticas são os deslocamentos verticais causados pela solicitação, absorvidos pela estrutura, e que após a solicitação, voltam a posição original imediatamente. Enquanto que a parcela da deformação visco-elástica é aquela que não tem a recuperação dos deslocamentos imediata.

Portanto, além da determinação dos tipos, espessuras e condições presentes nas camadas, faz-se necessário à determinação da capacidade estrutural do pavimento.

Desta forma o método não destrutivo se baseia na mensura das deflexões recuperáveis, ou seja, deflexões elásticas da superfície do pavimento geradas por equipamentos que ocasionam solicitação de carga e possuem deflectômetros ou sismômetros para medir a deflexão.

Segundo Bernucci, et. al., (2006) é a avaliação mais adequada para ser feita em grandes extensões de pistas e com possibilidade de inúmeras repetições no mesmo ponto, desta forma acompanha a variação da capacidade de carga com o tempo, representadas pelas medidas de deflexão que veremos a seguir.

Além disso, o estudo deflectométrico de um pavimento é usado não só para avaliar o pavimento quanto a sua estrutura, mas também para auxiliar a elaboração de projetos de reforço para estes pavimentos.

Quando a estrutura é submetida a uma carga conhecida obtemos uma

deformação das camadas do pavimento, dois tipos de equipamentos são amplamente usados no Brasil e no mundo para tal finalidade: a viga Benkelman e o deflectômetro de impacto do tipo FWD. Ambos medem os deslocamentos verticais sofridos na superfície de um pavimento quando submetidos a uma carga, este deslocamento é conhecido como deflexão.

2.3.1. Viga Benkelman

Devido a simplicidade e custo baixo a viga de Benkelman é o equipamento de medida de deflexões mais difundido no Brasil, o princípio de funcionamento é simplesmente o de um braço de alavanca. Uma haste rígida encontra-se com a ponta de prova entre par de rodas do eixo traseiro de um caminhão dotado de eixo traseiro do tipo simples de rodas duplas carregado com 8,2tfg e 5,6 kg/cm² de pressão nos pneumáticos, com ranhuras em boas condições. A haste está articulada em um corpo de apoio para esta viga, e na outra extremidade da viga, há um extensômetro, com precisão mínima de centésimos de milímetro.

Quando o caminhão se afasta da ponta de prova entre as rodas, a superfície do pavimento vai retornar (após algum tempo) a seu plano original.

As leituras de deflexão através deste método tiveram início na década de 50 na pista de teste WASHO, sofreram algumas alterações após estudos realizados por engenheiros da *Canadian Good Roads Association* (CGRA). No Brasil passou a ser utilizado na década seguinte sendo hoje um ensaio normatizado e exigido em execuções de rodovias.

2.3.2. FWD

No final da década de noventa um novo método de leitura deflectométrica começou a ser usado no Brasil o *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

Segundo a norma 4694:2003 da *American Society for Testing and Materials*

(ASTM), norma americana que padroniza a utilização desse equipamento e cujo método de ensaio visa ~~este método de ensaio~~ abranger a medição de deflexão de superfícies pavimentadas e não pavimentadas com um dispositivo de carga de impulso tipo peso em queda. Além disso, descreve a medição da resposta de deflexão vertical da superfície a uma carga de impulso aplicada à superfície do pavimento. As deflexões verticais são medidas no eixo de carga e em pontos espaçados radialmente para fora a partir do eixo de carga.

O carregamento gerado através do peso em queda livre simula a solicitação que os eixos dos veículos exercem sobre o pavimento.

A cada passagem de roda o pavimento sofre um deslocamento total que tem duas componentes, primeiramente a deformação elástica que resulta na flexão alternada do revestimento, chamada por convenção de deflexão, cuja medida é a principal forma de avaliação estrutural de um pavimento em uso.

A deformação permanente que resulta no afundamento de trilha de roda é um critério de definição da vida útil estrutural e funcional de um pavimento visto que, a partir de certo valor, pode interferir na condição de conforto e segurança do tráfego.

Quando se mede o deslocamento elástico em vários pontos a partir da carga tem-se a denominada bacia de deflexão ou linha de influência da carga sobre um ponto do pavimento (BERNUCCI, et. al., 2006; DNER-ME 061/94).

No Brasil a norma que especifica os trabalhos utilizando o FWD é a DNER-PRO 273/94 com o objetivo de padronizar o procedimento para determinações de deflexões recuperáveis na superfície do pavimento, com vistas a uma avaliação estrutural do pavimento.

Através do ensaio com FWD é possível fazer uma retroanálise da estrutura do pavimento, em que através da bacia deflectométrica obtida com o ensaio é possível ver as condições estruturais do pavimento.

A ilustração da Figura 1 demonstra o funcionamento do FWD e como as informações são obtidas após a queda do peso. Os sensores coletam os dados tanto

no eixo da aplicação da carga quanto fora. Desta maneira se gera a bacia de deformações.

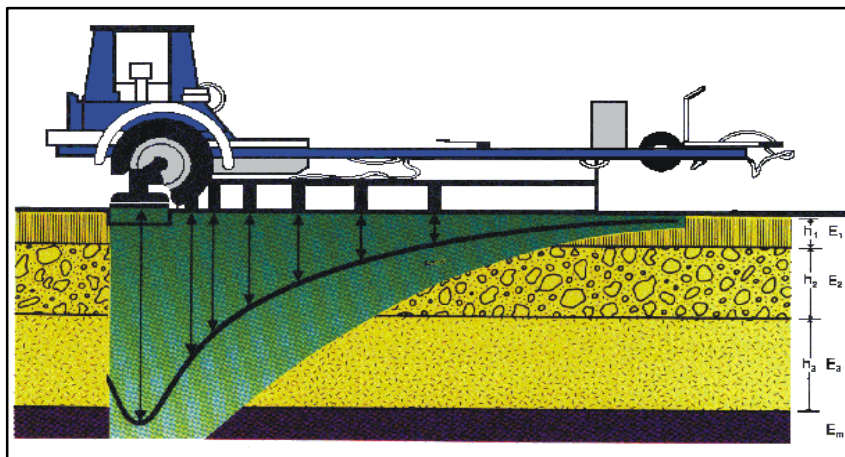


Figura 1 - Bacia Deflectométrica (BERNUCCI atall, 2006)

Existem fatores que influenciam na obtenção dos dados de deflexão, alguns deles independem do método de ensaio, segundo Rocha Filho (1996) a temperatura do pavimento durante a aplicação da carga e leitura dos dados, os materiais e espessuras das camadas do pavimento entre outros e a umidade, principalmente do subleito são os principais fatores de influência.

Além disso, existem diferenças entre as leituras deflectométricas dos diversos equipamentos que medem as deformações elásticas do pavimento.

Assim, ao se estabelecer correlações entre métodos de medição de deflexões, todos esses fatores devem ser levados em consideração.

2.4. RETROANÁLISE

Um dado importante para análise estrutural de um pavimento é o módulo de resiliência dos materiais. Através de ensaios e laboratórios é possível determiná-los. No entanto, para isso seria necessário coletar amostras de cada material, o que tornaria a investigação destrutiva.

O módulo de resiliência pode ser determinado de duas maneiras, a primeira sendo em laboratório com o ensaio de compressão diametral das misturas asfálticas,

no caso de pavimento flexível, ou materiais cimentados para pavimentos rígidos; e ensaios triaxiais dinâmicos para o solo. A segunda forma é o método analítico, através de retroanálise dos mesmos através das bacias deflectométricas obtidas sob a superfície do pavimento (NOREGA, 2003).

Assim, através de interpretação dos dados obtidos na bacia de deflexão pode-se chegar ao módulo de resiliência dos materiais que compõe a estrutura dos pavimentos. Este método é chamado de retro análise.

O processo de retroanálise permite a avaliação estrutural do pavimento para fins de gerencia de malha, dimensionamento de reforço ou ainda determinação da vida útil remanescente (Pereira, 2007).

As primeiras técnicas e tecnologias para determinar os módulos de resiliência surgiram na década de 70. Isso possibilitou aos novos métodos, aliados aos métodos empíricos existentes, pudessem ser desenvolvidos levando em consideração esses valores e deformações para o dimensionamento de pavimentos. Era o surgimento do método mecanístico(Pereira, 2007).

São muitas variáveis que podem influenciar na resposta que uma estrutura de pavimento pode dar à um carregamento. Espessuras das camadas e tipo de material são variáveis da estrutura. Além disso, o modo de aplicação do carregamento, assim como, a intensidade e a frequência também são variáveis que influenciam o resultado. Por fim, alguns fatores externos como temperatura ou umidade devem ser levados em consideração.

2.4.1 Módulo de Resiliência

Módulo de resiliência é o principal elemento para cálculos de retroanálise pois este define a relação entre as tensões e as deformações nas camadas do pavimento. Este termo foi adotado inicialmente por Francis Hveem em 1930, quando estudou esta relação nos materiais usados em pavimentação.

Trata-se do mesmo conceito utilizado no módulo de elasticidade, entretanto devido as maiores deformações dos materiais nas estruturas de pavimento, o termo módulo de resiliência aplica-se melhor, além disso para que não fosse confundido com o módulo Young, este determinado de maneira estática.

Segundo o DNIT, o Módulo de Resiliência (MR) é dado pela seguinte fórmula.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

onde:

σ_d - tensão aplicada rapidamente; e

ε_r - deformação específica vertical recuperável.

O método para determinação do módulo de resiliência em laboratório para misturas asfálticas é descrito pela norma do DNER-ME 133/94. Neste ensaio, cargas sucessivas são aplicadas à uma amostra cilíndrica. Enquanto as cargas são aplicadas é medida a deformação na amostra.

De acordo com esta norma, o módulo é dado pela seguinte equação:

$$MR = \left(\frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \right) T$$

onde:

T – temperatura

Segundo Bernucci, Motta, Ceratti e Soaris (2006), deve-se realçar que os módulos de resiliência das misturas asfálticas variam ao longo do tempo devido ao envelhecimento do ligante asfáltico, o que causa um enrijecimento do ligante e consequente aumento de rigidez dos revestimentos.

A reação de oxidação ocorrida no ligante da mistura promove este

enrijecimento da camada, variando, portanto, o módulo de resiliência e diminuindo leituras de deflexões. Estas variações devem ser levadas em consideração na análise de um pavimento em uso para uma possível intervenção para manutenção.

2.4.2 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson é a razão da deformação lateral ou radial pela deformação longitudinal ou axial recuperável e é considerado constante, essa relação é válida apenas para matérias isotrópicos, ou seja, materiais com propriedades idênticas em todas as direções.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}}$$

Desta forma a relação das deformações mantendo um volume constante, pode-se expressar essa relação através da seguinte equação:

$$\Delta V = \varepsilon x(1 - 2\nu)$$

sendo:

ΔV a variação do volume

ε a de formação longitudinal

Note que o coeficiente de Poisson não pode ser maior que 0,5 porque, se fosse, um elemento tensionado poderia atingir volume nulo ou negativo. O coeficiente de Poisson é necessário nas análises de sistemas de camadas elásticas devido a deformação horizontal sofrida, na atualidade não é típica a realização de ensaios para a medição do coeficiente, de acordo com MAINA et. Al. (2002) a influência do coeficiente de Poisson nos valores das tensões e deformações são pequenas.

Apesar dos valores para diversos materiais de pavimentação estarem bem definidos BALBO (2007) reconhece que muitos materiais apresentam comportamento

tixotrópico, ou seja, comportamento de fluido não newtoniano que apresenta uma alteração dependente do tempo em sua viscosidade, sendo assim, sempre que viável é interessante a realização do ensaio.

2.4.3 Métodos de Retroanálise Iterativos

Utilizando elementos matemáticos mais complexos, é possível, a partir dos dados da bacia de deformação chegar ao módulo de resiliência do material, este seria o método de retroanálise iterativo.

Porém, há três maneiras para realizar o método iterativo. Através de regressão estatística, utilizando banco de dados, ou através de software, pode-se realizar durante a obtenção dos dados.

Segundo Bernucciatal, (2006), a retroanálise dos módulos de elasticidade de um pavimento apresenta as seguintes vantagens:

- Possibilita a obtenção dos módulos nas condições de campo;
- Minimiza o número de sondagens para determinação das espessuras e coletas de amostras para determinação dos parâmetros desejados, que são de difícil reprodução em laboratório, além de serem perigosas;
- Os ensaios não-destrutivos são menos onerosos e menos demorados do que os ensaios destrutivos; e
- Possibilita o uso pleno da bacia deflectométrica, não só a deflexão máxima (d_0) como nas técnicas de avaliação estrutural preconizadas pelo DNER.

No método iterativo comparam-se as bacias de deformação encontradas em campo com uma bacia de deformação teórica utilizando dados da estrutura do pavimento. A partir daí busca-se a aproximação da bacia teórica com a levantada em campo, através de software, quando é em tempo real, através de banco de dados, comparando com bacias previamente calculadas ou através de método estatístico, em

que adotasse um desvio entre as duas bacias.

2.4.1.1. Softwares para Aplicação do Método Interativo

O Método do modo interativo obtém os módulos de resiliência das camadas, ou pela comparação de bacias resultantes de análises mecanicistas onde os módulos são arbitrados com bacias obtidas em campo ou da comparação de bacias previamente retroanalisadas provindas de bancos de dados com bacias de campo (CERATTI, 2015).

Ceratti (2015), avalia que, para subtração do quesito “sorte” existem programas de retroanálise com associação do programa de análise mecânica com a utilização das propriedades construtivas dos materiais, é possível a simulação da estrutura.

Entre programas utilizados para o dimensionamento das camadas do pavimento através do método interativo, retroanálise, podemos utilizar o Evercalc 5.0 para estimar os módulos de resiliência das camadas que compõem o pavimento e o Everpave 5.0 para dimensionar a espessura da camada asfáltica de reforço (BONZANIMI, 2008).

2.4.1.1.1. Evercalc 5.0

Bonzanimi (2008), explica que o programa computacional *Evercalc* 5.0 desenvolvido pelo Departamento de Estradas do Estado de Washington (WSDOT), nos Estados Unidos da América, tem por função calcular a bacia de deflexão e fazer a comparação com a bacia de deflexão encontrada em campo através da medição do FWD. A partir dos valores iniciais de módulos de resiliência proposto por camada pelo usuário, o programa faz interações sucessivas de deflexões medidas e calculadas até que a diferença entre elas seja tolerável.

Segundo o referido autor, a capacidade do programa é de 7 sensores e 8

golpes por ponto de ensaio realizado com o FWD e número de camadas para análise de 5. Para tolerância do erro, o manual indica 1%.

Para dados de entrada do *Evercalc 5.0*, necessitam de informações gerais sobre o pavimento e informações da bacia de deflexão obtidas pelo FWD realizado em cada ponto analisado.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa do tipo estudo de caso é baseado nos dados do projeto de implantação do futuro corredor de ônibus da Avenida dos Autonomistas na cidade de Osasco, SP, delimitando-se um segmento de 1,16 km nos Ramos 1000 (estaca 1000+0,00 até a 1058+3,71) e 2000 (estaca 2000+0,00 até a 2057+17,38) para a análise. O projeto trata o Ramo 2000 como o sentido de fluxo para a cidade de São Paulo (Faixas 1, 2 e 3), enquanto que o Ramo 1000 faz o sentido inverso (Faixas 4, 5 e 6). A faixa 3 do Ramo 2000 e a faixa 4 do Ramo 1000, serão as futuras faixas exclusivas para ônibus, o esquema de tráfego é representado na ilustração da Figura 2 – .



Figura 2 – Traçado da via

Na ilustração da Figura 3, é representado o perfil da pista em análise no presente TCC.

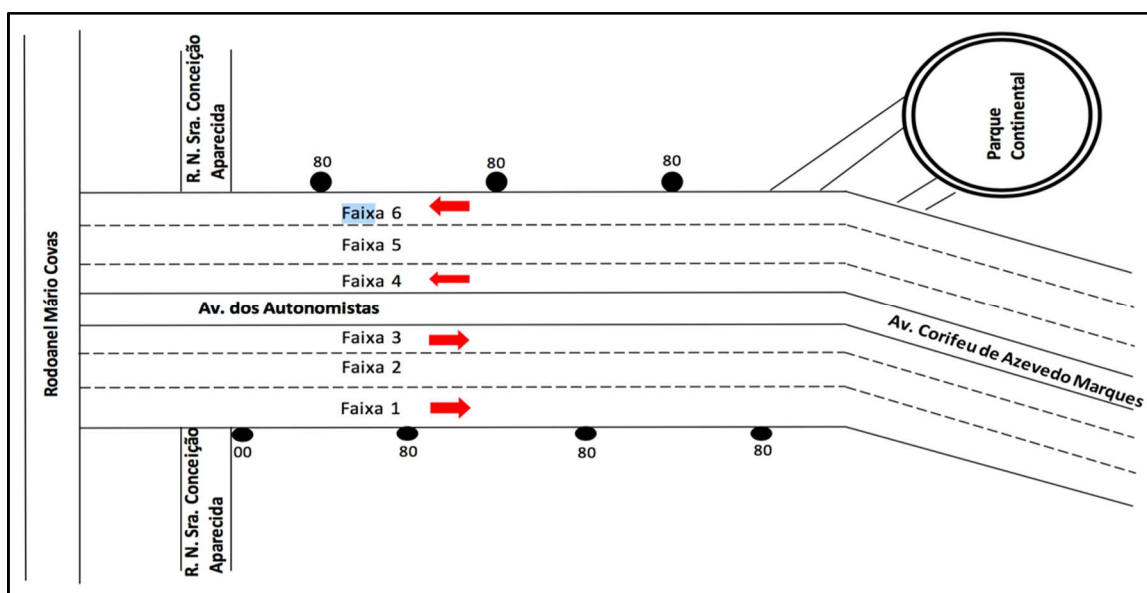


Figura 3 - Representação da pista analisada

Além do dimensionamento do pavimento para o corredor de ônibus, o projeto contempla também a recuperação de pavimentos das Faixas denominadas 1, 2, 5 e 6.

Para critério de utilização de dados ao decorrer do presente estudo de caso, considerou-se as leituras de defleto métricas levantadas nas Faixas 3 e 4 por se tratar do dimensionamento da faixa exclusiva de ônibus, e das Faixas 1 e 6 por serem as mais solicitadas antes da implantação do corredor.

3.1.1. Parâmetros de projeto

De acordo com o projeto analisado, os corredores de ônibus vão ser implantados nas faixas da esquerda em ambos os sentidos (Faixas 3 e 4) da Avenida dos Autonomistas em pavimento asfáltico, sendo substituído por pavimento rígido de concreto somente nas paradas de embarque e desembarque. Nesses segmentos de canaletas exclusivas o pavimento vai ser flexível, cujo revestimento vai ser aplicada mistura asfáltica do tipo SMA¹(Stone Matrix Asphalt).

As faixas destinadas ao tráfego comum vão ser reconstruídas em segmentos onde o novo alinhamento geométrico exigir. Nos restantes, em que teoricamente seria possível aproveitar o pavimento existente, foi realizada uma análise estrutural por meio de levantamentos deflectométricos para avaliar a necessidade de reconstrução ou de reforço do pavimento.

O projeto de engenharia ainda especificou que as camadas constituintes da estrutura do pavimento foram executadas de acordo com as especificações técnicas da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) e na sua inexistência, de acordo com as especificações do DNIT, Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP) e do Desenvolvimento Rodoviário Sociedade Anônima de São Paulo (DERSA).

Para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis novos foi adotado o período de projeto de 10 anos. Para os pavimentos rígidos 20 anos.

3.1.2.1 Ensaios Geotécnicos

Para a análise do solo do segmento compreendido no projeto, foram feitas sondagens à trado, sondagens à percussão e abertos poços de inspeção.

As sondagens a percussão foram realizadas nas paradas e nos terminais de ônibus. A profundidade das sondagens nos pontos de parada foi aproximadamente de 15,0 m enquanto que próximo aos terminais a profundidade foi de

¹ Concreto asfáltico tipo SMA é uma mistura executada a quente, em usina, composta por agregado mineral graduado, material de enchimento, fibras de celulose, cimento asfáltico modificado por polímero e, se necessário melhorador adesividade (ET-DE-P00/031, 2007).

aproximadamente 30,0 m.

As sondagens à trado foram executadas apenas nos passeios seguindo uma frequência de um ensaio a cada 200,0 m, utilizando o estaqueamento como referência, estas foram realizadas com profundidade de até 2,0 m. A partir das amostras, foram realizados ensaios para a determinação do ICS/CBR, grau de compactação e granulometrias por peneiramento e sedimentação. Vale ressaltar que não foi observada a presença de água em nenhuma seção do segmento analisado.

Os poços de inspeção foram realizados a cada 400,0 m sendo no pavimento e a 1,0 m da sarjeta, vale ressaltar que todas as aberturas foram realizadas no Ramo 2000, desta forma utilizou-se dos mesmos dados para o Ramo 1000. A profundidade nos pontos de inspeção também foi de aproximadamente 2,0m, com os quais também foram determinados os valores dos ensaios dos índices físicos (limites de liquidez e plasticidade), ISC/CBR com energia do Proctor Normal, expansão, compactação, granulometria por peneiramento e umidade natural.

A partir dos dados coletados em campo e em laboratório. A planilha da Tabela 1 mostra os resultados das sondagens a trado e a Tabela 2 mostra os resultados dos poços de inspeção.

Tabela 1 - Resultados dos Ensaios em Amostras das Sondagens a Trado

SONDAGEM		LOCALIZAÇÃO		CONDIÇÕES NATURAIS				LABORATÓRIO											CLASSIFICAÇÃO	
FURO AMOST.	PROFUNDIDADE	ESTACA	POSICÃO	δ nat. (g/cm ³)	h.nat. %	CBR INDEF. %	ENERGIA	COMPACT.(PN)		C.B.R.	EXPANS.	GRANULOMETRIA (%)				L L %	L P %	I P %	CLASSIF. HRB	
								δ MAX. g/cm ³	hot. %	Moldado %	%	# 4	# 10	# 40	# 200	%	%	%		
ST-01	0,05-2,00	-	-	-	14,6	-	P.N.	1.843	11,9	15,0	0,2	97,9	93,6	80,3	31,2	32,2	20,6	11,6	A 2 - 6	0
ST-02	0,05-2,00	-	-	-	14,1	-	P.N.	1.881	11,2	16,0	0,1	93,0	85,4	66,8	32,2	33,5	21,1	12,4	A 2 - 6	0
ST-03	0,10-2,00	-	-	-	15,3	-	P.N.	1.865	12,0	14,0	0,2	95,8	91,2	76,8	27,9	34,0	21,3	12,7	A 2 - 6	0
ST-04	0,10-2,00	-	-	-	19,3	-	P.N.	1.689	15,7	15,0	0,1	99,2	97,5	80,2	46,9	38,5	26,1	12,4	A - 6	3
ST-05	0,10-2,00	-	-	-	18,7	-	P.N.	1.578	17,8	13,0	0,3	100,0	99,1	86,4	51,6	39,4	27,0	12,4	A - 6	4
ST-06	0,05-2,00	-	-	-	14,0	-	P.N.	1.844	11,8	16,0	0,1	96,6	91,8	76,9	21,6	-	-	N.P.	A 2 - 6	0
ST-07	0,05-2,00	-	-	-	14,6	-	P.N.	1.827	12,3	18,0	0,1	97,9	92,4	75,3	20,4	-	-	N.P.	A 2 - 6	0
ST-08	0,10-2,00	-	-	-	16,0	-	P.N.	1.803	13,1	15,0	0,1	91,9	89,1	76,5	29,2	34,0	22,3	11,7	A 2 - 6	0
ST-09	0,10-2,00	-	-	-	15,7	-	P.N.	1.793	13,6	13,0	0,2	98,2	95,7	76,3	33,2	35,1	22,9	12,2	A 2 - 6	0
ST-10	0,05-2,00	-	-	-	18,3	-	P.N.	1.719	16,4	15,0	0,2	98,8	96,3	79,5	38,5	39,3	26,1	13,2	A - 6	2
ST-11	0,10-2,00	-	-	-	16,6	-	P.N.	1.784	13,7	15,0	0,3	100,0	97,5	85,0	32,8	36,0	23,4	12,6	A 2 - 6	0
ST-12	0,05-2,00	-	-	-	17,1	-	P.N.	1.776	13,8	16,0	0,1	97,8	94,4	83,9	32,8	36,7	24,1	12,6	A 2 - 6	0
ST-13	0,10-2,00	-	-	-	16,5	-	P.N.	1.812	13,3	14,0	0,1	93,0	84,8	74,4	29,5	35,1	22,7	12,4	A 2 - 6	0
ST-14	0,05-2,00	-	-	-	14,6	-	P.N.	1.801	12,9	15,0	0,0	100,0	99,3	86,1	32,2	-	-	N.P.	A 2 - 6	0
ST-15	0,05-2,00	-	-	-	14,1	-	P.N.	1.852	11,6	18,0	0,3	93,8	87,3	78,0	24,7	-	-	N.P.	A 2 - 6	0
ST-16	0,05-2,00	-	-	-	15,0	-	P.N.	1.818	13,5	16,0	0,2	99,3	97,5	83,0	34,6	35,1	23,0	12,1	A 2 - 6	0
ST-17	0,10-2,00	-	-	-	14,8	-	P.N.	1.838	13,2	16,0	0,2	99,2	98,3	87,1	25,2	-	-	N.P.	A 2 - 6	0
ST-18	0,10-2,00	-	-	-	15,1	-	P.N.	1.814	13,5	15,0	0,0	98,4	96,1	84,4	32,8	36,0	23,3	12,7	A 2 - 6	0
ST-19	0,10-2,00	-	-	-	13,6	-	P.N.	1.851	11,0	17,0	0,2	98,6	96,7	82,0	28,9	32,8	20,4	12,4	A 2 - 6	0
ST-20	0,10-2,00	-	-	-	15,7	-	P.N.	1.851	14,1	16,0	0,1	100,0	98,4	82,9	31,6	35,0	22,8	12,2	A 2 - 6	0
ST-21	0,10-2,00	-	-	-	16,0	-	P.N.	1.809	13,6	15,0	0,0	90,9	88,2	75,4	33,8	36,0	23,3	12,7	A 2 - 6	0
ST-22	0,10-2,00	-	-	-	15,0	-	P.N.	1.854	12,3	15,0	0,2	100,0	98,7	83,4	33,9	34,2	21,8	12,4	A 2 - 6	0
ST-23	0,10-2,00	-	-	-	16,7	-	P.N.	1.792	14,3	14,0	0,0	98,7	97,8	79,8	40,4	36,6	23,7	12,9	A - 6	2
ST-24	0,10-2,00	-	-	-	18,1	-	P.N.	1.853	15,8	13	0,3	94,9	91,6	80,3	37,2	37,7	25,1	12,6	A - 6	2
ST-25	0,10-2,00	-	-	-	17,3	-	P.N.	1.763	14,7	14,0	0,3	100,0	99,3	84,2	41,0	36,9	24,3	12,6	A - 6	2
ST-26	0,10-2,00	-	-	-	16,8	-	P.N.	1.770	14,5	15,0	0,3	100,0	96,8	82,4	40,5	36,4	23,6	12,8	A - 6	2
ST-27	0,10-2,00	-	-	-	15,5	-	P.N.	1.816	12,0	14,0	0,2	98,8	95,9	80,4	32,8	33,3	21,1	12,2	A 2 - 6	0
ST-28	0,10-2,00	-	-	-	16,0	-	P.N.	1.827	13,3	13,0	0,4	99,2	97,3	82,7	32,4	35,3	22,6	12,7	A 2 - 6	0
ST-29	0,10-2,00	-	-	-	14,1	-	P.N.	1.823	12,2	13,0	0,2	100,0	98,5	83,2	33,7	34,2	21,9	12,3	A 2 - 6	0
ST-30	0,10-2,00	-	-	-	14,8	-	P.N.	1.813	13,3	14,0	0,2	100,0	97,9	83,3	32,1	35,0	22,6	12,4	A 2 - 6	0

Tabela 2 - Resultados dos Ensaios em Amostras dos Poços de Inspeção

SONDAGEM		LOCALIZAÇÃO		CONDIÇÕES NATURAIS				LABORATÓRIO											CLASSIFICAÇÃO	
FURO AMOST.	PROFUNDIDADE	ESTACA	POSICÃO	δ nat. (g/cm ³)	h.nat. %	CBR INDEF. %	ENERGIA	COMPACT.(PN)		C.B.R.	EXPANS.	GRANULOMETRIA (%)				L L %	L P %	I P %	CLASSIF. HRB	
								δ MAX. g/cm ³	hot. %	Moldado %	%	# 4	# 10	# 40	# 200	%	%	%		
PI-01	0,32-2,00	-	-	-	13,0	-	P.N.	1.823	11,8	15,0	0,2	100,0	99,2	83,8	30,3	34,0	21,7	12,3	A 2 - 6	0
PI-02	0,34-2,00	-	-	-	14,3	-	P.N.	1.837	13,5	15,0	0,1	100,0	100,0	86,5	33,2	36,8	23,1	13,7	A 2 - 6	0
PI-03	0,33-2,00	-	-	-	14,1	-	P.N.	1.838	12,4	14,0	0,1	98,8	96,1	81,5	32,8	36,6	23,7	12,9	A 2 - 6	0
PI-04	0,30-2,00	-	-	-	15,6	-	P.N.	1.761	14,9	15,0	0,1	100,0	98,5	83,8	41,6	37,4	23,6	13,8	A - 6	2
PI-05	0,30-2,00	-	-	-	14,6	-	P.N.	1.845	12,9	16,0	0,1	99,0	93,0	71,4	30,7	36,0	22,8	13,2	A 2 - 6	0
PI-06	0,32-2,00	-	-	-	13,9	-	P.N.	1.850	12,4	15,0	0,2	99,3	98,4	86,3	32,3	35,7	23	12,7	A 2 - 6	0
PI-07	0,34-2,00	-	-	-	16,7	-	P.N.	1.760	15,1	10,0	0,7	94,6	89,6	78,6	42,4	31,7	23,8	7,9	A - 4	2
PI-08	0,34-2,00	-	-	-	17,4	-	P.N.	1.692	15,9	15,0	0,2	100,0	100,0	92,9	48,4	38,8	25,1	13,7	A - 6	4
PI-09	0,36-2,00	-	-	-	15,1	-	P.N.	1.828	13,5	14,0	0,2	100,0	100,0	86,5	33,1	36,7	23,2	13,5	A 2 - 6	0
PI-10	0,33-2,00	-	-	-	14,3	-	P.N.	1.839	12,9	14,0	0,0	98,8	96,5	82,6	31,2	36,4	22,7	13,7	A 2 - 6	0
PI-11	0,31-2,00	-	-	-	13,3	-	P.N.	1.829	12,6	14,0	0,2	99,1	95,8	82,4	30,1	34,2	21,6	12,6	A 2 - 6	0
PI-13	0,33-2,00	-	-	-	15,5	-	P.N.	1.714	14,8	13,0	0,1	100,0	98,1	81,0	40,5	36,6	24,1	12,5	A - 6	2
PI-14	0,32-2,00	-	-	-	13,8	-	P.N.	1.841	13,0	14,0	0,2	99,3	97,7	83,3	31,8	35,5	22,6	12,4	A 2 - 6	0
PI-15	0,33-2,00	-	-	-	14,1	-	P.N.	1.829	12,3	15,0	0,2	100,0	98,7	84,7	32,9	33,8	21,5	12,3	A 2 - 6	0

Observando-se os resultados dos ensaios verificou-se que a capacidade do subleito é definida por valores de CBR que variam entre 13,0% a 19,0% e valores

de expansão variando entre 0,0% e 0,4%. Estando o subleito em ótimas condições de resistência.

Seguindo a norma da PMSP/SIURB IP-01, o projeto procedeu conforme Equação 1 - Cálculo do CBR Estatístico.

$$CBR_p = CBR_M - \frac{S \times t_{0,90}}{\sqrt{n}}$$

Onde: $CBR_M = \sum \frac{CBR_i}{n}$ e $S = \sqrt{\frac{\sum (CBR_i - CBR_M)^2}{n-1}}$

Equação 1 - Cálculo do CBR Estatístico

Assim foi obtida a Tabela 3. Tabela 3 - Cálculo do CBR Estatístico

Tabela 3 - Cálculo do CBR Estatístico

CBR ESTATÍSTICO					
CBR	F	CBR x F	CBR - CBR _M	(CBR - CBR _M) ²	F x (CBR - CBR _M) ²
10	1	10	-4,65	21,65	21,65
13	6	78	-1,65	2,73	16,40
14	12	168	-0,65	0,43	5,12
15	21	315	0,35	0,12	2,53
16	7	112	1,35	1,81	12,70
17	1	17	2,35	5,51	5,51
18	1	18	3,35	11,20	11,20
	49	718			75,10

CBR _M (%)	14,65306
S	1,25
n	49,00
n-1	48
t _{0,90}	1,3
CBR _P (%)	14,4

Assim, chegou-se ao CBR estatístico de 14,4%. No entanto, por fins de

segurança do dimensionamento o projetista optou por adotar o CBR de 10,0%.

Além da análise do subleito, os poços de inspeção também foram usados para a investigação da estrutura do pavimento. Com isso constatou-se que a camada de CBUQ varia entre 10 e 13cm e está apoiada em uma camada de aproximadamente 20 cm de Brita Graduada Simples (BGS) conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos Poços de Inspeção – Espessuras das Camadas

PI	C.B.U.Q.	B.G.S.	ESPESSURA TOTAL (cm)
1	11,0	21,0	32,0
2	12,5	22,0	34,5
3	11,5	22,0	33,5
4	10,0	20,0	30,0
5	10,5	20,0	30,5
6	11,0	21,0	32,0
7	12,0	22,0	34,0
8	11,0	23,0	34,0
9	13,0	23,0	36,0
10	11,0	22,0	33,0
11	10,5	21,0	31,5
12	NÃO EXECUTADO DEVIDO A EXISTENCIA DE PLACA DE CONCRETO AO LONGO DA VIA		
13	12,0	21,0	33,0
14	11,0	21,0	32,0
15	11,0	22,0	33,0

3.1.2.2 Estudo de Tráfego

O estudo e as definições dos parâmetros do tráfego no trecho estudado foi baseado na norma IP-02/2004 da Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras de São Paulo (SIURB).

A Avenida dos Autonomistas, é uma importante avenida localizada na região Oeste de São Paulo. Ela faz a ligação de municípios como Osasco, Carapicuíba, Barueri, Jandira, e Itapevi com São Paulo.

Assim, esta via além de possuir o fluxo próprio da cidade, recebe também veículos de passagem. Atualmente o número de veículos pesados (com exceção de ônibus) é de 1000 veículos/dia.

De acordo com a norma da SIURB, a carga de tráfego (número N) para todo período de projeto é apresentada na seguinte equação:

$$N = \sum_{n=1}^{10} V_0 \times 365 \times e \times (1 + t)^2$$

sendo:

V_0 - Volume Inicial (veículo/dia);

e - Equivalência por eixo; e

t - taxa de crescimento

Para a taxa de crescimento utilizou-se 4% ao ano. Enquanto que o fator de equivalência adotado foi de 2,30 conforme apresentado na Tabela 5, da norma IP-02/2004.

Tabela 5 - Fatores de Equivalência Conforme Utilização da Via da SIURB

VALORES FINAIS ADOTADOS	Equivalências
(I) Vias Urbanas Típicas	e = 1,50
(II) Vias Urbanas com Indústrias e depósitos	e = 2,30
(III) Vias com Ligação às Rodovias Marginais	e = 5,90

portanto:

$$N = 1,01 \times 10^7$$

Devido à localização da Avenida dos Autonomistas ser próxima a Rodovia SP-021 (Mario Covas) e SP-280 (Castelo Branco) ela está sujeita a tráfegos eventuais de caminhões e carretas com mais de 3 eixos. Diante disso o projetista considerou o fator de equivalência de 2,3 não era o mais adequado para o contexto. Contudo, o valor subsequente, de 5,90 é considerado exagerado. Assim o projetista optou por majorar o resultado no número N em 50%.

$$N_{USACE} = 1,50 \times 10^7$$

O valor final acima adotado foi utilizado para a análise e intervenção das faixas 1 e 2 no sentido Leste (São Paulo) e nas faixas 5 e 6 do sentido Oeste (Carapicuíba). As faixas centrais da avenida serão exclusivas para ônibus. Para tanto, foi adotado outro estudo de tráfego.

Os estudos de demanda levaram em consideração a quantidade de passageiros e a distribuição das linhas do sistema de transporte coletivo.

A Tabela 6 apresenta os fluxos de ônibus no ano de abertura do corredor. Estes foram organizados pelas paradas previstas de embarque e desembarque.

Tabela 6 - Fluxo de Ônibus No Ano de Abertura do Corredor

Sistema	Ônibus dia útil por trecho										
	Parada União	Parada Teatro Municipal	Parada Dona Primitiva Vianco	Parada Antônio Agu	Parada Avenida Liberdade	Parada Praça	Parada Comandante Sampaio	Parada Anunciata de Luda	Parada Quitaúna	Parada General Florêncio	Terminal Km 21
	Terminal Vila Yara	Parada União	Parada Teatro Municipal	Parada Dona Primitiva Vianco	Parada Antônio Agu	Parada Avenida Liberdade	Parada Praça	Parada Comandante Sampaio	Parada Anunciata de Lucia	Parada Quitaúna	Parada General Florêncio
Municipal de Osasco (Comum)	1.230	1.162	1.331	1.187	575	751	920	712	249	98	98
EMTU (Padron)	1.884	1.884	1.858	1.421	1.367	1.669	1.692	1.793	1.793	1.793	1.793
TOTAL	3.114	3.046	3.189	2.608	1.942	2.420	2.612	2.505	2.042	1.891	1.891

Com relação à taxa de crescimento utilizada para o fluxo de ônibus, levou-se em consideração o fato da faixa ser exclusiva e o crescimento do fluxo estar atrelado à demanda de passageiros. Assim, portanto, utilizando a mesma fórmula, temos o número N abaixo.

$$N_{USACE} = 3,50 \times 10^7$$

3.1.2.3 *Análise da Condição Superficial e Estrutural do Pavimento Existente*

Para prever as soluções de intervenção no pavimento existente, foram realizados levantamentos de campo no intuito de verificar o seu estado estrutural e de superfície. Para tanto, foi realizado o levantamento deflectométrico através do equipamento FWD, normatizado pelo procedimento DNER PRO-273/96.

3.1.2.4 *Avaliação Objetiva de Superfície*

Este levantamento teve o objetivo de determinar as condições superficiais do pavimento através dos critérios estabelecidos pelo procedimento DNIT 006/2003 - PRO.

A partir do tipo, quantidade e severidade dos defeitos cadastrados, procedeu-se o cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG), que é um parâmetro de saída para avaliar a condição superficial do pavimento.

O cadastro foi feito separadamente para as 3 faixas de tráfego em cada sentido da avenida. De modo a facilitar o processo, as estações foram espaçadas de 50 em 50 m, utilizando como referência o estaqueamento do projeto geométrico.

A seguir estão listados os tipos de defeitos bem como suas siglas:

- Trincas isoladas (FI, TTC, TLC, TTL, TLL, TRR);
- Trincas interligadas tipo jacaré (TJ, TE);
- Trincas interligadas tipo bloco (TB, TBE).
- Panelas (P)
- Afundamento: Afundamento plástico e de trilhas de roda (ATC, ATL, APL, ALC);
- Ondulações: Ondulações e/ou corrugações (O).
- Escorregamento do revestimento betuminoso (E);
- Exsudação (EX);

- Desgaste (D);
- Remendos (R); e
- Medidas das flechas nas trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE).

De um modo geral, o estado atual do pavimento na Avenida dos Autonomistas apresentou quantidade reduzida de defeitos severos como panelas e afundamentos plásticos de grande magnitude. Os defeitos mais frequentes são trincas isoladas, trincas interligadas (blocos ou jacarés) nas áreas de paradas de ônibus e desgaste do revestimento. As Fotos de 1 a 6 ilustram o levantamento de defeitos realizados no local.



Foto 1 - Trecho inicial próximo ao cruzamento com a Rua General Florêncio, com alguns remendos e desgaste do revestimento



Foto 2 - Trincas interligadas tipo couro de jacaré, próximo à estaca 1.023+0,00

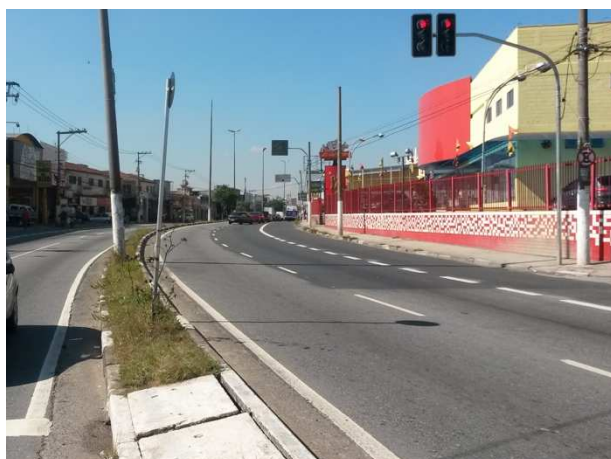


Foto 3 - Trecho próximo à estação Quitaúna - pavimento em bom estado e recapeamento recente



Foto 4 - Pavimento em bom estado e recapeamento recente nas 2 faixas da direita - próximo à estaca 1.065+0,00



Foto 5 - Trincas isoladas e trinca proveniente de junta de construção na divisão de faixas - próximo à estação Comandante Sampaio



Foto 6 - Remendos e afundamentos plásticos na atual faixa de ônibus - próximo à estaca 1.146+0,00

O método DNIT PRO-006/2003 visa a obtenção do Índice de Gravidade Global (IGG), que define o estado do pavimento em termos de quantidade e severidade dos defeitos existentes na superfície do pavimento, conforme é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Conceitos de Degradação do Pavimento Conforme Valores de IGG

Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < \text{IGG} \leq 20$
Bom	$20 < \text{IGG} \leq 40$
Regular	$40 < \text{IGG} \leq 80$
Ruim	$80 < \text{IGG} \leq 160$
Péssimo	$\text{IGG} > 160$

O formulário utilizado para levantamento dos defeitos pode ser consultado no Anexo 1- Formulários do Levantamento de Defeitos dos Pavimentos seguintes formulários

INVENTÁRIO DO ESTADO DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO																									
RODOVIA:		Av. dos Autonomistas - Faixa 4																							
TRECHO:		São Paulo - Itapevi										AVALIADOR:													
Estaca	Faixa	S. T.	OK	FC-1						FC-2		FC-3		PLASTICO		CONSOLID		O	P	E	EX	D	R	Flecha	
				FI	TTC	TTL	TLC	TLL	TRR	J	TB	JE	TBE	ALP	ATP	ALC	ATC							mm	
				(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)	(3)	(3)	(4)	(4)	(4)	(4)	(5)	(5)	(5)	(6)	(7)	(8)	TRI	TRE
1.001	E	1		X		X					X					X								0	0
1003+10	E	2	X																					0	0
1006	E	3																				X		0	0
1008+10	E	4						X														X		0	0
1011	E	5																			X			0	0
1013+10	E	6											X								X	X		0	0
1016	E	7	X																					0	0
1018+10	E	8			X	X																X		0	0
1021	E	9			X		X	X																0	0
1023+10	E	10			X		X																	0	2
1026	E	11			X	X	X																	0	0
1028+10	E	12		X																				0	0
1031	E	13			X			X																0	0
1033+10	E	14			X			X																0	0
1036	E	15		X																				0	0
1038+10	E	16		X																				0	0
1041	E	17		X	X																			0	0
1043+10	E	18		X	X																			0	0
1046	E	19			X		X																	0	0
1048+10	E	20			X			X														X		0	0
1051	E	21	X																					0	0
1053+10	E	22	X																					0	0
1056	E	23		X																				0	0
1058+10	E	24		X																				0	0
1061	E	25	X																					0	0
1063+10	E	26	X																					0	0
1066	E	27		X																				0	0
1068+10	E	28	X																					0	0
1071	E	29	X																					0	0
1073+10	E	30			X		X			X												X		0	0
1076	E	31			X			X		X											X	X		0	0
1078+10	E	32			X		X				X													0	0
1081	E	33	X																					0	0
1083+10	E	34				X										X						X		0	0
1086	E	35			X	X				X	X					X						X		0	0
1088+10	E	36			X			X		X											X			0	0
1091	E	37		X			X																	0	0
1093+10	E	38			X		X	X		X														0	0
1096	E	39			X		X	X			X													0	0
1098+10	E	40			X		X	X																0	0
1101	E	41			X			X													X			0	0
1103+10	E	42		X																				0	0
1106	E	43		X																				0	0
1108+10	E	44			X		X										X							0	3
1111	E	45						X									X				X			0	3

Anexo 1 deste trabalho.

Após o levantamento dos defeitos o cálculo do IGG é feito levando em consideração os trechos homogêneos definidos através dos dados de deflexão, para tanto utilizou-se o formulário da Tabela 8 para a faixa 1 do ramo 2000 .

Ramo 2000 — Faixa 1

Tabela 8 - Modelo do Cálculo do IGG

PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL (IGG)							
PROJETO: Corredor Itapevi-São Paulo						DATA:	FOLHA:
DESCRIÇÃO: Av. dos Autonomistas (Ramo 2000 - Faixa 1)						ESTACA	ESTACA
ESTACAS Est. 2000+0,00 à Est. 2008+10,0						2000+0,00	2008+10,0
ITEM	NATUREZA DE DEFEITO	FREQUÊNCIA ABSOLUTA	FREQ. ABS. CONSIDERADA	FREQUÊNCIA RELATIVA	FATOR DE PONDERAÇÃO	IGI	OBS.:
1	FISSURAS E TRINÇAS ISOLADAS (FI, TTC, TTL, TLC, TLL E TRR)	3	3	75	0,2	15,0	
2	FC-2 (J E TB)	4	4	100	0,5	50,0	
3	FC-3 (JE E TBE)	3	3	75	0,8	60,0	
4	ALP, ATP, ALC E ATC	3		75	0,9	67,5	
5	O E P	0		0	1,0	0,0	
6	EX	0		0	0,5	0,0	
7	D	2		50	0,3	15,0	
8	R	2		50	0,6	30,0	
9	Média aritmética dos valores medidos das flechas medidas em mm nas TRI e TER	2,00	1,75	1,88	1,3	2,5	
10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em ambas as trilhas	4,00	2,36	3,18	1,0	3,2	
Nº TOTAL DE ESTAÇÕES n = 4						Σ ÍNDICE DE GRAVIDADE INDIVIDUAL = IGG	
						243,2	PÉSSIMO

O levantamento deflectométrico tem como objetivo verificar as condições estruturais do pavimento através das respostas da estrutura à aplicação do eixo padrão, realizado pelo FWD.

O ensaio ocorreu na faixa da esquerda e da direita em ambos os sentidos, num intervalo de 80m em cada faixa, conforme ilustração da Figura 4.

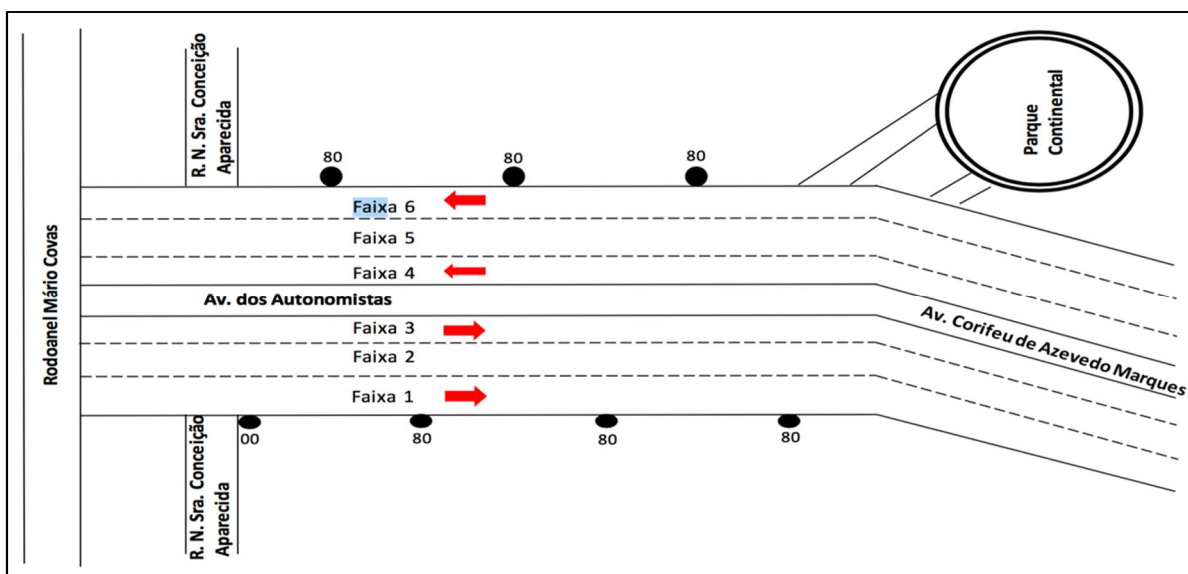


Figura 4 - Croqui esquemático da realização do ensaio com o FWD

Devido à variada característica estrutural e da superfície ao longo de toda a extensão, optou-se por uma divisão em segmentos que apresentassem comportamento estrutural relativamente homogêneo, em termos de variação de deflexão. Esta divisão é feita seguindo o método da AASHTO (1993), tendo em vista que a deflexão possibilita uma avaliação do comportamento estrutural do pavimento, tanto os dados quanto o agrupamento de trechos homogêneos são importantes para que se faça uma proposta de recuperação e reforço do pavimento.

O método utilizado para a segmentação dos trechos homogêneos utiliza um processo gráfico levando em consideração a magnitude das deflexões.

Segmentação Faixas 1 e 2

SEGMENTO	INICIO	FIM	EXTENSÃO (m)	D ₀ médio (0,01 mm)
1	2000+0,00	2008+10,0	240	52,63
2	2008+10,0	2026+0,00	320	48,88
3	2026+0,00	2048+10,0	480	38,88
4	2048+10,0	2068+10,0	400	23,14

Segmentação Faixa 4

SEGMENTO	INICIO	FIM	EXTENSÃO (m)	D ₀ médio (0,01 mm)
1	1000+0,00	1018+10,0	400	33,68
2	1018+10,0	1031+0,00	240	19,30
3	1031+0,00	1048+10,0	400	37,03
4	1048+10,0	1073+10,0	480	14,63

Segmentação Faixa 3

SEGMENTO	INICIO	FIM	EXTENSÃO (m)	D ₀ médio (0,01 mm)
1	2000+0,00	2021+0,00	480	39,40
2	2021+0,00	2036+0,00	320	22,13
3	2036+0,00	2048+10,0	240	29,80
4	2048+10,0	2073+10,0	480	18,65

Segmentação Faixas 5 e 6

SEGMENTO	INICIO	FIM	EXTENSÃO (m)	D ₀ médio (0,01 mm)
1	1000+0,00	1021+0,00	480	38,48
2	1021+0,00	1036+0,00	320	40,38
3	1036+0,00	1056+0,00	400	58,20
4	1056+0,00	1073+10,0	320	21,20

3.1.2.5 Correlação entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FDW

Segundo estudo realizado por BORGES (2001), há necessidade de se converter valores de deflexão medidos com o equipamento FWD em relação a medição da Viga Benkelman.

Em suas considerações, Borges (2001) avalia que a correlação entre os dados obtidos de viga e FDW é diferente para cada estrutura de pavimento, sendo em sua maioria, as deflexões obtidas com a Viga Benkelman superiores as do FWD, porém há exceções.

3.1.2 Dimensionamento do Reforço

Para o dimensionamento do reforço estrutural o projeto seguiu os procedimentos DNER - PRO 11/79 e DNER - PRO 269/94.

3.1.3 Método DNER- PRO 11/79

Os procedimentos preconizados por esta norma foram desenvolvidos baseados no critério de deformabilidade dos pavimentos flexíveis, expressos na prática pela medida de deflexões recuperáveis, uma vez que a experiência tem demonstrado que existe uma correlação entre a magnitude das deflexões (e do raio de curvatura correspondente) e o aparecimento de patologias e defeitos nos pavimentos flexíveis.

A análise considera o comportamento de um pavimento bem construído, que ao longo de sua vida é solicitado não só pelo tráfego, que o submete a esforços diversos de compressão, cisalhamento e flexão, como também pelos fatores climáticos, como precipitações pluviométricas e variações de temperatura, resultando na fadiga de toda a estrutura.

Deve-se conhecer os seguintes parâmetros, que são definidos para cada segmento homogêneo:

- Deflexão admissível;

- Deflexão de projeto;
- Raio de curvatura; e
- Número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão.

A Deflexão Admissível (D_{adm}) é calculada com base no número de solicitações previsto para o período de projeto (no caso 10 anos), de acordo com a seguinte equação.

$$\text{Log } D_{adm} = 3,01 - 0,176 \cdot \text{Log } N \quad (\text{Equação 6})$$

sendo:

D_{adm} - Deflexão admissível (10^{-2} mm); e

N - Número de solicitações do eixo padrão (8,2 tf) para o período de projeto.

A Deflexão Característica (D_c) é calculada através da deflexão média e do desvio padrão dessas deflexões em cada segmento homogêneo, sendo definida como a deflexão média do segmento mais o desvio padrão, considerando um nível de confiabilidade de 85%, conforme a seguinte equação:

$$D_c = D_{média} + \sigma$$

sendo:

D_c - Deflexão característica de projeto (10^{-2} mm);

$D_{média}$ - Média aritmética das deflexões de campo no segmento homogêneo (0,01 mm); e

σ = desvio padrão (10^{-2} mm).

Raio de Curvatura é outro indicador da condição estrutural do pavimento, calculado a partir dos valores das deflexões no ponto de aplicação da carga e a 25,0

cm deste ponto. Para determinação do raio de curvatura, é empregada a seguinte equação:

$$R = 6250 / (2 \cdot (D_0 - D_{25}))$$

sendo:

R - Raio de curvatura (metros);

D₀ - Deflexão no ponto de aplicação da carga (10-2 mm);

D₂₅ - Deflexão na distância de 25cm do ponto de aplicação da carga (10-² mm).

Os critérios para a definição das soluções adotadas na avaliação estrutural estão mostrados na tabela III do procedimento DNER PRO-11/79, representada na Tabela 9 - Critérios para Avaliação Estrutural.

Tabela 9 - Critérios para Avaliação Estrutural

Hipótese	Dados Deflectométricos obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para Cálculo de Reforço	Medidas Corretivas
I	$D_c \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA	NÃO		Apenas correções de superfície
II	$D_c > D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $D_p \leq 3 D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço
		Se $D_p > 3 D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$D_c \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_c > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	—	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas (IGG > 180).	SIM	Resistência	Reconstrução

Nas Tabelas 10 a 13 estão apresentados os resultados da análise da

condição estrutural do pavimento. A última coluna fornece a espessura de reforço calculada para cada segmento homogêneo.

Tabela 10 - Resultados da Análise Estrutural – Faixas 1 e 2

PRO-11/79															
Número "N"	SEGMENTOS HOMOGÊNEOS			RAIO (m)	D _c (0,01mm)	IGG	F _s	D _p (0,01mm)	D _{adm} (0,01m m)	HIPÓTESE	QUALIDADE ESTRUTURAL	NECESSIDADE DE EST. COMPL.	CRITÉRIO PARA CÁLCULO DE REFORÇO	MEDIDAS CORRETIVAS	HR (cm)
	km início	km fim	Ext. (km)												
1,50E+07	0,000	0,240	0,240	177	65	243	1,2	78	56	II	PÉSSIMA	SIM	Resistência	Reconstrução	-
1,50E+07	0,240	0,560	0,320	275	70	191	1,2	84	56	II	PÉSSIMA	SIM	Resistência	Reconstrução	-
1,50E+07	0,560	1,040	0,480	262	48	122	1,2	58	56	II	REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço	1,0
1,50E+07	1,040	1,440	0,400	500	33	8	1,2	39	56	I	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície	0,0

Tabela 11 - Resultados da Análise Estrutural – Faixa 3

PRO-11/79															
Número "N"	SEGMENTOS HOMOGÊNEOS			RAIO (m)	D _c (0,01m m)	IGG	F _s	D _p (0,01mm)	D _{adm} (0,01m m)	HIPÓTESE	QUALIDADE ESTRUTURAL	NECESSIDADE DE EST. COMPL.	CRITÉRIO PARA CÁLCULO DE REFORÇO	MEDIDAS CORRETIVAS	HR (cm)
	km início	km fim	Ext. (km)												
3,50E+07	0,000	0,400	0,400	268	46	74	1,2	55	48	II	REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço	3,0
3,50E+07	0,400	0,640	0,240	616	21	21	1,2	25	48	I	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície	0,0
3,50E+07	0,640	1,040	0,400	166	45	28	1,2	55	48	II	REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço	3,0
3,50E+07	1,040	1,520	0,480	706	18	19	1,2	22	48	I	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície	0,0

Tabela 12 - Resultados da Análise Estrutural – Faixa 4

PRO-11/79															
Número "N"	SEGMENTOS HOMOGÊNEOS			RAIO (m)	D _c (0,01mm)	IGG	F _s	D _p (0,01mm)	D _{adm} (0,01m m)	HIPÓTESE	QUALIDADE ESTRUTURAL	NECESSIDADE DE EST. COMPL.	CRITÉRIO PARA CÁLCULO DE REFORÇO	MEDIDAS CORRETIVAS	HR (cm)
	km início	km fim	Ext. (km)												
3.50E+07	0,000	0,480	0,480	213	47	62	1,2	56	48	II	REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço	3,0
3.50E+07	0,480	0,800	0,320	484	24	14	1,2	29	48	I	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície	0,0
3.50E+07	0,800	1,040	0,240	377	45	8	1,2	54	48	II	REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço	3,0
3.50E+07	1,040	1,520	0,480	735	25	22	1,2	30	48	I	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície	0,0

Tabela 13 - Resultados da Análise Estrutural – Faixas 5 e 6

PRO-11/79															
Número "N"	SEGMENTOS HOMOGÊNEOS			RAIO (m)	D _c (0,01m m)	IGG	F _s	D _p (0,01mm)	D _{adm} (0,01m m)	HIPÓTESE	QUALIDADE ESTRUTURAL	NECESSIDADE DE EST. COMPL.	CRITÉRIO PARA CÁLCULO DE REFORÇO	MEDIDAS CORRETIVAS	HR (cm)
	km início	km fim	Ext. (km)												
1,50E+07	0,000	0,480	0,480	224	51	137	1,2	61	56	II	REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço	2,0
1,50E+07	0,480	0,800	0,320	285	55	111	1,2	67	56	II	REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço	4,0
1,50E+07	0,800	1,200	0,400	294	76	121	1,2	91	56	II	REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço	9,0
1,50E+07	1,200	1,520	0,320	1111	25	60	1,2	30	56	I	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície	0,0

3.1.4 Método DNER – PRO 269/94

O método DNER PRO-269/94 é baseado nos mesmos princípios do DNER - PRO-11/79, que correlaciona a deflexão recuperável causada pela passagem da

carga de um eixo padrão com a deterioração do pavimento.

Existem algumas diferenças consideráveis entre os dois métodos, nestemétodonão se utiliza o raio de curvatura como parâmetro para definir a necessidade de reconstrução do pavimento, além de utilizar propriedades de resiliência do solo do subleito como variável de entrada na determinação de espessuras de reforço.

A Deflexão Máxima Admissível (D_{adm}) para pavimentos flexíveis, constituídos de revestimento de concreto betuminoso executado sobre base granular o valor da deflexão admissível (D_{adm}) em 0,01 mm é obtido pela seguinte equação:

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \log NP$$

onde:

NP - número de solicitações do eixo simples padrão (8,2 t) para o período de projeto;

A Deflexão Característica (D_c) relaciona a média das deflexões em um segmento homogêneo e o desvio padrão das amostras, foi determinada para cada segmento homogêneo através da seguinte equação:

$$D_c = D_{média} + \sigma$$

Onde:

DC - Deflexão característica de projeto (0,01 mm);

$D_{média}$ - Média aritmética de deflexões de campo (0,01 mm);

σ - Desvio padrão (0,01 mm).

Classificação do Solo Quanto a Resiliência (3ª camada): Os solos de subleito podem ser classificados quanto a sua resiliência através da porcentagem de silte na fração fina do solo (passante da peneira nº 200). Na Tabela 14 estão ilustrados os diferentes tipos de solos em função dos valores de CBR e da porcentagem de silte.

Tabela 14 - Classificação dos Solos Finos Quanto à Resiliência

CBR (%)	S(%)		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Solo tipo I: solos com alto módulo de resiliência;

Solo tipo II: solos com módulo de resiliência intermediário;

Solo tipo III: solos com baixo módulo de resiliência.

$$S = 100 - \frac{P_1}{P_2} \times 100$$

Onde:

S - Porcentagem de silte na fração fina que passa na peneira nº 200 (0,075 mm);

P1 - Porcentagem, em peso, de material cujas partículas tenham diâmetro inferior a 0,005 mm, determinação na curva de distribuição granulométrica;

P2 - porcentagem, em peso, de material cujas partículas tenham diâmetro inferior a 0,075 mm, determinação na curva de distribuição granulométrica.

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados das porcentagens de silte

na fração fina do solo.

Tabela 15 - Resultados das porcentagens de silte na fração fina do solo

Amostra	P1	%	P2	S	Tipo de Solo
	% Passante 0,005	Entre 0,005 e 0,075	% Passante 0,075	% Silte	
PI-01	18,4	6,6	25	26,40	I
PI-02	19,4	7,5	26,9	27,88	I
PI-03	17,8	7,9	25,7	30,74	I
PI-04	23,1	13	36,1	36,01	II
PI-05	18,8	6,2	25	24,80	I
PI-06	16,6	9,7	26,3	36,88	II
PI-07	15,2	19,1	34,3	55,69	II
PI-08	29,1	12,3	41,4	29,71	I
PI-09	17,3	9,6	26,9	35,69	I
PI-10	15,1	9,2	24,3	37,86	I
PI-11	15,4	8,7	24,1	36,10	I
PI-12			0	-	-
PI-13	23,1	11,4	34,5	33,04	I
PI-14	15,7	10,4	26,1	39,85	II
PI-15	18,2	8,1	26,3	30,80	I
PI-16	15,1	9,8	24,9	39,36	II
PI-17	16,7	9,8	26,5	36,98	II
ST-01	17,4	7,7	25,1	30,68	I
ST-02	17,2	8,5	25,7	33,07	I
ST-03	18,3	4,6	22,9	20,09	I
ST-04	29,1	11,2	40,3	27,79	I
ST-05	34,6	9,9	44,5	22,25	I
ST-06	11	6,1	17,1	35,67	II
ST-07	9,6	6,1	15,7	38,85	II
ST-08	18	5,9	23,9	24,69	I
ST-09	19,3	7,9	27,2	29,04	I
ST-10	24	7,9	31,9	24,76	I
ST-11	19,6	8	27,6	28,99	I
ST-12	20,5	6,3	26,8	23,51	I
ST-13	15,6	8,3	23,9	34,73	I
ST-14	10,3	6,6	16,9	39,05	II
ST-15	12,6	6,5	19,1	34,03	I
ST-16	16,5	9,6	26,1	36,78	I
ST-17	13,4	6,5	19,9	32,66	I
ST-18	16,2	11,1	27,3	40,66	II
ST-19	16,3	6,4	22,7	28,19	I
ST-20	16,6	8,1	24,7	32,79	I
ST-21	20,6	7,3	27,9	26,16	I
ST-22	19,8	8,1	27,9	29,03	I
ST-23	24,4	9,7	34,1	28,45	I
ST-24	22,1	8,3	30,4	27,30	I
ST-25	24,8	9,8	34,6	28,32	I
ST-26	23,5	10,47	33,97	30,82	I
ST-27	17,7	9,4	27,1	34,69	I
ST-28	19,5	6,4	25,9	24,71	I
ST-29	18,2	9,7	27,9	34,77	I
ST-30	19,7	6,5	26,2	24,81	I
ST-31	17,4	6,3	23,7	26,58	I
ST-32	18,3	9,8	28,1	34,88	I
ST-33	18,7	7,2	25,9	27,80	I
ST-34	18,4	6,6	25	26,40	I

Observa-se que o solo apresenta granulometria da fração fina praticamente uniforme ao longo de todo o trecho, com classificações em termos de resiliência do tipo I e II. Ao analisar as posições dos furos em relação aos segmentos homogêneos definidos em função da análise estrutural do pavimento, foi calculado o valor médio da porcentagem de silte na fração fina para cada um dos segmentos pré-determinados, resultando sempre em solo Tipo I para realização do dimensionamento.

A Tabela 16 ilustra as constantes relacionadas às características resilientes do subleito.

Tabela 16 - Constantes dos Solos

Tipos de Solos	Constantes	
	I_1	I_2
I	0	0
II	1	0
III	0	1

Para o cálculo da espessura de reforço (HR) deve-se seguir as seguintes etapas:

Estrutura de Referência: definir para cada sub-trecho homogêneo uma estrutura de referência constituída por 3 camadas, com as respectivas espessuras, ou seja:

1ª camada – camada betuminosa	<u>1ª camada</u>	He
2ª camada – camada granular	<u>2ª camada</u>	Hcg
3ª camada – camada de solo	<u>3ª camada</u>	(subleito)
	<u> </u>	

Cálculo da Espessura Efetiva (he_f), considerada no cálculo do reforço, conforme a seguinte equação:

$$hef = - 5,737 + 807,961 / D_c + 0,972 l_1 + 4,101 l_2$$

onde:

l_1 e l_2 - definidos em função da espessura da camada granular (hcg), a saber:

- Para espessuras (hcg) inferiores a 45,0 cm, as constantes l_1 e l_2 dependem do tipo de solo constantes no Quadro IV.
- No caso de espessuras (hcg) superiores a 45,0 cm adotar os valores:
 $l_1 = 0$ e $l_2 = 1$

O método fornece a espessura em concreto asfáltico necessária para que o pavimento após o seu reforço atenda ao número de solicitações previsto em projeto. A espessura necessária é calculada através da seguinte equação:

$$H_R = - 19,015 + 238,14 / \sqrt{D_{adm}} - 1,357 hef + 1,016 l_1 + 3,893 l_2$$

Equação 2 - Espessura da camada de concreto asfáltico em cm

onde:

H_R - espessura da camada de concreto asfáltico em cm;

hef - espessura efetiva em cm;

l_1 e l_2 - constantes relacionadas às características resilientes da 3ª camada da estrutura de referência; e

D_{adm} - deflexão máxima admissível, em 1/100 mm.

Vale ressaltar que no cálculo da espessura (H_R) deve-se observar a seguinte restrição com relação a espessura efetiva (hef).

A espessura (hef) calculada deve estar compreendida entre os intervalos:

$$0 \leq hef \leq he$$

se $hef < 0$, adotar $hef = 0$

se $hef > he$, adotar $hef = he$

Onde:

he = espessura da camada betuminosa existente, em cm.

Nas Tabelas 17 a 20 estão apresentados os resultados do dimensionamento do reforço pelo método PRO-269/94, sendo a segmentação a mesma que foi adotada para o método PRO-11/79.

Tabela 17 - Resultados da Análise Estrutural – Faixas 1 e 2 - Pro-269/94

PRO-269/94									
km inicial	km final	Extensão (km)	Número N	D _p (0,01mm)	D _{adm} (0,01mm)	tipo de solo	h Exist. (cm)	hef (cm)	HR (cm)
0,000	0,240	0,240	1,50E+07	78	63	I	11,0	0,0	11,0
0,240	0,560	0,320	1,50E+07	84	63	I	12,5	0,0	11,0
0,560	1,040	0,480	1,50E+07	58	63	I	11,5	8,3	0,0
1,040	1,440	0,400	1,50E+07	39	63	I	10,0	10,0	0,0

Tabela 18 - Resultados da Análise Estrutural – Faixa 3 - Pro-269/94

PRO-269/94									
km inicial	km final	Extensão (km)	Número N	D _p (0,01mm)	D _{adm} (0,01mm)	tipo de solo	h Exist. (cm)	hef (cm)	HR (cm)
0,000	0,480	0,480	3,50E+07	56	54	I	11,0	8,7	1,7
0,480	0,800	0,320	3,50E+07	29	54	I	12,5	12,5	0,0
0,800	1,040	0,240	3,50E+07	54	54	I	11,5	9,1	1,2
1,040	1,520	0,480	3,50E+07	30	54	I	10,0	10,0	0,0

Tabela 19 - Resultados da Análise Estrutural – Faixa 4 - Pro-269/94

PRO-269/94									
km inicial	km final	Extensão (km)	Número N	D _p (0,01mm)	D _{adm} (0,01mm)	tipo de solo	h Exist. (cm)	hef (cm)	HR (cm)
0,000	0,480	0,480	1,50E+07	61	63	I	11,0	7,4	0,0
0,480	0,800	0,320	1,50E+07	67	63	I	12,5	6,4	2,3
0,800	1,200	0,400	1,50E+07	91	63	I	11,5	3,1	6,8
1,200	1,520	0,320	1,50E+07	30	63	I	10,0	10,0	0,0

Tabela 20 - Resultados da Análise Estrutural – Faixas 5 e 6 - Pro-269/94

PRO-269/94									
km inicial	km final	Extensão (km)	Número N	D _p (0,01mm)	D _{adm} (0,01mm)	tipo de solo	h Exist. (cm)	hef (cm)	HR (cm)
0,000	0,480	0,480	1,50E+07	61	63	I	11,0	7,4	0,0
0,480	0,800	0,320	1,50E+07	67	63	I	12,5	6,4	2,3
0,800	1,200	0,400	1,50E+07	91	63	I	11,5	3,1	6,8
1,200	1,520	0,320	1,50E+07	30	63	I	10,0	10,0	0,0

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Determinação da Vida Útil Através da Retroanálise

Diante do projeto apresentado no capítulo anterior é proposto um cálculo de retroanálise, utilizando os dados levantados para constituir o projeto em questão. O objetivo do cálculo da retroanálise é determinar a vida útil do pavimento partindo do estudo das bacias deflectométricas, passando pelo cálculo das tensões da estrutura até chegar ao cálculo da quantidade de passagens (carga de tráfego) do eixo padrão para as tensões atuantes.

Em uma análise estrutural para dimensionamento do pavimento são obtidas respostas estruturais a partir das características das camadas, o processo de uma retroanálise ocorre a partir das respostas das deformações recuperáveis chegando às características das camadas, fazendo assim uma análise de “trás para frente”.

4.2 Levantamento das Estruturas

Um dos fatores determinantes para a realização da retroanálise são as características das camadas estudadas, como o número de camadas, o material que as compõem e suas espessuras.

Ao longo do trecho analisado foram realizados poços de inspeção conforme citado no capítulo 3. Através desses poços, foi possível identificar a estrutura do pavimento bem como os respectivos materiais. Na Tabela 21 são apresentados os resultados para o ramo 1000 e 2000, caracterizando o material e a espessura encontrados em cada estaca desses segmentos.

Tabela 21 Deflexões do seguimento estudado (Relatório Técnico)

Estaca	Faixa		Estaca	Faixa		FWD	PI	CBUQ (cm)	BGS (cm)
2000	Faixa 1	Faixa 3	1000	Faixa 4	Faixa 6	0	P1	11,00	21,00
2001	Faixa 1	Faixa 3	1001	Faixa 4	Faixa 6	0	P1	11,00	21,00
2002	Faixa 1	Faixa 3	1002	Faixa 4	Faixa 6	0	P1	11,00	21,00
2003	Faixa 1	Faixa 3	1003	Faixa 4	Faixa 6	0	P1	11,00	21,00
2004	Faixa 1	Faixa 3	1004	Faixa 4	Faixa 6	80	P1	11,00	21,00
2005	Faixa 1	Faixa 3	1005	Faixa 4	Faixa 6	80	P1	11,00	21,00
2006	Faixa 1	Faixa 3	1006	Faixa 4	Faixa 6	80	P1	11,00	21,00
2007	Faixa 1	Faixa 3	1007	Faixa 4	Faixa 6	80	P1	11,00	21,00
2008	Faixa 1	Faixa 3	1008	Faixa 4	Faixa 6	160	P1	11,00	21,00
2009	Faixa 1	Faixa 3	1009	Faixa 4	Faixa 6	160	P1	11,00	21,00
2010	Faixa 1	Faixa 3	1010	Faixa 4	Faixa 6	160	P1	11,00	21,00
2011	Faixa 1	Faixa 3	1011	Faixa 4	Faixa 6	160	P1	11,00	21,00
2012	Faixa 1	Faixa 3	1012	Faixa 4	Faixa 6	240	P1	11,00	21,00
2013	Faixa 1	Faixa 3	1013	Faixa 4	Faixa 6	240	P1	11,00	21,00
2014	Faixa 1	Faixa 3	1014	Faixa 4	Faixa 6	240	P1	11,00	21,00
2015	Faixa 1	Faixa 3	1015	Faixa 4	Faixa 6	240	P2	12,50	22,00
2016	Faixa 1	Faixa 3	1016	Faixa 4	Faixa 6	320	P2	12,50	22,00
2017	Faixa 1	Faixa 3	1017	Faixa 4	Faixa 6	320	P2	12,50	22,00
2018	Faixa 1	Faixa 3	1018	Faixa 4	Faixa 6	320	P2	12,50	22,00
2019	Faixa 1	Faixa 3	1019	Faixa 4	Faixa 6	320	P2	12,50	22,00
2020	Faixa 1	Faixa 3	1020	Faixa 4	Faixa 6	400	P2	12,50	22,00
2021	Faixa 1	Faixa 3	1021	Faixa 4	Faixa 6	400	P2	12,50	22,00
2022	Faixa 1	Faixa 3	1022	Faixa 4	Faixa 6	400	P2	12,50	22,00
2023	Faixa 1	Faixa 3	1023	Faixa 4	Faixa 6	400	P2	12,50	22,00
2024	Faixa 1	Faixa 3	1024	Faixa 4	Faixa 6	480	P2	12,50	22,00
2025	Faixa 1	Faixa 3	1025	Faixa 4	Faixa 6	480	P2	12,50	22,00
2026	Faixa 1	Faixa 3	1026	Faixa 4	Faixa 6	480	P2	12,50	22,00
2027	Faixa 1	Faixa 3	1027	Faixa 4	Faixa 6	480	P2	12,50	22,00
2028	Faixa 1	Faixa 3	1028	Faixa 4	Faixa 6	560	P2	12,50	22,00
2029	Faixa 1	Faixa 3	1029	Faixa 4	Faixa 6	560	P2	12,50	22,00
2030	Faixa 1	Faixa 3	1030	Faixa 4	Faixa 6	560	P2	12,50	22,00
2031	Faixa 1	Faixa 3	1031	Faixa 4	Faixa 6	560	P2	12,50	22,00
2032	Faixa 1	Faixa 3	1032	Faixa 4	Faixa 6	640	P2	12,50	22,00
2033	Faixa 1	Faixa 3	1033	Faixa 4	Faixa 6	640	P2	12,50	22,00
2034	Faixa 1	Faixa 3	1034	Faixa 4	Faixa 6	640	P2	12,50	22,00
2035	Faixa 1	Faixa 3	1035	Faixa 4	Faixa 6	640	P2	12,50	22,00

2036	Faixa 1	Faixa 3	1036	Faixa 4	Faixa 6	720	P3	12,50	22,00
2037	Faixa 1	Faixa 3	1037	Faixa 4	Faixa 6	720	P3	11,50	22,00
2038	Faixa 1	Faixa 3	1038	Faixa 4	Faixa 6	720	P3	11,50	22,00
2039	Faixa 1	Faixa 3	1039	Faixa 4	Faixa 6	720	P3	11,50	22,00
2040	Faixa 1	Faixa 3	1040	Faixa 4	Faixa 6	800	P3	11,50	22,00
2041	Faixa 1	Faixa 3	1041	Faixa 4	Faixa 6	800	P3	11,50	22,00
2042	Faixa 1	Faixa 3	1042	Faixa 4	Faixa 6	800	P3	11,50	22,00
2043	Faixa 1	Faixa 3	1043	Faixa 4	Faixa 6	800	P3	11,50	22,00
2044	Faixa 1	Faixa 3	1044	Faixa 4	Faixa 6	880	P3	11,50	22,00
2045	Faixa 1	Faixa 3	1045	Faixa 4	Faixa 6	880	P3	11,50	22,00
2046	Faixa 1	Faixa 3	1046	Faixa 4	Faixa 6	880	P3	11,50	22,00
2047	Faixa 1	Faixa 3	1047	Faixa 4	Faixa 6	880	P3	11,50	22,00
2048	Faixa 1	Faixa 3	1048	Faixa 4	Faixa 6	960	P3	11,50	22,00
2049	Faixa 1	Faixa 3	1049	Faixa 4	Faixa 6	960	P3	11,50	22,00
2050	Faixa 1	Faixa 3	1050	Faixa 4	Faixa 6	960	P3	11,50	22,00
2051	Faixa 1	Faixa 3	1051	Faixa 4	Faixa 6	960	P3	11,50	22,00
2052	Faixa 1	Faixa 3	1052	Faixa 4	Faixa 6	1040	P3	11,50	22,00
2053	Faixa 1	Faixa 3	1053	Faixa 4	Faixa 6	1040	P3	11,50	22,00
2054	Faixa 1	Faixa 3	1054	Faixa 4	Faixa 6	1040	P3	11,50	22,00
2055	Faixa 1	Faixa 3	1055	Faixa 4	Faixa 6	1040	P4	10,00	20,00
2056	Faixa 1	Faixa 3	1056	Faixa 4	Faixa 6	1120	P4	10,00	20,00
2057	Faixa 1	Faixa 3	1057	Faixa 4	Faixa 6	1120	P4	10,00	20,00

4.3 Dados Deflectométricos

Dentre os dados levantados que serviram de base para o projeto de recuperação do pavimento, os resultados das deflexões são os mais importantes, pois estão relacionados à capacidade estrutural do pavimento. Estas deflexões foram levantadas utilizando o deflectômetro de queda de peso comumente conhecido como FWD.

O aparelho, empregado possuía 7 geofones para determinação das bacias de deflexão após a queda do peso que simula a passagem do eixo padrão. A Figura 5 ilustra as distâncias em relação ao ponto de aplicação da carga de impacto no pavimento (cm) a qual ocorreram as leituras pelos sensores.

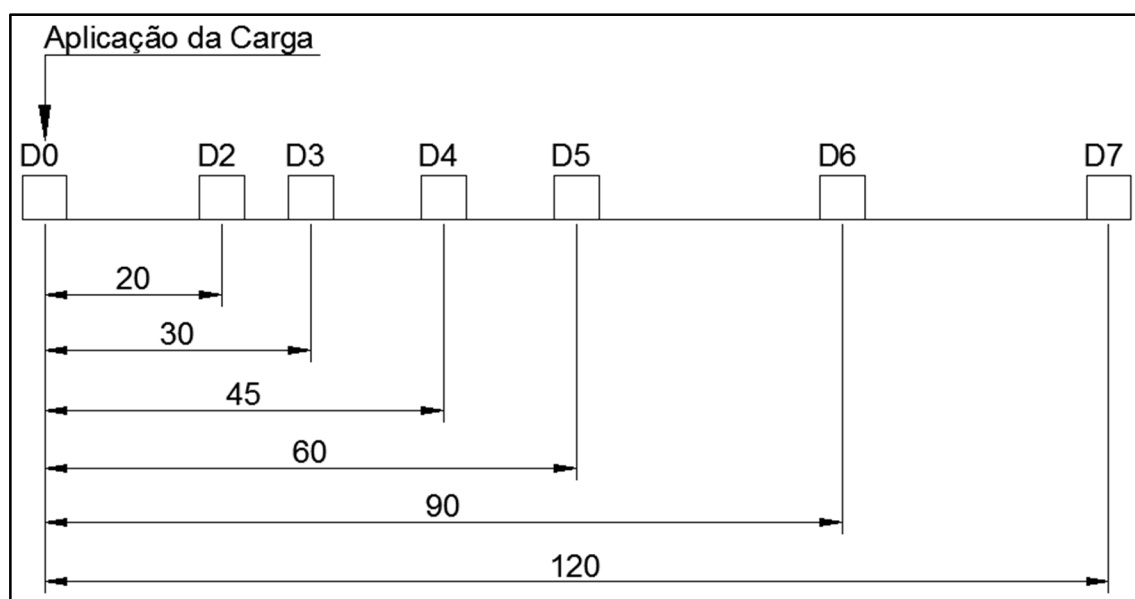


Figura 5 - Espaçamento dos Sensores de Leitura da Deflexão (autor)

A disposição dos geofones tem o objetivo de captar as deformações recuperáveis nas camadas do pavimento ensaiado. Assim, é possível identificar as características de cada camada e seus respectivos materiais.

Os ensaios de deflexão foram realizados nas faixas 1 e 3, sentido Marginal e nas faixas 4 e 6 no sentido Rodoanel, referenciadas como Ramo 2000 e Ramos 1000 respectivamente. Além disso, a frequência adotada para a determinação das deflexões foi a cada 80m. Na Tabela 21 e Tabela 23 são apresentados os valores das deflexões para o ramo 1000, respectivamente para as faixas 4 e 6. E as tabelas 24 e 25 apresentam as deflexões nas faixas 1 e 3 do ramo 2000.

Tabela 22 - Deflexões - Ramo 1000 - Faixa 4

Faixa 4			DEFLEXÃO (1x10 ⁻² mm)							TEMP. (°C)	
Localização	Carga (kgf)	Carga (N)	FWD D0 (0 cm)	FWD D1 (20 cm)	FWD D2 (30 cm)	FWD D3 (45 cm)	FWD D4 (60 cm)	FWD D5 (90 cm)	FWD D6 (120 cm)	Ar	Pav.
0	4.090,00	40.109,20	27,9	21,3	15,9	10,6	7,2	3,6	2	20.6	23.4
80	4.080,00	40.011,13	15,6	13,1	10,6	8,3	6,8	4,4	3	20.5	22.8
160	4.110,00	40.305,33	17,2	14,4	11,8	10	8,6	6,1	4,1	20.5	23.1
240	4.130,00	40.501,46	9,5	7,1	5,4	5	4,6	3,9	3,2	20.2	23.4
320	4.150,00	40.697,60	10,2	9,7	8,9	8,1	7,3	5,4	3,8	20.6	22.4
400	4.120,00	40.403,40	16	12,4	9,2	7,3	5,8	3,5	2,4	20.0	23.5
480	4.120,00	40.403,40	10,5	7,6	5,6	4,5	3,6	2,6	1,9	19.9	23.3
560	4.110,00	40.305,33	14,8	13,5	8,9	7,3	6,3	4,1	2,7	19.9	23.1
640	4.130,00	40.501,46	16,9	14,3	11,9	10,3	8,9	6,1	4,4	20.3	23.6
720	4.100,00	40.207,27	10,4	8,1	5,9	4,7	3,8	2,8	2,1	20.4	22.8
800	4.080,00	40.011,13	23,4	18,6	14,4	10,8	8,2	5	3,1	20.1	22.9
880	4.080,00	40.011,13	18,5	15,6	12,4	10	8,2	5,3	3,6	20.0	23.3
960	4.080,00	40.011,13	21,6	18,7	15,3	12,3	10,1	6,4	4,3	20.2	23.5
1040	4.080,00	40.011,13	17,2	12,6	12,1	10	8,3	5,5	3,6	20.2	23.5
1120	4.080,00	40.011,13	26,9	20,6	18,3	13,9	10,9	6,9	4,6	20.3	23.1

Tabela 23 - Deflexões - Ramo 1000 - Faixa 6

Faixa 6			DEFLEXÃO (1x10 ⁻² mm)								TEMP. (°C)	
Localização	Carga (kgf)	Carga (N)	FWD D0 (0 cm)	FWD D1 (20 cm)	FWD D2 (30 cm)	FWD D3 (45 cm)	FWD D4 (60 cm)	FWD D5 (90 cm)	FWD D6 (120 cm)	Ar	Pav.	
0	4.090,00	40.109,20	50,1	40,3	29,1	21,5	14,8	6,2	2,9	19.8	25.9	
80	4.190,00	41.089,86	15,9	13,2	9,9	8,5	6,9	4,6	3,2	19.8	24.9	
160	4.120,00	40.403,40	32,9	24,1	14,8	8,9	7,2	3,8	2,2	20.1	25.4	
240	4.140,00	40.599,53	10,2	6,2	6,6	7	6,7	6,1	5,1	19.9	24.8	
320	4.130,00	40.501,46	9,3	7,7	6	5,9	5,1	4,4	3,5	19.6	24.6	
400	4.110,00	40.305,33	22,8	21,7	11,7	9,4	6,8	4,4	3,2	19.8	25.3	
480	4.110,00	40.305,33	27,7	21,9	15,1	11,8	8,9	5,8	4,5	20.0	25.8	
560	4.080,00	40.011,13	29,9	16	14,8	9,6	6	3,4	2,4	19.9	25.3	
640	4.110,00	40.305,33	29,5	23,2	18,3	14,4	11,1	7	4,6	20.1	25.1	
720	4.020,00	39.422,73	79,2	64	41,1	29,7	20,6	10,2	5,7	20.1	24.8	
800	4.100,00	40.207,27	22,7	18,4	13,6	11	8,6	5,3	3,5	19.9	25.5	
880	4.080,00	40.011,13	40,3	29,8	21,7	15,6	10,8	6,5	4,4	20.0	25.6	
960	4.130,00	40.501,46	28,4	21,6	16,4	13,1	10,4	6,7	4,4	20.0	26.6	
1040	4.120,00	40.403,40	22,3	19,3	14,9	12,3	9,7	6	4	20.4	24.1	
1120	4.110,00	40.305,33	25,8	19,8	16,3	12,8	10,1	6,3	4,2	20.2	23.5	

Tabela 24 - Deflexões - Ramo 2000 - Faixa 1

Faixa 1			DEFLEXÃO (1×10^{-2} mm)							TEMP. (°C)	
Localização	Carga (kgf)	Carga (N)	FWD D0 (0 cm)	FWD D1 (20 cm)	FWD D2 (30 cm)	FWD D3 (45 cm)	FWD D4 (60 cm)	FWD D5 (90 cm)	FWD D6 (120 cm)	Ar	Pav.
0	4130,00	40501,46	39,9	30,9	23,2	17,8	13,9	9,1	6,7	20,3	28,9
80	4130,00	40501,46	54,2	42,8	31,9	23,5	17,8	10,8	7,2	20,3	28,3
160	4100,00	40207,27	63,8	44,5	36,4	26,4	19,1	9,2	4,6	20,2	27,9
240	4110,00	40305,33	71,6	62,5	51,4	39,4	30,3	18	11,1	20,1	28,1
320	4170,00	40893,73	22,1	20,3	16,9	15	13	8,6	5,6	20,2	29,5
400	4150,00	40697,60	44,1	39,9	31	24	17,7	10,3	7,1	20,0	27,9
480	4090,00	40109,20	57,7	44,5	33,5	20,8	15,2	7,6	5,1	20,0	26,4
560	4160,00	40795,66	32,5	25,4	18,7	13,9	10,3	6,8	4,8	19,8	28,0
640	4120,00	40403,40	33,3	25,8	19,5	14,9	11,8	7,7	5,4	20,0	27,7
720	4140,00	40599,53	37,6	30	22,7	17,4	12,3	8,1	5,4	19,6	27,0
800	4150,00	40697,60	29,7	24,3	18,1	15	12,3	8,5	5,9	19,6	27,8
880	4130,00	40501,46	48,4	41,2	30,4	22,6	15,8	8	5,3	19,6	26,7
960	4130,00	40501,46	51,8	38,6	28,6	20	13,8	7,5	4,5	19,4	27,6
1040	4150,00	40697,60	39,6	32,8	22,7	16,2	11,5	6,1	3,3	19,3	29,1
1120	4150,00	40697,60	18	15,2	12,3	10,5	8,7	5,6	3,6	19,6	27,4

Tabela 25 - Deflexões - Ramo 2000 - Faixa 3

Faixa 3			DEFLEXÃO (1×10^{-2} mm)							TEMP. (°C)	
Localização	Carga (kgf)	Carga (N)	FWD D0 (0 cm)	FWD D1 (20 cm)	FWD D2 (30 cm)	FWD D3 (45 cm)	FWD D4 (60 cm)	FWD D5 (90 cm)	FWD D6 (120 cm)	Ar	Pav.
0	4.090,00	40.109,20	40,3	30,2	23	16,5	12,3	7	4,2	21,1	25,8
80	4.120,00	40.403,40	34,6	26,4	19,9	14,7	10,4	6,1	4,1	21,1	24,9
160	4.120,00	40.403,40	33	23,4	15,8	10,6	7	4,1	3,1	21,2	24,0
240	4.090,00	40.109,20	52,8	36,7	24,3	14,6	8,5	3,8	3,3	21,2	23,8
320	4.120,00	40.403,40	35,1	24,8	16,3	10,1	7	4,8	3,7	21,4	24,4
400	4.120,00	40.403,40	40,6	32,3	23,7	18	12,7	6,1	3,5	21,4	23,8
480	4.120,00	40.403,40	22,6	17,9	13,5	11,1	8,5	5,5	3,8	21,1	24,0
560	4.130,00	40.501,46	24,9	19,7	15	11,4	8,6	5,8	4,3	21,3	23,9
640	4.120,00	40.403,40	19,7	16,9	13,6	11,8	10,2	7,4	5,4	21,3	23,3
720	4.120,00	40.403,40	21,3	16,4	12,4	10,2	8,7	6,3	4,7	20,7	24,2
800	4.120,00	40.403,40	16,8	14,7	12,1	10,4	8,9	6,6	4,8	20,8	23,3
880	4.110,00	40.305,33	47,1	36	28,2	21,6	16,7	10,2	6,4	20,6	24,2
960	4.130,00	40.501,46	25,5	21,2	16,8	13,8	11,5	7,2	4,9	20,1	24,0
1040	4.140,00	40.599,53	21,9	17	12,6	10	7,9	5	3,3	20,6	25,3
1120	4.140,00	40.599,53	12,5	10,9	9,2	9	8,3	6,6	5,1	21,0	24,2

4.4 Tratamento de Dados para Retroanálise

Obtidas as deflexões em campo e tendo o conhecimento das características das camadas, foi empregado o programa EVERCALC 5.0 para a realização do cálculo iterativo de modo que as deflexões calculadas se aproximem das medidas em campo considerando um determinado erro. Com esse processo de retroanálise da estrutural do pavimento foi possível determinar os módulos de resiliência dos materiais para cada camada em função das bacias deflectométricas obtidas.

Os cálculos são realizados de forma iterativa e sucessiva, até que a

diferença entre as bacias teórica e medida seja aceitável. O programa calcula bacias de deflexões teóricas e compara com a bacias de deflexões medidas em campo, ajustando os valores dos módulos das camadas do pavimento por iterações até que a diferença entre as duas sejam consideradas adequadas.

O programa permite utilizar dados de até 7 sensores e de 8 golpes para cada ponto de ensaio com FWD. O número de camadas para análise deve ser limitado em 5.

Os dados de entrada para este processo de retroanálise são a quantidade de camadas do pavimento estudado, a quantidade de sensores utilizadas no ensaio do FWD, as distâncias dos sensores em relação a aplicação da carga, a faixa provável do módulo de resiliência do material em cada camada, o coeficiente de Poisson e a quantidade máxima de iterações para se chegar à bacia deflectométrica calculada.

Na Figura 6 Figura 6 é apresentada a tela com o modelo dos dados de entrada. Vale ressaltar que para os coeficientes de Poisson foram adotados de acordo com os valores mais usuais da literatura, sendo empregado 0,3 na camada de revestimento, 0,35 na base de BGS e 0,45 para o subleito.

General Data Entry - E:\EVERSERS\EVERCALC\VP1.GEN

Title: **EXAMPLE NO. 1 - STIFF LAYER AT 350 MPa**

No of Layers: **3** (Número de camadas)
 No of Sensors: **7** (Número de Sensores)
 Plate Radius (cm): **15.0**

Units: ☒ Metric ☐ US Units
 ☐ Stiff Layer ☒ Temp. Correction
 Temp. Measurement: ☒ Direct Method ☐ Southgate Method
 Seed Moduli: ☐ Internal ☒ User Supplied

Sensor Weigh Factor: ☒ Uniform ☐ Inverse First Sensor ☐ User Supplied

Sensor No: 1 2 3 4 5 6 7
 Radial Offset (cm): **0.0** **20.0** **30.0** **45.0** **60.0** **90.0** **120.0** (Valores Mínimos e Máximos de Módulo de Resiliência)

Layer Information: **Coeficiente de Poisson**
 No: 1 Layer ID: 0 Poisson' Ratio: **0.30** Initial Modulus (MPa): **500.0** Min. Modulus (MPa): **500.0** Max. Modulus (MPa): **4500.0**

Max. Iteration: **100** (Máximo de Iterações)
 RMS Tol. (%): **1.0**
 Modulus Tol. (%): **1.0**

Stress and Strain Location...

Figura 6- Exemplo Evercalc - Tela 1 (Autor)

A segunda entrada de dados é feita utilizando os valores deflectométricos obtidos em campo, as espessuras das camadas do pavimento existente, o local analisado (estaca), temperatura do pavimento, carregamento utilizado e o número de quedas do peso utilizado no ensaio.

Na Figura 7 Figura 6 é possível visualizar a tela com o modelo dos dados de entrada para o processo de retroanálise.

Deflection Data Entry - E:\EVERSERS\EVERCALC\VP1F12000.DEF

Route: **EXAMPLE NO. 2 - STIFF LAYER AT 350 MPA**

Station Information

Estaca Station H(1) (cm) H(2) (cm) No. of Drops Pavement Temp (C)

2000F1 11.00 21.00 1 28.9

Deflection Information

Defleções medidas Sensor Deflection (microns)

Drop No	Load (N)	1	2	3	4	5	6	7
1	40501.46	399.000	309.000	232.000	178.000	139.000	91.000	67.000

Add Station Plot Delete Station

Save Save As Cancel

Figura 7 - Exemplo Evercalc - Tela 2 (Autor)

Inicialmente foram empregados valores de módulo de resiliência usuais de literatura como por exemplos dados da instrução de projeto do DER/SP - IP-DE-P00/001, que estipulaas seguintes faixas de valores de módulo para o revestimento, base e subleito:

- Revestimento: de 1.000 a 35.000 Kgf/cm²
- Base granular: de 1.000 a 3.500 Kgf/cm²
- Subleito: de 500 a 2000kgf/cm²

As faixas de módulo valem para os respectivos materiais na condição de novos. Por não se ter informações sobre os materiais velhos, deteriorados ou oxidados, utilizou-se as referencias de literatura para material novos.

Desta forma,o correu o cálculo para os ramos 1000 e 2000 esperando-se

Tabela 27- Deflexões Calculadas - Ramo 1000 - Faixa 6

Ramo 1000 Faixa 6															
Estacas	1000	1004	1008	1012	1016	1020	1024	1028	1032	1036	1040	1044	1048	1052	1056
Sensor	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido
0	501.000	153.000	323.000		93.000	228.000	277.000	293.000	295.000	792.000	227.000	403.000	284.000	223.000	258.000
20	403.000	132.000	241.000		77.000	217.000	219.000	160.000	232.000	640.000	184.000	298.000	216.000	193.000	198.000
30	291.000	99.000	148.000		60.000	117.000	151.000	148.000	183.000	411.000	136.000	217.000	164.000	143.000	163.000
45	215.000	85.000	89.000		59.000	94.000	118.000	96.000	144.000	297.000	110.000	156.000	131.000	123.000	128.000
60	148.000	69.000	72.000		51.000	68.000	89.000	60.000	111.000	206.000	86.000	108.000	104.000	97.000	101.000
90	62.000	46.000	38.000		44.000	44.000	58.000	34.000	70.000	102.000	53.000	65.000	67.000	60.000	63.000
120	29.000	32.000	22.000		35.000	32.000	45.000	24.000	46.000	57.000	35.000	44.000	44.000	40.000	42.000
Estacas	1000	1004	1008	1012	1016	1020	1024	1028	1032	1036	1040	1044	1048	1052	1056
Sensor	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado
0	472.743	286.292	356.234		259.933	258.675	280.198	299.146	299.705	792.079	271.262	398.433	282.038	272.586	298.524
20	330.424	213.366	237.036		199.030	198.066	206.028	211.068	231.158	508.876	204.464	293.143	213.415	205.461	218.736
30	243.179	171.572	178.810		163.057	162.267	165.359	166.235	188.624	364.702	165.211	226.742	172.742	166.017	172.465
45	152.205	126.140	125.208		122.775	122.180	122.433	121.531	139.696	234.058	122.571	153.326	128.271	123.169	124.618
60	100.212	96.439	93.898		95.159	94.638	94.269	93.268	106.106	165.004	94.263	107.306	98.629	94.723	94.399
90	56.907	62.771	60.731		62.527	62.224	61.857	61.180	67.761	103.253	61.681	63.029	64.483	61.982	61.086
120	41.924	45.593	44.330		45.388	45.169	44.997	44.559	48.812	76.205	44.828	45.406	46.845	45.047	44.408
Erro RMS	25,57%	56,34%	49,53%	0,00%	-	32,96%	5,81%	51,66%	3,55%	19,01%	17,91%	2,59%	4,09%	10,97%	8,30%
MR CBUQ	2.756,43	4.500,00	1.859,69	-	4.500,00	4.500,00	3.185,19	2.318,36	4.500,00	844,22	4.500,00	3.577,23	4.500,00	4.500,00	4.500,00
MR BGS	100,00	400,00	341,31	-	400,00	400,00	400,00	400,00	264,90	100,00	400,00	132,74	381,24	400,00	400,00
MR Subleito	200,00	200,00	200,00	-	200,00	200,00	200,00	200,00	182,77	111,25	200,00	187,37	192,76	200,00	200,00

Porém, os resultados obtidos no ramo 1000 (estaca 1000 a 1056) não foram compatíveis com as faixas adotadas, os MR encontrados nas três camadas deste ramo, (revestimento, base e subleito) em sua grande maioria, ficaram no limite imposto pela faixa adotada. Com isso, o erro calculado pelo Evercalc ficou acima de 20% em diversos pontos, valor alto demais para aceitação.

Mesmo após a tentativa de dilatação das faixas os resultados permaneceram atingindo os valores máximos estabelecidos, evidenciando a existência de alguma irregularidade.

Nas análises dos resultados percebeu-se que os poços de inspeção foram realizados apenas no Ramo 2000, e o projeto adotou os mesmos resultados para o Ramo 1000, porém pelas discrepâncias apresentadas se deduz que a estrutura de pavimento do Ramo 1000 não condiz com o encontrado nos poços de inspeção.

Assim, optou-se pela exclusão do ramo 1000 no estudo. Pois a dificuldade

em confirmar as informações sobre a estrutura real poderia atrapalhar a análise geral dos resultados.

Com relação aos resultados do Ramo 2000, houve alguns pontos com resultados acima do esperado também, porém devido à localização dos poços de inspeção ser neste existe a possibilidade da certeza dos materiais da estrutura, desta forma a retroanálise foi conduzida da seguinte forma.

Foram mantidas as faixas de módulo de resiliência conforme a instrução de projeto IP-DE-P00/001 mencionado anteriormente, no entanto nos pontos em o que o erro fosse superior a 20%, foi realizada uma dilatação das faixas dos módulos de forma que o erro se aproximasse à 20%.

E as tabelas 28 e 29 apresentam os dados obtidos para as deflexões calculadas, os módulos de resiliência e o desvio (erro) nas faixas 1 e 3 do ramo 2000.

Tabela 28- Deflexões Calculadas - Ramo 2000 - Faixa 1

Ramo 2000 Faixa 1															
Estacas	2000	2004	2008	2012	2016	2020	2024	2028	2032	2036	2040	2044	2048	2052	2056
Sensor	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido
0	339.000	542.000	638.000	716.000	221.000	441.000	577.000	325.000	333.000	376.000	297.000	484.000	518.000	336.000	180.000
20	309.000	428.000	445.000	625.000	203.000	339.000	445.000	254.000	258.000	300.000	243.000	412.000	386.000	328.000	152.000
30	232.000	319.000	364.000	514.000	169.000	310.000	335.000	187.000	195.000	227.000	181.000	304.000	286.000	227.000	123.000
45	178.000	235.000	264.000	334.000	150.000	240.000	208.000	139.000	143.000	174.000	150.000	226.000	200.000	162.000	105.000
60	139.000	178.000	191.000	303.000	130.000	177.000	152.000	103.000	118.000	123.000	123.000	158.000	138.000	115.000	87.000
90	91.000	108.000	92.000	180.000	86.000	103.000	76.000	68.000	77.000	81.000	85.000	80.000	75.000	61.000	56.000
120	67.000	72.000	46.000	111.000	56.000	71.000	51.000	48.000	54.000	54.000	53.000	53.000	45.000	33.000	36.000
Estacas	2000	2004	2008	2012	2016	2020	2024	2028	2032	2036	2040	2044	2048	2052	2056
Sensor	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado
0	402.809	543.812	610.311	774.322	306.845	484.675	580.122	329.878	335.134	389.683	336.311	530.226	517.449	431.563	258.854
20	297.453	415.957	461.853	621.976	230.400	379.805	431.635	242.343	249.459	291.236	251.722	401.199	387.605	315.381	182.078
30	239.097	332.136	359.559	514.117	186.549	310.731	334.154	192.306	201.414	231.427	202.979	314.513	300.411	241.193	139.614
45	178.295	235.750	238.196	379.594	138.744	227.761	220.331	138.775	149.813	165.981	150.710	212.772	198.566	158.780	97.968
60	138.334	171.852	158.025	282.383	106.774	169.453	145.778	104.282	115.541	123.646	116.188	145.571	132.170	107.600	73.065
90	91.436	104.664	81.659	171.154	69.818	103.881	75.122	66.676	75.832	78.181	76.306	79.791	69.448	60.502	46.923
120	66.534	75.033	56.265	120.088	50.704	73.597	51.709	48.356	55.133	56.605	55.509	55.789	48.314	43.461	34.221
Erro RMS	1,90%	3,30%	12,26%	5,57%	19,34%	5,06%	3,04%	2,31%	2,19%	3,43%	8,40%	5,78%	4,67%	13,01%	20,98%
MR CBUQ	2.603,29	3.432,31	3.432,31	3.432,31	3.432,31	3.432,31	2.469,80	3.035,49	2.884,42	3.432,31	3.432,31	3.432,31	3.432,31	3.432,31	4.314,91
MR BGS	340,88	113,97	50,00	63,91	343,23	116,03	54,31	273,17	327,61	212,60	343,23	71,19	65,61	104,53	440,00
MR Subleito	136,25	116,61	146,02	73,12	180,02	120,80	158,50	185,85	163,78	157,15	163,73	151,45	172,22	196,13	260,00

Tabela 29- Deflexões Calculadas - Ramo 2000 - Faixa 3

Ramo 2000 Faixa 3															
Estacas	2000	2004	2008	2012	2016	2020	2024	2028	2032	2036	2040	2044	2048	2052	2056
Sensor	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido	Medido
0	403.000	346.000	330.000	528.000	351.000	406.000	226.000	243.000	197.000	213.000	168.000	484.000	255.000	219.000	125.000
20	302.000	264.000	234.000	367.000	248.000	323.000	179.000	197.000	169.000	164.000	147.000	412.000	212.000	170.000	109.000
30	230.000	199.000	158.000	243.000	163.000	237.000	135.000	150.000	136.000	124.000	121.000	304.000	168.000	126.000	92.000
45	165.000	147.000	106.000	146.000	101.000	180.000	111.000	114.000	118.000	102.000	104.000	226.000	138.000	100.000	90.000
60	123.000	104.000	70.000	85.000	70.000	127.000	85.000	86.000	102.000	87.000	89.000	158.000	115.000	79.000	83.000
90	70.000	61.000	41.000	38.000	48.000	61.000	55.000	58.000	74.000	63.000	66.000	80.000	72.000	50.000	66.000
120	42.000	41.000	31.000	33.000	37.000	35.000	38.000	43.000	54.000	47.000	48.000	53.000	49.000	33.000	51.000
Estacas	2000	2004	2008	2012	2016	2020	2024	2028	2032	2036	2040	2044	2048	2052	2056
Sensor	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado	Calculado
0	421.011	364.513	345.879	561.900	365.420	433.111	287.669	291.178	267.716	280.359	229.873	530.226	311.829	285.280	164.043
20	305.330	261.820	228.291	367.288	231.389	325.361	213.007	216.159	201.821	200.581	169.480	401.199	228.357	204.322	133.247
30	234.271	200.730	169.508	255.807	173.100	254.416	170.617	173.434	163.396	155.344	136.142	314.513	181.886	159.262	120.348
45	157.022	137.021	115.706	148.846	121.580	171.051	125.103	127.555	122.615	110.545	101.324	212.772	132.482	113.274	104.287
60	109.330	98.605	85.317	94.045	91.607	115.746	95.236	97.351	94.753	82.613	78.512	145.571	100.792	84.839	89.349
90	65.432	60.377	54.675	54.093	59.495	61.736	61.755	63.191	62.212	52.982	51.904	79.791	65.471	54.432	66.777
120	47.567	44.429	40.020	40.887	43.421	42.645	44.830	45.874	45.202	38.583	37.803	55.789	47.617	39.674	50.334
Erro RMS	7,35%	4,97%	19,29%	19,09%	18,29%	9,86%	19,21%	12,35%	19,55%	20,17%	20,00%	5,76%	11,26%	19,79%	19,80%
MR CBUQ	3.432,31	3.432,31	2.021,90	1.774,70	1.212,16	3.432,31	3.432,31	3.432,31	3.322,65	3.432,31	4.314,91	3.432,31	3.432,31	3.432,31	3.500,00
MR BGs	137,15	204,11	309,04	87,65	343,23	78,43	343,23	343,23	400,00	350,00	550,00	71,19	343,23	350,00	4.700,00
MR Subleito	179,58	196,13	220,00	205,00	205,00	196,13	200,00	196,13	200,00	230,00	239,33	151,45	188,52	225,00	196,13

Com todos os dados gerados foi confeccionada uma ficha resumo de todos os pontos contendo as deflexões medidas e calculadas, as características das camadas como espessura, coeficiente de Poisson e MR, além do gráfico comparativo das bacias de deflexão medidas e calculadas pelo programa computacional.

A Tabela 30 exibe a ficha resumo da estaca 2000 da faixa 1, realizada conforme a metodologia descrita anteriormente.

Tabela 30 - Resultado da Retroanálise

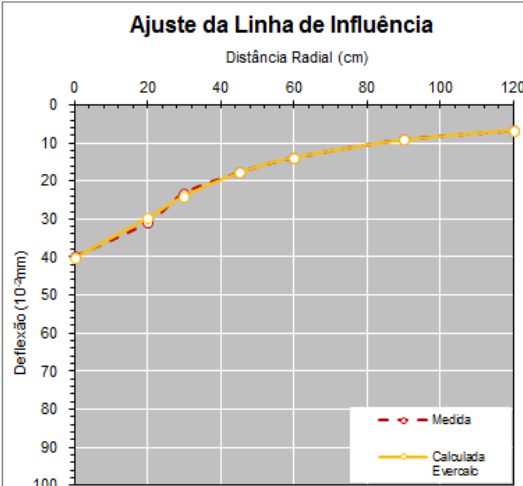
Av. dos Autonomistas		Ramo 2000		SENTIDO		Marginal	
Estaca		2000 FAIXA		1		Estaca 2000 a 2003	
Distância Radial (cm)	DEFLEXÕES (10 ⁻² mm)			RMS			
	Medida	Calculada Evercalc	Diferença %				
	0	39,9	40,3		-0,95%		
	20	30,9	29,7		3,74%		
	30	23,2	23,9		-3,06%		
	45	17,8	17,8		-0,17%		
	60	13,9	13,8		0,48%		
	90	9,1	9,1		-0,48%		
120	6,7	6,7	0,70%				
RETROANÁLISE							
Equipamento	nº de geofones	Raio (cm)	Carga (N)	Temp. (°C) Pavimento			
FWD	7	15	40.501	28,9			
Estrutura		Espessura (cm)	Coef. de Poisson	MR (kgf/cm²)			
Camada	Material						
Revestimento	CBUQ	11,00	0,30	26.546,27			
Base	BGS	21,00	0,35	3.476,02			
Subleito	SOLO	-	0,45	1.389,37			

Ajuste da Linha de Influência

Distância Radial (cm)

Deflexão (10⁻³mm)

— ♦ — Medida
— ○ — Calculada Evercalc



Este procedimento foi realizado para as demais estacas conforme estipulado na tabela de trechos homogêneos. As fichas resumo de todos os pontos do ramo 2000 são apresentados nos anexos deste trabalho.

A avaliação dos módulos de resiliência obtidos na retroanálise é grande relevância, pois estes serão os dados de entrada para a próxima etapa do processo de determinação da vida útil do pavimento.

Além disso, para contribuir com a análise dos dados foi feito um comparativo entre os pontos estudados. Assim, foi gerado um único gráfico com todas as curvas de deflexão levantadas nas faixas 1 e 3 com o objetivo de identificar comportamentos semelhantes. A partir daí, é possível analisar os resultados das bacias calculadas no Evercalc comparado pontos com bacias com valores próximos. A **Figura 8** mostra o comparativo das curvas deflectométricas de todos os pontos.

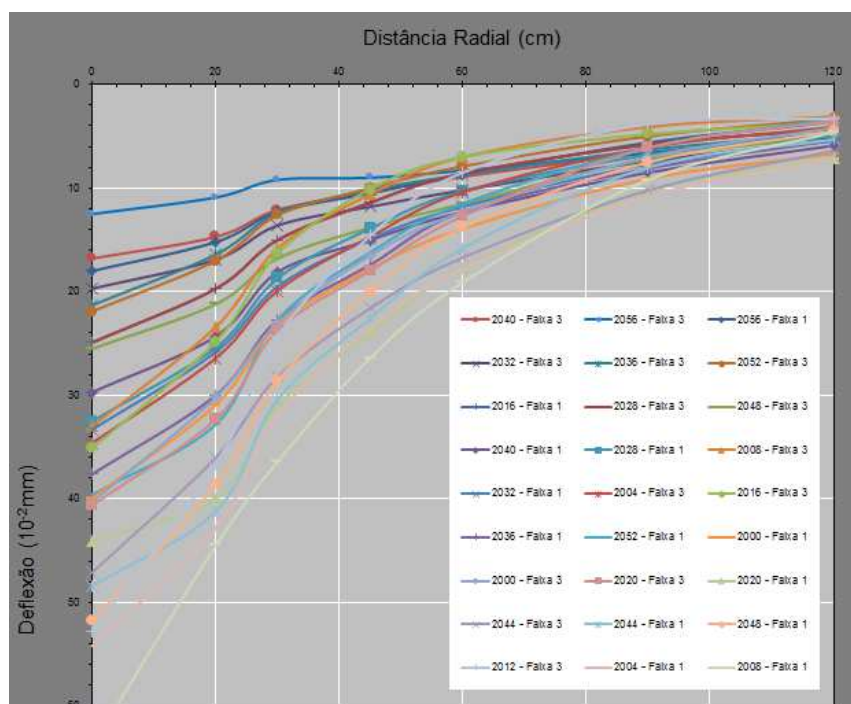


Figura 8 - Comparativo das Curvas Deflectométricas

4.5 ELSYM 5 e Simulação de Tensões e Deformações

Até o presente momento todo o trabalho foi realizado para a obtenção dos valores dos módulos de resiliência próximos dos valores existentes na via, ou seja, valores de resiliência reduzidos devido aos desgastes pelo efeito da carga do tráfego e ações climáticas.

Com esses dados é possível gerar uma análise do comportamento estrutural, das tensões e deformações do pavimento nas condições atuais, utilizando o programa ELSYM 5, o software de análises mecanísticassimular as tensões em pontos específicos das camadas do pavimento, bem como as deformações decorrentes da aplicação de uma carga.

Assim, utilizou-se como dados de entrada, a quantidade de camadas da estrutura, suas características geométricas, o coeficiente de Poisson e os módulos de resiliência obtidos no EVERCALC 5.0, a Figura 9 ilustra a tela inicial do programa.

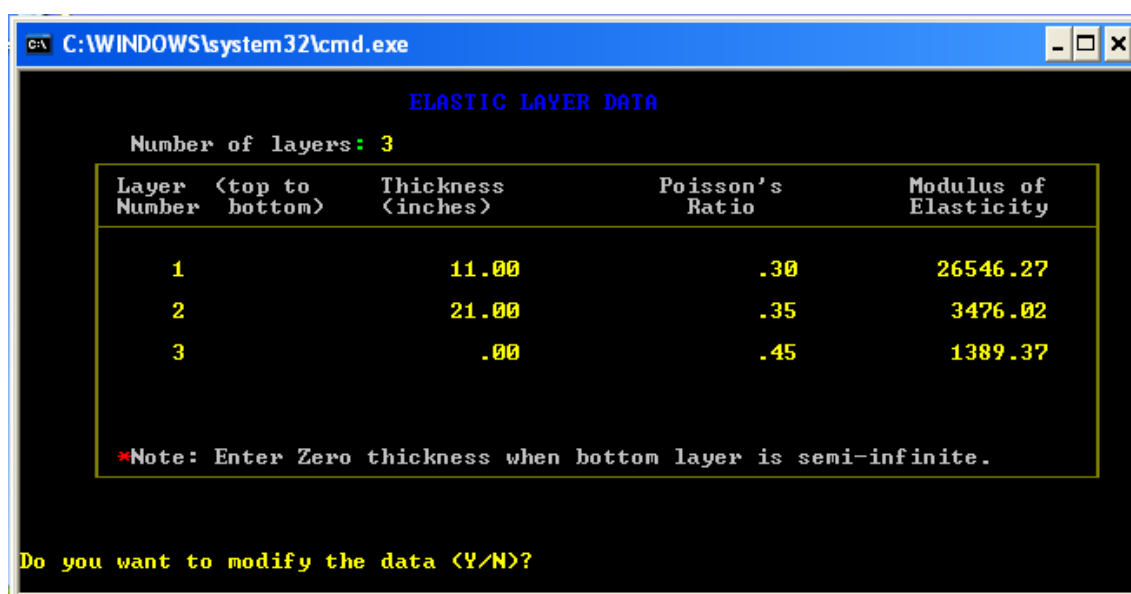


Figura 9 - Elsym 5 - Tela 1

A segunda etapa, diz respeito aos dados do carregamento do eixo padrão como a carga, pressão e posicionamento da carga conforme disposição do centro de cada pneu do veículo tipo, a situação é esboçada na Figura 10.

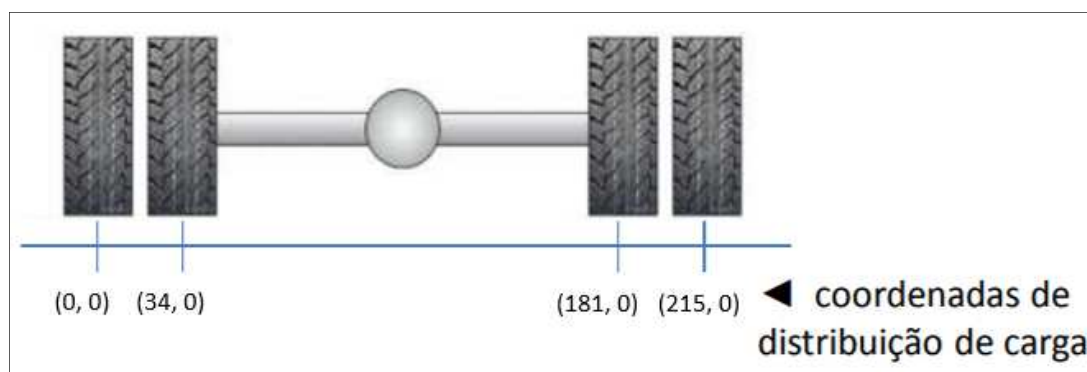


Figura 10 - Coordenadas de Distribuição de Cargas

Quanto as unidades de medidas, vale ressaltar que apesar de o programa indicar unidades do sistema imperial, os valores usados são referentes ao Sistema Internacional de medidas, estando o carregamento (Load) em Kgf, a pressão (Pressure) em Kgf/cm² e o posicionamento do eixo dos pneus (Coordinates) em cm. Para o campo do bulbo de tensões (LoadRadius) não é necessário preenchimento,

pois este o valor é gerado automaticamente pelo programa, sendo igual a 10,77 cm, A Figura 11 ilustra a segunda etapa do programa.

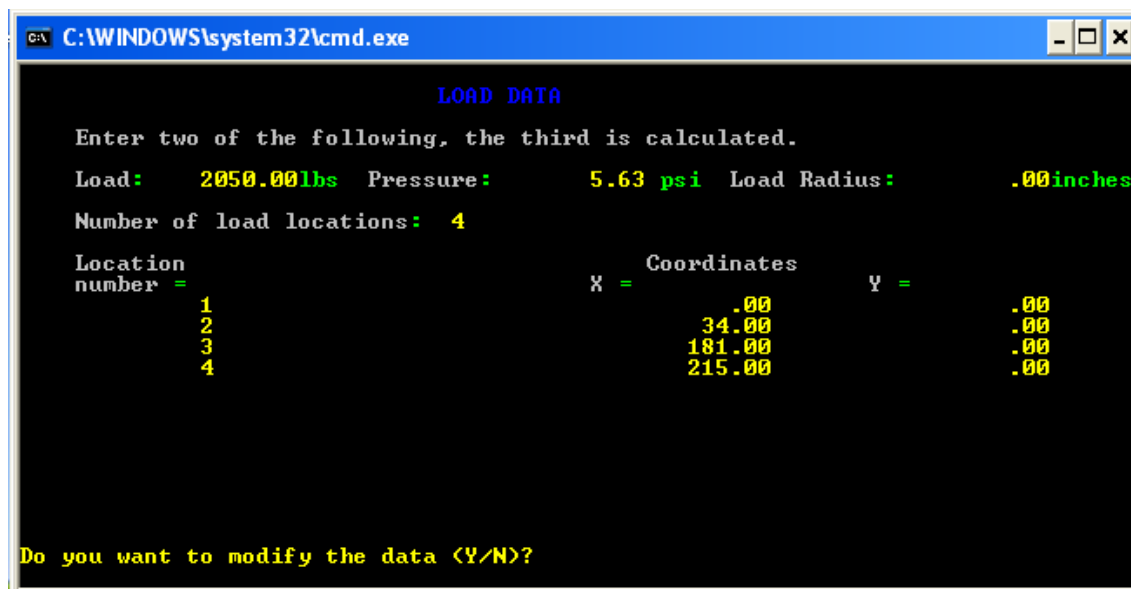


Figura 11 - Elsym 5 - Tela 2

A terceira etapa é a determinação dos pontos para análise das deformações recuperáveis (deflexões), as deformações permanentes e as tensões.

Os dois pontos determinados para a análise da aplicação das cargas foram no eixo do primeiro pneu e entre o primeiro e segundo pneu, a Figura 12 esboça a situação.

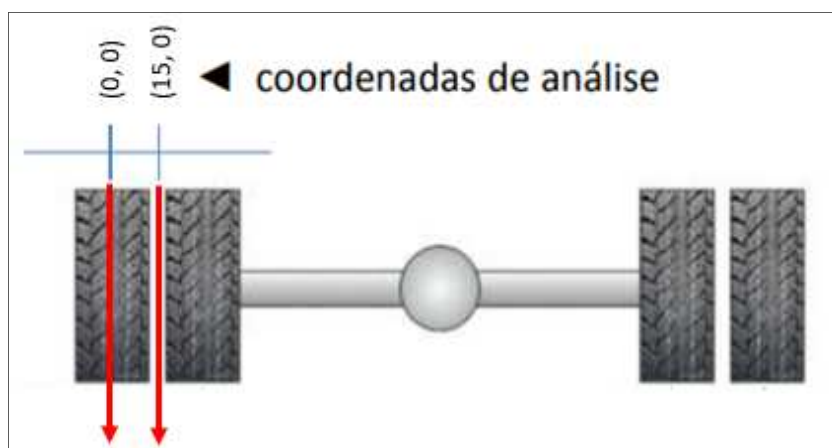


Figura 12 - Aplicação de Carga

Além disso são inseridas as posições relevantes das camadas da estrutura para determinação das deformações e tensões, conforme a Figura 13.

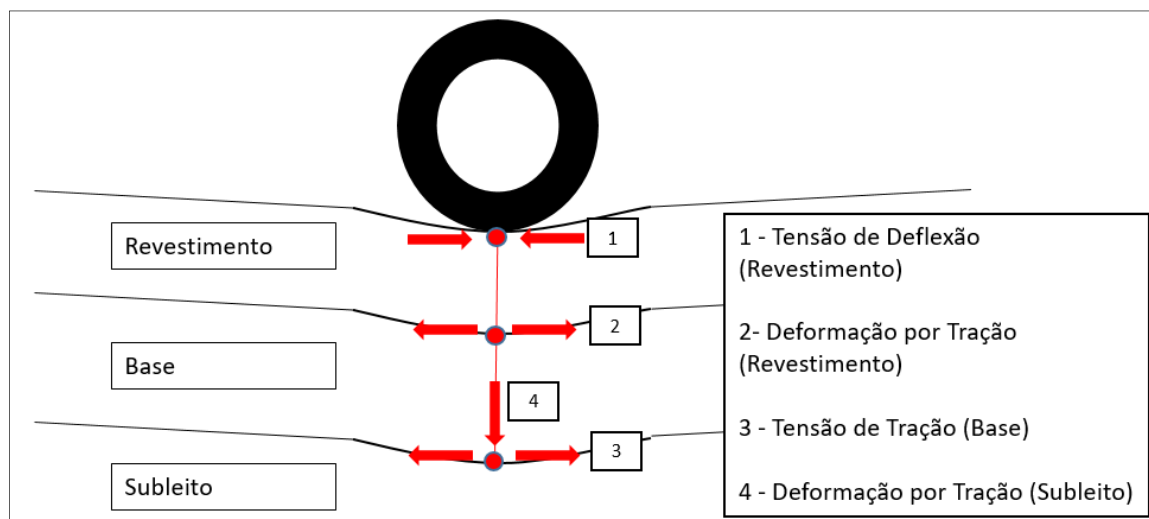


Figura 13 - Posição da tensão e deformação nas camadas

Desta forma a simulação é gerada com a posição do topo do revestimento ($Z=0.01$), da fibra inferior do revestimento ($Z=H_{\text{revestimento}} - 0.01$), da fibra inferior da base ($Z=H_{\text{revestimento}} + H_{\text{base}} - 0.01$) e do topo do subleito ($Z=H_{\text{revestimento}} + H_{\text{base}} + 0.01$). A terceira etapa é ilustrada na Figura 14.

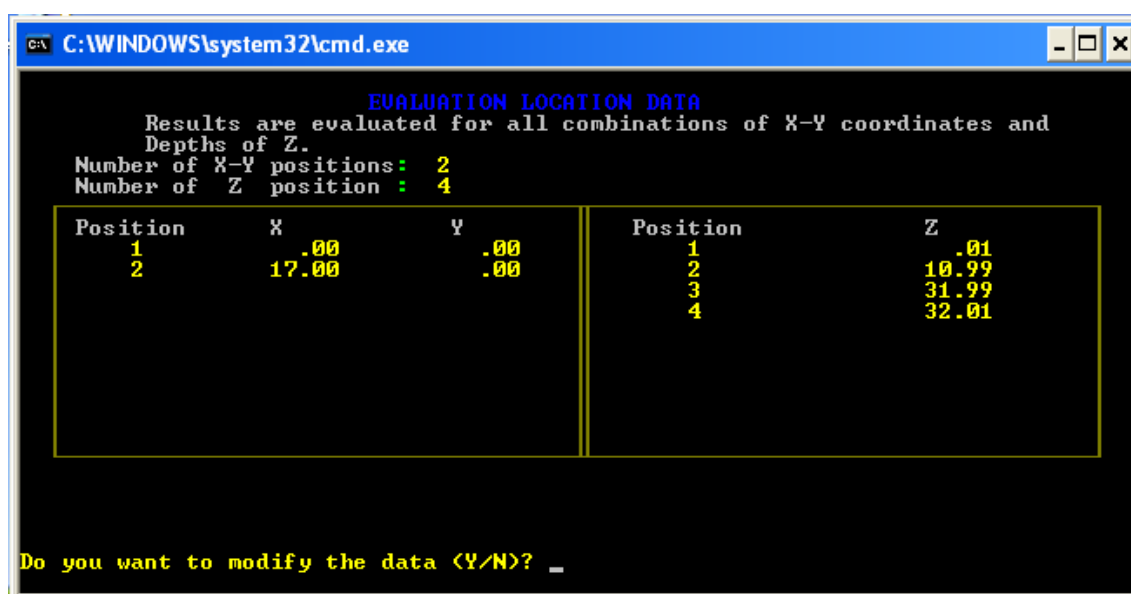


Figura 14 - Elysym 5 - Tela 3

A simulação revela as tensões e deformações para a combinação de dados específicos em cada um dos pontos estudados, em se tratando de um pavimento flexível, os principais dados fornecidos pelo programa são, a deflexão (Displacement) no topo do revestimento, a deformação à tração (Normal Strain) na fibra inferior do revestimento e a deformação à compressão (Normal Strain) no topo do subleito.

Assim, os dados obtidos através do ELSYM 5 para a faixa 1 e 3 seguem nas tabelas abaixo, respectivamente. As deformação de tração (ε_t) no revestimento e a deformação à compressão (ε_v) são expressas em 10^{-4} cm/cm, já a tensão de tração (σ_t) na fibra inferior da camada de base e a deflexão no topo do revestimento são apresentados na potência de 10^{-2} mm.

Estacas	2000	2004	2008	2012	2016	2020	2024	2028	2032	2036	2040	2044	2048	2052	2056
Deflexão CBUQ (0,01)	3,68E-02	4,35E-02	5,41E-02	7,41E-02	0,02788	0,04436	0,05071	0,02937	0,03077	0,03489	0,03053	0,04639	0,04521	0,03077	0,02243
Strain CBUQ	2,01E-04	2,81E-04	3,39E-04	3,44E-04	1,59E-04	2,44E-04	3,53E-04	1,86E-04	1,76E-04	2,11E-04	1,71E-04	2,37E-04	2,33E-04	1,76E-04	1,46E-04
Stress BGS	0,6461	0,01134	-0,2192	-0,03358	0,3768	0,00384	-0,2105	0,2287	0,418	0,1763	0,4612	-0,1696	-0,2025	0,418	0,3316
Strain Sub-leito	-3,75E-04	-4,19E-04	-2,96E-04	-5,62E-04	-2,64E-04	-3,53E-04	-2,73E-04	-2,72E-04	-2,94E-04	-3,21E-04	-2,39E-04	-2,35E-04	-2,58E-04	-2,34E-04	-2,35E-04

Estacas	2000	2004	2008	2012	2016	2020	2024	2028	2032	2036	2040	2044	2048	2052	2056
Deflexão CBUQ (0,01)	0,03676	0,03157	0,02355	0,04517	0,03172	0,03806	0,02615	0,02646	0,02472	0,02482	0,02103	0,04639	0,02806	0,02472	0,01746
Strain CBUQ	2,54E-04	0,00022	0,00022	0,00043	0,00023	0,00026	0,00016	0,00016	0,00014	0,00016	0,00012	0,0003	0,00017	0,00014	8,3E-06
Stress BGS	-0,06829	0,05828	0,2634	-0,2355	0,3838	-0,1888	0,3188	0,3295	0,406	0,2745	0,5486	-0,1636	0,3764	0,406	3,734
Strain Sub-leito	-0,0003	-0,00023	-0,00023	-0,00031	-0,00023	-0,00022	-0,00025	-0,00025	-0,00023	-0,00024	-0,00021	-0,00023	-0,00027	-0,00023	-0,00012

4.6 Critério de Fadiga

Segundo os critérios de análise mecânica para um pavimento com as características do estudado, deve-se fazer verificações quanto à deflexão no topo do revestimento, na deformação à tração na fibra inferior do revestimento e deformação a compressão no topo do subleito. A análise da tensão de tração na fibra inferior da base ocorre apenas em casos de bases cimentadas e, portanto, não será verificado neste estudo.

Assim, utilizando a instrução de projeto do DER, IP-DE-P00/001, onde estão contidas as formulas para as verificações dos critérios de fadiga quanto às deformações já mencionadas, é possível determinar o número N, que corresponde quantidades de passadas do eixo padrão até a ruína da estrutura.

Os critérios adotados são para validos para a condição em seu estado novo. Para o desenvolvimento do trabalho, utilizou-se o modelo como referencia, porém sua aplicação para materiais desgastados, deteriorados ou oxidados porém ser questionáveis.

Para a verificação quanto a deflexão no topo do revestimento, utilizou-se a seguinte fórmula.

$$\log D_{adm} = k - n \times \log N$$

onde:

N - número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80Kn; e

K e n - coeficientes determinados por regressões lineares

Porém, como o objetivo é chegar no N remanescente, é necessário isolar N de acordo com a seguinte equação:

$$N = 10^{\frac{(\log D_{adm} - k)}{-n}}$$

Assim, tem-se para valores de k e n a seguinte tabela com dados das normas do DNER - PRO11/79.

Equação	Procedimento	k	n
1	DNER-PRO 011/79	3,01	0,174

Verificação quanto a deformação de tração nas fibras inferiores do revestimento de acordo com a seguinte equação:

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

Equação	Autor	Ano	K	n
1	FHWA (<i>Federal Highway Administration</i>)	1976	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512
2	<i>Asphalt Institute</i>	1976	$2,961 \times 10^{-5}$	3,291
3	Barker, Brabston & Chou	1977	$9,7 \times 10^{-10}$	4,03
4	Pinto & Preussler – CAP 50-70	1980	$2,85 \times 10^{-7}$	3,69

Verificação da deformação à compressão no topo do subleito.

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

Equação	Autor	Ano	K	n
1	Dormon & Metcalf	1965	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762

Cálculo Número N - Faixa 1															
Estacas	2000	2004	2008	2012	2016	2020	2024	2028	2032	2036	2040	2044	2048	2052	2056
Deflexão CBUQ (0,01)	3,68E-02	4,95E-02	5,41E-02	7,41E-02	0,02788	0,04496	0,05071	0,02937	0,03077	0,03489	0,03059	0,04699	0,04521	0,03077	0,02243
NUSACE - PRO 11	2,00E+08	3,62E+07	2,18E+07	3,58E+06	9,83E+08	6,31E+07	3,16E+07	7,29E+08	5,58E+08	2,71E+08	5,77E+08	4,89E+07	6,11E+07	5,58E+08	3,43E+09
NUSACE - PRO 269	2,62E+08	5,36E+07	3,35E+07	6,30E+06	1,14E+09	8,98E+07	4,73E+07	8,64E+08	6,75E+08	3,46E+08	6,96E+08	7,10E+07	8,71E+07	6,75E+08	3,63E+09
Strain CBUQ	2,01E-04	2,81E-04	3,39E-04	3,44E-04	1,59E-04	2,44E-04	3,59E-04	1,86E-04	1,76E-04	2,11E-04	1,71E-04	2,97E-04	2,99E-04	1,76E-04	1,46E-04
NASHTO - Asphalt Inst	4,37E+07	1,45E+07	7,80E+06	7,38E+06	9,47E+07	2,28E+07	6,45E+06	5,65E+07	6,68E+07	3,69E+07	7,45E+07	1,21E+07	1,17E+07	6,68E+07	1,23E+08
Stress BGS	0,6461	0,01194	-0,2192	-0,03358	0,3768	0,003842	-0,2105	0,2287	0,418	0,1769	0,4612	-0,1696	-0,2025	0,418	0,3916
Strain Sub-leito	-3,75E-04	-4,19E-04	-2,96E-04	-5,62E-04	-2,64E-04	-3,53E-04	-2,73E-04	-2,72E-04	-2,94E-04	-3,21E-04	-2,99E-04	-2,95E-04	-2,58E-04	-2,94E-04	-2,35E-04
NUSACE - Ormon/ Metcalf	5,58E+06	3,86E+06	1,21E+07	1,47E+06	1,77E+07	6,78E+06	1,59E+07	1,61E+07	1,25E+07	9,27E+06	1,18E+07	1,23E+07	1,92E+07	1,25E+07	2,60E+07

Cálculo Número N - Faixa 3															
Estacas	2000	2004	2008	2012	2016	2020	2024	2028	2032	2036	2040	2044	2048	2052	2056
Deflexão CBUQ (0,01)	0,03676	0,03157	0,02955	0,04517	0,03172	0,03806	0,02615	0,02646	0,02472	0,02482	0,02103	0,04699	0,02806	0,02472	0,01746
NUSACE - PRO 11	2,01E+08	4,81E+08	7,04E+08	6,14E+07	4,68E+08	1,64E+08	1,42E+09	1,33E+09	1,96E+09	1,92E+09	4,97E+09	4,89E+07	9,47E+08	1,96E+09	1,45E+10
NUSACE - PRO 269	2,62E+08	5,89E+08	8,37E+08	8,76E+07	5,74E+08	2,18E+08	1,60E+09	1,51E+09	2,16E+09	2,12E+09	5,11E+09	7,10E+07	1,10E+09	2,16E+09	1,37E+10
Strain CBUQ	2,54E-04	0,000219	0,000225	0,000429	0,000226	0,000258	0,000157	0,000157	0,000138	0,000164	0,000118	0,000297	0,000163	0,000138	8,9E-06
NASHTO - Asphalt Institute	2,02E+07	3,29E+07	3,01E+07	3,53E+06	2,95E+07	1,91E+07	9,77E+07	9,71E+07	1,50E+08	8,41E+07	2,50E+08	1,21E+07	7,74E+07	1,50E+08	1,24E+12
Stress BGS	-0,06829	0,05828	0,2694	-0,2355	0,3838	-0,1888	0,3188	0,3295	0,406	0,2745	0,5486	-0,1696	0,3764	0,406	3,734
Strain Sub-leito	-0,0003	-0,00029	-0,00029	-0,00031	-0,00029	-0,00022	-0,00025	-0,00025	-0,00023	-0,00024	-0,00021	-0,00029	-0,00027	-0,00023	-0,00012
NUSACE - Ormon/ Metcalf	1,12E+07	1,31E+07	1,32E+07	1,10E+07	1,27E+07	3,23E+07	2,22E+07	2,13E+07	2,60E+07	2,50E+07	3,92E+07	1,23E+07	1,59E+07	2,60E+07	2,41E+08

Assim, para fins comparativos, foi considerada a média dos resultados a cima para cada critério de fadiga. Porém, na média não foi considerada a estaca 2056, tanto para a faixa 1 quanto para faixa 3, devido a estar destoando dos outros valores e ser uma estaca que em ambas as faixas o erro está, depois dos ajustes, com aproximadamente 20%.

Portanto, para as faixas 1 e 2 temos:

Critério	Camada	Método	Médias	Projeto
Deflexão	CBUQ	N USACE - PRO 11	2,96E+08	1,50E+07
Deflexão	CBUQ	N USACE - PRO 269	3,60E+08	
Deformação	CBUQ	N uSACE - Asphalt Inst	1,49E+08	
Deformação	Subleito	N USACE - Ormon/ Metcalf	1,12E+07	

O mesmo comparativo ocorreu para a faixa 3.

Critério	Camada	Método	Médias	Projeto
Deflexão	CBUQ	N USACE - PRO 11	1,19E+09	3,50E+07
Deflexão	CBUQ	N USACE - PRO 269	1,31E+09	
Deformação	CBUQ	N USACE - Asphalt Inst	3,01E+08	
Deformação	Subleito	N USACE - Ormon/ Metcalf	3,48E+07	

Vale lembrar que existem diferenças entre os números obtidos pelo método AASHTO e USACE, para efeito comparativo utilizou-se a ordem 4 vezes por ser um pavimento em vias urbanos.

Em ambos os comparativos, para os critérios de deflexão no revestimento, foram encontrados valores discrepantes do esperado da ordem de 10^9 . Diante desses resultados imaginas que alguma incoerência nos dados de campo ou falta de informações que possam justificar uma camada de revestimento com os valores a cima do normal.

Os valores de N encontrados na verificação da fibra inferior do revestimento estão menos discrepantes que os da verificação de deflexão, porém ainda estão a cima do esperado para a camada. Com isso, é difícil fazer um comparativo entre os resultados e o projeto, apenas verificar uma tendência de que a camada atende à vida útil e esforço considerados no projeto

Entretanto, para os valores de subleito os resultados foram mais próximos do aguardado, sendo que na faixa 3, o subleito apresenta uma ordem de grandeza (10^7) mais próxima ao estimado em projeto, ainda que um pouco abaixo da vida útil de projeto. Na faixas 1 e 2, que também estão na faixa de grandeza de projeto, os valores estão mais próximos do número N de projeto o que pode justificar a ausência de reparos profundos no que foi previsto de projeto.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cerca do equipamento por impacto FallingWeightDeflectometer (FWD), o dispositivo automatizado permite a obtenção de dados defletoométricos como o deslocamento sobre o centro da carga (deflexão máxima), e as medidas dos deslocamentos elásticos em vários pontos a partir do centro de carga (bacia defletoétrica).

Apesar da calibração mais sofisticada e do custo superior ao método tradicional, o benefício de se poder medir com acurácia a bacia defletoétrica do pavimento e utilizá-la para estimar os módulos de resiliência das camadas, permite uma avaliação estrutural mais adequada e assim um cálculo da vida útil restante mais preciso.

Embora seja demorado o lançamento dos dados defletoétricos no programa de iteração Evercalc 5.0, a utilização do software é fácil, com linguagens e interfaces simples e intuitivas.

O tratamento dos dados pode e deve ser feito utilizando tabelas e gráficos para análises visuais. Através da programação computacional é possível ganhar algum tempo no lançamento de dados caso haja muitos pontos. Além disso, os resultados são calculados de maneira rápida e, portanto, pode-se ter alguns resultados em poucos minutos para iniciar uma análise primária.

Vale mencionar a questão de que as faixas de valores de módulo de resiliência adotados na retroanálise para os materiais valem para materiais novos, bem como os modelos de fadiga utilizados.

Desta maneira, para estimar a vida útil remanescente com maior precisão, o ideal seria ter literaturas indicando os valores de módulo possíveis para materiais “velhos” em pista, bem como modelos de fadiga diferenciados para estes materiais. Exemplo: qual o módulo máximo para um Concreto asfáltico bastante oxidado? Não existem valores de referência nas normas e na literatura.

Também importante dizer que pelos motivos mencionados acima, o ideal para estimar com maior confiabilidade a vida remanescente do pavimento é também utilizar outros critérios combinados como os modelos de desempenho do HDM ou do MEPDG da AASHTO.

O ELSYM5 também possui boa interface para o usuário e, portanto, a entrada dos dados e análises dos resultados não são complexas. Ambos os programas só podem ser rodados em sistema operacional Windows 95, 98 e XP, sendo necessário um programa que emule um desses sistemas operacionais caso o computador utilizado possua um sistema mais avançado.

Considerações no Ramo 1000

Os resultados obtidos no ramo 1000 não foram compatíveis com as faixas adotadas no software Evercalc 5.0, os módulos de resiliência encontrados nas três camadas deste ramo, (revestimento, base e subleito) em sua grande maioria, ficaram no limite imposto pela faixa adotada. Com isso, o erro calculado pelo Evercalc ficou acima de 20% em diversos pontos, sendo um valor alto demais para aceitação.

Mesmo após a tentativa de dilatação das faixas os resultados permaneceram atingindo os valores máximos estabelecidos, evidenciando a existência de irregularidade.

Esperavam-se valores mais baixos para vida útil do revestimento, que justificando a fresagem e recomposição. Porém, os resultados não condizem com isso, inclusive, apesar de pontos discrepantes, os resultados mostram uma tendência de estar em boas condições, enquanto que para o subleito, os valores se mostram coerentes justificando a não intervenção imediata no trecho. Em ambas as faixas a menor vida útil encontrada foi no subleito. Sendo que para o tráfego das faixas 1 e 2 a vida útil se apresentou maior, sendo aproximadamente 70% da vida útil de projeto, enquanto que na faixa 3 de 50%. Considera-se portanto que este tipo de análise

combinada aos demais estudos pode contribuir para a recuperação ou intervenção de alguma camada específica caso seja identificada a deficiência, que pode pontual ou não.

Uma das possibilidades para a discrepância nos resultados é a existência de alguma interferência sob a avenida como dutos envelopados para a proteção da rede de água tratada, esgoto, gasoduto, linhas de telefonia (fibra ótica), redes de drenagem, etc.

Todavia, os valores de deflexão encontrados deixam a entender que a estrutura possui matérias mais resistentes que os encontrados nos poços de inspeção, desta forma conclui-se que os poços de inspeção foram realizados apenas no ramo 2000, e o projeto adotou os mesmos resultados para o ramo 1000, sendo inviável a análise do ramo sem uma nova verificação in loco.

Considerações no Ramo 2000

O ramo 2000, durante a etapa da retroanálise quando é calculado o módulo de resiliência, apresentou resultados que justificavam a sequência dos estudos. Além disso, como os dados de poços de inspeção e estrutura do pavimento foram feitas neste ramo pode-se ter mais certeza nas informações para a continuidade.

Os valores encontrados no estudo ficaram próximos ao esperado, sendo possível a utilização dos valores.

Recomendações para Trabalhos Futuros

Recomenda-se realizar o estudo considerando mais informações visuais e histórico de interferências para conseguir obter um comparativo mais preciso.

6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo; Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. ; MOTTA, L. M. G. da ; CERATTI, J. A. P. ; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação básica para engenheiros** .Rio de Janeiro:PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BORGES, C. B. S. **Estudo Comparativo entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FDW em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001

CERATTI, J. A. P.;THEISEN, K.M..; MATTOS, J. R. G.; TREICHEL, D. S. **Método de Retroanálise de Bacias Obtidas por Carregamento de Eixo Padrão Através do Uso de Softwares Adaptados para FWD..** Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE –**CNT, 2016**. Relatório Gerencial de 2016. Acesso em 04/06/2017 Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20LOW.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf)>.

CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – **CONTECC, 2015**. Abordagens sobre Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis Rodoviários: Uma Visão Prévia do Profissional Brasileiro. Acesso em 04/06/2017 Disponível em: <http://www.confeca.org.br/media/Civil_abordagens_sobre_dimensionamento_de_pavimentos_flexiveis_rodoviaros_uma_visao_previa_do_profissional_brasileiro.pdf>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM DE ESTRADAS DE. **DNER/ME**. Pavimento – delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman. 1961.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE ESTRADAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **IP-DE-P00/001**. Projeto de Pavimentação. 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE ESTRADAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **IP-DE-P00/003**. Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimento. 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE ESTRADAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/031**. Concreto Asfáltico Tipo SMA. Especificação Técnica, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT**. Manual de Paviementação. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT**. Custos Médios Gerenciais de 2014. Acesso em 01/09/2017 Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/servicos/custo-medio-gerencial/custos-medios-ger.novembro-14.pdf>>

FONSECA, L. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2a Etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Mestrado—Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2013.

GONTIJO, P.R.A., GUIMARÃES, F.H.R., NOGUEIRA, C.L. **Uma Nova Metodologia para Auscultação de Pavimentos Rodoviários**. 28ª Reunião Anual de Pavimentação. Belo Horizonte, MG, set. 1994.

HENRIQUE, Y. F. **Método de Avaliação de Pavimentos Aeroportuários – Aplicação a um Aeródromo Militar**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

MARCON, A. F., APS, M., CARDOSO, S. H. (1996) - **Consequências do Uso Inadequado de Modelos de Previsão de Desempenho em Sistemas de Gerência de Pavimentos**, 30º Reunião Anual de Pavimentação, Volume 4, p. 2027-2036, Salvador-BA.

PEREIRA, J. M. B. **Um Procedimento de Retroanálise para Pavimentos Flexíveis Baseado na Teoria do Ponto Inerte e em Modelagem Matemática**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Carlos, São Carlos, SP, 2007

PINTO, R. L. **Comparação entre o Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Asfálticos pelo Método Mecanístico-Empírico e os Métodos DNER-PRO 11/79 e**

DNER-Pro 269/94 para um Segmento Homogêneo da BR-222/CE e Análise de Sensibilidade do Programa SisPavBR. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

PINTO, S. Estudo do comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicações na avaliação estrutural de pavimentos. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 1991.

RIBAS, C. Y. Estudo Comparativo Entre as Metodologias Empírica e Empirírico-Mecanicista de Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Flexíveis: Um Estudo de Caso da Rodovia BR-282/SC. UFSC, Florianópolis, SC, 2013.

ROCHA, FILHO, N. R. Estudo de Técnicas para Avaliação Estrutural de Pavimentos por Meio de Levantamentos Deflectométricos. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP, 1996

ANEXOS

Anexo 1- Formulários do Levantamento de Defeitos dos Pavimentos seguintes formulários

INVENTÁRIO DO ESTADO DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO																											
RODOVIA:		Av. dos Autonomistas - Faixa 4																									
TRECHO:		São Paulo - Itapevi										AVALIADOR:															
Estaca	Faixa	S. T.	OK	FC-1							FC-2		FC-3		PLASTICO		CONSOLID		O	P	E	EX	D	R	Flecha		
				FI	TTC	TTL	TLC	TLL	TRR	J	TB	JE	TBE	ALP	ATP	ALC	ATC	TRI							TRE		
				(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)	(3)	(3)	(4)	(4)	(4)	(4)	(5)							(5)	(5)	(6)
1.001	E	1		X		X					X					X										0	0
1003+10	E	2	X																							0	0
1006	E	3																					X		0	0	
1008+10	E	4						X															X		0	0	
1011	E	5																				X			0	0	
1013+10	E	6											X									X	X		0	0	
1016	E	7	X																						0	0	
1018+10	E	8			X	X																	X		0	0	
1021	E	9			X		X	X																	0	0	
1023+10	E	10			X		X																		0	2	
1026	E	11			X	X	X																		0	0	
1028+10	E	12		X																					0	0	
1031	E	13			X			X																	0	0	
1033+10	E	14			X			X																	0	0	
1036	E	15		X																					0	0	
1038+10	E	16		X																					0	0	
1041	E	17		X	X																				0	0	
1043+10	E	18		X	X																				0	0	
1046	E	19			X		X																		0	0	
1048+10	E	20			X			X															X		0	0	
1051	E	21	X																						0	0	
1053+10	E	22	X																						0	0	
1056	E	23		X																					0	0	
1058+10	E	24		X																					0	0	
1061	E	25	X																						0	0	
1063+10	E	26	X																						0	0	
1066	E	27		X																					0	0	
1068+10	E	28	X																						0	0	
1071	E	29	X																						0	0	
1073+10	E	30			X		X			X													X		0	0	
1076	E	31			X			X		X												X	X		0	0	
1078+10	E	32			X		X			X															0	0	
1081	E	33	X																						0	0	
1083+10	E	34				X										X							X		0	0	
1086	E	35			X	X				X	X					X							X		0	0	
1088+10	E	36			X			X		X												X			0	0	
1091	E	37		X			X																		0	0	
1093+10	E	38			X		X	X		X															0	0	
1096	E	39			X		X	X			X														0	0	
1098+10	E	40			X		X	X																	0	0	
1101	E	41			X			X														X			0	0	
1103+10	E	42		X																					0	0	
1106	E	43		X																					0	0	
1108+10	E	44			X		X									X									0	3	
1111	E	45						X								X						X			0	3	

