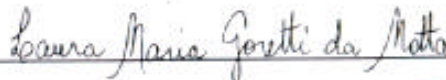


UM MÉTODO DE RETROANÁLISE DE BACIAS DE DEFLEXÃO DE PAVIMENTOS.

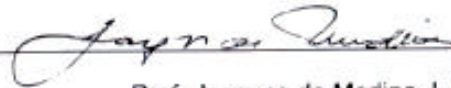
Jorge Luis Gomes da Fonseca

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:



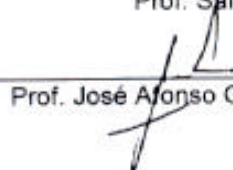
Prof. Laura Maria Goretti da Motta D.Sc.



Prof. Jacques de Medina, L.D.



Prof. Salomão Pinto, D. Sc.



Prof. José Afonso Gonçalves de Macêdo, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2002.

FONSECA, JORGE LUIZ GOMES DA

Um Método de Retroanálise de Bacias
de Deflexão de Pavimentos [Rio de
Janeiro] 2002.

VIII, 150 p. 29,7 cm (COPPE / UFRJ,
M.Sc., Engenharia de Civil, 2002)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Retroanálise de pavimento

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

Ao meu saudoso Pai, SEBASTIÃO GOMES DA FONSECA, pelo exemplar ser humano que foi, cuja magnitude de caráter me parece inatingível.

AGRADECIMENTOS

A minha família, por tudo.

Aos meus amigos.

À minha orientadora Professora Laura Maria Gorreti da Motta, pela inesgotável paciência, compreensão e incentivo.

Aos meus colegas da ENGESPRO LTDA, pela inestimável colaboração.

Ao Felipe Franco e Manoel Jr., pelas ferramentas e subsídios.

Aos colegas de turma.

E a todos com os quais tenho convivido, pelas imponderáveis contribuições no contexto geral da minha vida.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil (M.Sc.).

UM MÉTODO DE RETROANÁLISE DE BACIAS DE DEFLEXÃO DE PAVIMENTOS.

Jorge Luiz Gomes da Fonseca.

Orientadora : Professora Laura Maria Goretti da Motta

Programa : Engenharia Civil

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um método de retroanálise de bacias de deflexão de pavimentos objetivando a determinação dos módulos de resiliência. O método proposto considera o conjunto pavimento – subleito como um sistema elástico – linear de três camadas e a estimativa dos módulos de resiliência é efetuada através da comparação iterativa da bacia de deflexão determinada no campo com emprego da Viga Benkelman ou FWD com as bacias teóricas calculadas analiticamente com auxílio do Programa ELSYM5, armazenadas em banco de dados. A implementação do método é feita através do programa de computador REPAV, cujo desenvolvimento está compreendido no propósito da presente tese. Foi incorporado ao programa, uma rotina destinada ao pré-dimensionamento de reforço, incluindo um procedimento para determinação dos fatores de equivalência entre os diversos tipos de eixos em relação a uma carga padrão, sob o aspecto de ruptura do pavimento por fadiga do revestimento.

Abstract of Thesis presented to COPPE / UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

METHOD OF BACKCALCULATING DEFLECTION BASINS OF PAVEMENTS.

Jorge Luiz Gomes da Fonseca.

Thesis Supervisor : Professora Laura Maria Goretti da Motta
Department : Civil Engineering

This document presents a backcalculation method of pavements resilient moduli based on measurement of deflection basins through data of FWD and Benkelman beam. The pavement is considered a system of three linear elastic layers, and the program ELSYM5 is used. The evaluation of the resilient moduli is made through an iterative comparison of the basin displacement in the field using the Benkelman Beam or the FWD, with the theoretical basins calculated with the ELSYM5 program, stored in a database. The application of this method is described in this work through the computer program REPAV. This program incorporates an overlay design procedure and equivalency and factors for several axle loads and load configuration, based on the failure by fatigue of asphalt layer under repeated load testing.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 – Avaliação Estrutural do Pavimento Através de Retroanálise.....	3
2.2 – Obtenção das Bacias de Deformação de Campo.....	5
2.2.1 – Métodos e Equipamentos.....	5
2.2.2 – Comparação Entre Equipamentos para Ensaios Defletométricos.....	9
2.3 – Métodos Computacionais para Cálculo de Tensões e Deformações em Estruturas de Pavimento.....	13
2.4 – Métodos de Retroanálise.....	18
2.4.1 – Métodos Iterativos.....	18
2.4.2 – Métodos Simplificados.....	24
CAPÍTULO 3 – UM MÉTODO DE RETROANÁLISE DE BACIA DE DEFLEXÃO	29
3.1 – Introdução.....	29
3.2 – Procedimentos Gerais.....	31
3.2.1 – Determinação das Bacias de Deflexão Teóricas.....	31
3.2.2 – Compatibilização das Bacias de Deflexão de Campo.....	38
3.2.3 – Pesquisa da Bacia Teórica Semelhante a Ajustada.....	41
3.2.4 – Cálculo dos Módulos de Resiliência.....	42
3.2.5 – Determinação de Elementos para Pré-Dimensionamento de Reforço.....	47
3.3 – Análise Crítica de Resultados Obtidos.....	57

3.3.1- Aplicação do Método para Interpretação de Bacias de Deflexão.....	57
3.3.2 – Aplicação do método para cálculo dos fatores de equivalência de carga	69
 CAPÍTULO 4 – Programa para Retroanálise de Pavimentos – REPAV.....	 72
 CAPÍTULO 5 – Conclusões e Sugestões para Novas Pesquisas	
5.1 – Conclusões.....	82
5.2 – Sugestões para Novos Estudos.....	83
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	 84
 ANEXOS	 89
Anexo A - Relatórios dos resultados das retroanálises elaboradas nesta tese.....	89
Anexo B – Relatórios das verificações das condições de solicitação da estrutura do pavimento, considerando uma camada adicional, elaborados nesta fase.....	115
Anexo C – Relatórios dos fatores de equivalência de carga calculados nesta tese.....	141

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A crescente demanda de investimentos na malha rodoviária no país, sobretudo na área de restauração de pavimentos, tem requerido dos setores de pesquisas a produção de métodos e tecnologias capazes de conceber soluções de projetos viáveis de forma ágil e econômica.

Nesse ambiente, é que se inserem os métodos de retroanálise de bacias de deflexão que se destacam por constituírem ferramentas de avaliação não destrutiva dos pavimentos existentes, de forma rápida, eficiente e a custos atraentes em relação a outros processos.

O avanço das ferramentas de cálculo matemáticos, implementados em sofisticados sistemas computacionais, aliado ao crescente aumento da capacidade e velocidade de processamento dos computadores, tem permitido a crescente formulação de modelos automáticos de retroanálise.

O objetivo da presente dissertação, é o desenvolvimento de um método de retroanálise de bacias de deflexão através de um programa de computador. O método baseia-se na metodologia adotada por PEREIRA, (1969) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa, e utiliza banco de dados de bacias teóricas calculadas analiticamente com auxílio do programa ELSYM5. O programa permite a investigação dos módulos de resiliência de um sistema de três camadas, cujas espessuras devem ser conhecidas, ou ainda, determinar os módulos e dimensões de um sistema de rigidez equivalente.

Através da utilização de rotina de cálculo de tensões do programa JULEA, desenvolvido por JACOB USAN, em (FRANCO, 2000), o programa proposto fornece o estado de tensões do pavimento analisado, quando recapeado com diversas espessuras simuladas de reforço .

Por fim, o programa mapeia as deformações específicas nas camadas críticas (revestimento e base cimentada), provocadas por simulação da aplicação de cargas com configurações representativas dos diversos tipos de veículos de carga da frota nacional. A análise da combinação das deformações mapeadas na estrutura permite através da aplicação de um modelo de vida de fadiga, a estimativa dos fatores de equivalência de carga apropriados para a estrutura retroanalizada.

Esta tese está estruturada em cinco capítulos e dois anexos.

No capítulo 2 é feita revisão bibliográfica acerca dos métodos de retroanálise existentes, abrangendo um breve relato sobre os programas computacionais existentes, e sobre os métodos e equipamentos utilizados para medidas de bacias de deflexão.

No capítulo 3 estão apresentadas as premissas metodológicas adotadas na formulação do modelo de retroanálise inserido no programa, bem como, uma análise crítica dos resultados obtidos nos testes de aplicação do mesmo.

No capítulo 4 faz-se uma descrição do programa quanto a sua operação, formas de entrada de dados e emissão de relatórios.

Capítulo 5 – Apresenta as conclusões decorrentes do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

Anexo A – Apresenta os relatórios dos resultados das retroanálises elaboradas nesta tese.

Anexo B – Apresenta os Relatórios das verificações das condições de solicitação da estrutura do pavimento, considerando uma camada adicional, elaborados nesta fase.

Anexo C – Apresenta os Relatórios dos fatores de equivalência de carga calculados nesta tese

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Avaliação estrutural do pavimento através de retroanálise

A abordagem mecânica das questões relacionadas ao dimensionamento de pavimentos de rodovias e aeroportos, requer o conhecimento das características mecânicas das diversas camadas que constituem o sistema pavimento-subleito, traduzidas pelos módulos de resiliência, coeficientes de Poisson e espessuras das camadas, bem como a resposta da estrutura aos condicionantes destrutivos representados pela fadiga e deformações permanentes assim como fatores climáticos.

A obtenção das características mecânicas de pavimentos em uso, através de ensaios de laboratório, além de exigir um investimento considerável, apresenta inconvenientes devidos à dificuldade de reproduzir em laboratório, as condições reais de campo, e ainda, a necessidade de intervenção destrutiva em vias existentes e em operação, levando à situações críticas de segurança e de interferência na capacidade operacional da via.

A forma de obter-se os módulos de resiliência de uma estrutura existente, por processo não destrutivo é através da retroanálise, que é entendida em mecânica dos pavimentos como o procedimento analítico para determinação dos parâmetros elásticos do pavimento e subleito nas condições “in situ”, a partir da interpretação das deflexões reversíveis medidas na superfície da estrutura do sistema analisado. Ressalva-se que há sempre necessidade de realizar algumas sondagens para determinação das espessuras das camadas, e coleta de materiais para elaboração de ensaios de laboratório, porém em quantidade bem inferior à necessária para caracterizar a estrutura, sem o recurso da retroanálise.

Tendo sido esse procedimento efetivamente implementado na década de 70, existem controvertidas informações sobre a identidade do primeiro método de retroanálise.

Segundo PEREIRA (1972), deve ser creditada a JEUFFROY e BACHELER (1967), o primeiro esforço para a dedução dos módulos das camadas de um pavimento a partir de aproximações sucessivas de modelagem onde considerava a deflexão reversível máxima medida no centro da carga.

Cita, PEREIRA (1972), que naquela época estava ainda em fase de desenvolvimento pelo LNEC, o único método a levar em consideração, na definição dos parâmetros elásticos do pavimento existente, não apenas a deflexão máxima, mas toda a curvatura (linha de influência) da bacia de deflexão medida nos ensaios de carga com pneus. A retroanálise dos módulos por este método é feita, portanto, comparando-se essa linha de influência de campo com linhas de influência teóricas tabeladas para sistemas de duas e três camadas.

Segundo LYTTON, citado em ALBERNAZ (1997), o primeiro método de retroanálise foi desenvolvido por F.H. SCRIVNER, no ano de 1973, que determinava as características elásticas de sistemas de duas camadas, por processo de cálculo direto (não iterativo).

Seja como for, desde a década de 70, diversos pesquisadores vêm se dedicando ao aprimoramento da técnica de retroanálise de pavimento, tendo como base a teoria original de BOUSSINESQ (1885) para o estado de tensões de um meio semi-infinito homogêneo, isotrópico, bem como, as modelagens para sistemas estratificados implementados por BURMISTER (1943), ODEMARK (1949), ACUM e FOX (1951), e outros pesquisadores.

Segundo ALBERNAZ (1997), no Brasil, ANDREATINI (1967, 1968 e 1970) foi um dos primeiros a tratar especificamente da retroanálise dos módulos de resiliência. Ele estudou a determinação dos módulos de sistemas de duas camadas a partir de medidas de deflexões com placas circulares flexíveis e com a viga Benkelman. Considerava não só as deflexões máximas, como também as deflexões ao longo da bacia. Destaca-se também no Brasil, as contribuições do Engenheiro brasileiro Sérgio Thenn de Barros, que empenhou-se no desenvolvimento de expressões e ábacos que permitem a determinação de deflexões na superfície de sistemas estratificados de três camadas (BARROS, 1966).

Entre as contribuições mais recentes sobre o tema da retroanálise no Brasil, pode-se citar os trabalhos de FABRÍCIO et al. (1986, 1988, 1992 e 1994), o programa computacional RETROANA, desenvolvido pelo corpo técnico da empresa Dynatest Engenharia Ltda, o programa RETRAN-2CL, desenvolvido por ALBERNAZ(1997), e o método RETROSTRATA, desenvolvido do pela empresa STRATA-Engenharia.

Em geral o processo de retroanálise para avaliação de pavimentos, envolve a obtenção das bacias de deflexão de campo; e por comparação com bacias de deflexão geradas teoricamente, identifica os parâmetros elásticos aproximados para a estrutura estudada.

2.2 – OBTENÇÃO DAS BACIAS DE DEFLEXÃO DE CAMPO

2.2.1 – Métodos e Equipamentos

Desde os primeiros estudos envolvendo a utilização da bacia de deflexão medida na superfície de um pavimento na caracterização da deformabilidade da estrutura do mesmo, vários pesquisadores têm concentrado esforços no sentido de produzir técnicas e equipamentos capazes de tornar mais rápidos e confiáveis os procedimentos de obtenção da bacia de deflexão

Consolidada a aplicação da Teoria da Elasticidade à maciços terrosos, iniciada com os estudos de BOUSSINESQ (1885), diversos processos e instrumentos foram desenvolvidos, visando a determinação de deformações recuperáveis dos maciços, a partir de ensaios na superfície dos mesmos.

A evolução do processo teve início com a utilização do ensaio de placas de carga. O emprego desse procedimento em rodovias e aeroportos, conduziu a dispositivos diversos, como o arranjo adotado pelo LNEC (Laboratório de Engenharia Civil de Lisboa), PEREIRA (1969), que devido a necessidade de realizar freqüentes ensaios de carga com placa levou à construção de uma estrutura fácil de adaptar-se na parte traseira de um caminhão correntemente utilizado em obras rodoviárias. Este veículo após lastreado, permitia a aplicação de até 10t nessa placa, situada a 2,5 m das rodas do mesmo.

A intensificação da utilização do ensaio ensejou a necessidade de agilizar os prazos e reduzir os custos das avaliações de pavimentos através de provas de carga, o que conduziu à substituição do moroso ensaio de placa por um procedimento mais ágil, cujo carregamento é feito com os próprios pneus de um caminhão carregado, ao invés da placa circular. O instrumento de medição das deflexões nesse novo procedimento foi denominado viga Benkelman.

Segundo CARNEIRO (1966), esse instrumento idealizado pelo engenheiro A.C. Benkelman, foi utilizado pela primeira vez no ano de 1953 nas pistas experimentais da WASHO.

Na fase inicial, a viga Benkelman foi utilizada apenas para determinação da deformação reversível máxima. Entretanto, com a constatação da necessidade do conhecimento do conjunto de deformações medidas fora do ponto de aplicação da carga, tal que definissem o perfil da bacia de deformações, passou-se a utilizar a mesma viga para medir deformações em diversos pontos dispostos longitudinalmente nas pistas de rodovias e aeroportos.

A utilização da Viga Benkelman teve um grande impulso no final da década de 50, quando a AASHTO Road Test (1958 a 1960), bem como engenheiros do CGRA – Canadian Goods Roads Association, desenvolveram fórmulas, nomogramas e normas para interpretação de medidas de deflexão.

Durante o meio século de uso da versão original da Viga Benkelman, diversos instrumentos para medirem deformações reversíveis na superfície de pavimentos, foram desenvolvidos ou estão em desenvolvimento, sendo que alguns deles são versões instrumentadas da viga original, porém, outros exploram técnicas diferentes, como é o caso do “Falling Weight Deflectometer – FWD”, que mantêm o mesmo conceito mas são capazes de registrar mais informações. A figura 2.1, ilustra esquematicamente uma das primeiras Vigas Benkelman automatizada, desenvolvida pelo LNEC e utilizada no Brasil desde 1974.

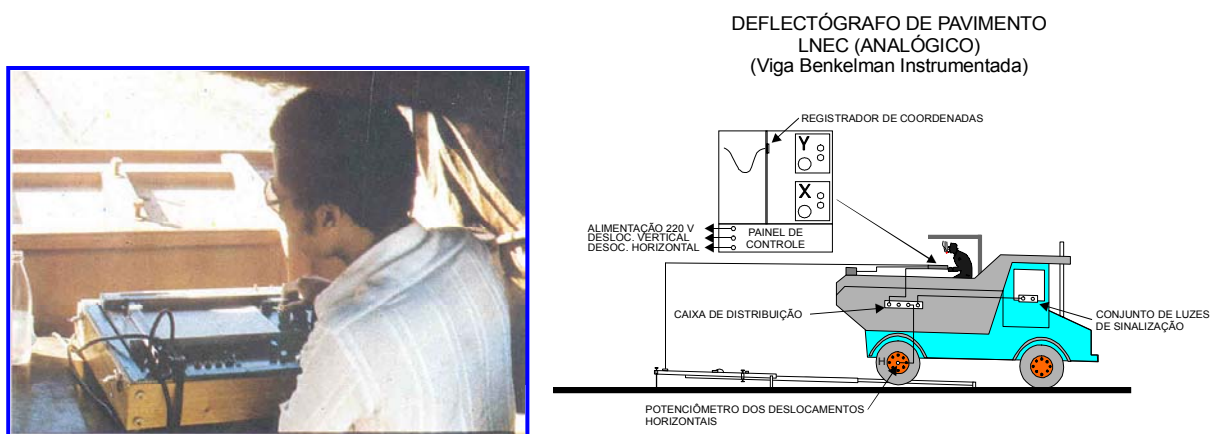


FIGURA 2.1 – Ilustração esquemática da Viga Benkelman automatizada (fotografia e ilustração produzidas pelo autor desta dissertação).

MACÊDO (1996) faz uma detalhada análise dos equipamentos de ensaios não destrutivos de pavimentos para fins de aquisição de dados defletométricos, inicialmente com uma classificação dos mesmos, segundo Smith e Lytton (1985), conforme transcrição a seguir:

- equipamentos de carregamento quase estático;
- equipamentos de carregamento dinâmico; e
- equipamentos de carregamento em impulsos.

a) Equipamentos de carregamento quase estático

Um exemplo da versão melhorada da viga Benkelman que produz ensaios do tipo carregamento quase estático é o Defletômetro Digital SOLOTEST fabricado no Brasil (SOLOTEST, 2002). Esse equipamento faz a medição automática da linha de influência longitudinal da bacia de deslocamentos verticais, registrando automaticamente a temperatura da superfície do pavimento. As informações são monitoradas, através de software especializado instalado num computador portátil. Todos os dados são armazenados em meio digital, utiliza cinco sensores verticais LVDT para medida dos deslocamentos.



FIGURA 2.2 – Ilustração do Deflectômetro Digital (foto obtida pelo autor durante a realização de ensaios na BR-393/ES (Cachoeiro – Muqui) em março de 2002)

b) Equipamentos de carregamento dinâmico

Estes equipamentos se caracterizam pela aplicação de uma pré-carga na superfície do pavimento e a indução de uma vibração harmônica que configura o caráter dinâmico do carregamento. A oscilação do carregamento é obtida através da rotação de dois volantes desbalanceados que giram em sentidos contrários para o caso do Dynaflex, ou por meio de sistemas eletrohidráulico, como é o caso Road Ratter, em suas várias versões, e do Vibrador WES-16, do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE).

Os resultados obtidos nos ensaios realizados com esses equipamentos permitem através de comparação das amplitudes das deflexões (pico a pico) com a amplitude da força dinâmica (pico a pico), avaliar a resposta do pavimento ao carregamento dinâmico, sem interferência da alteração do estado de tensões provocadas pela pré-carga estática aplicada.

c) Equipamentos de carregamento por impulso.

Um exemplo de equipamento que aplica carregamento por Impulso é o FWD Dynatest Modelo 8000E. que foi desenvolvido na Dinamarca e aperfeiçoado nos EUA.

O pulso de carga transiente é gerado pela queda de um conjunto de massas metálicas sobre um sistema de colchões amortecedores de borracha que transmite a carga ao pavimento através de uma placa com 300 mm de diâmetro, apoiada sobre uma membrana de borracha. A força aplicada ao pavimento pode variar entre 1500 lb (7 kN) a 25000 lb (111 kN) em função da altura de queda e da configuração do conjunto de massas utilizado. As deflexões geradas na superfície do pavimento são medido por 7 geofones com capacidade para medir deslocamentos de até 2 mm, instalados na placa de carga e ao longo de uma barra metálica de 2,25 m de comprimento.

Os afastamentos dos geofones em relação a placa de carga, devem ser adequadas à estrutura objeto do ensaio, entretanto é comum tomarem-se espaçamentos de: 0, 20, 30, 45 , 60, 90 e 150 cm, conforme manual para operação com FWD do programa de pesquisas SHRP (1989)

Conforme MACÊDO (1996), a aplicação de diferentes níveis de carga, viabilizada por equipamentos tipo FWD, (Ilustração mostrada na Fig 2.3), permite também avaliar de forma direta o grau de linearidade do comportamento tensão / deformação da estrutura de pavimento.

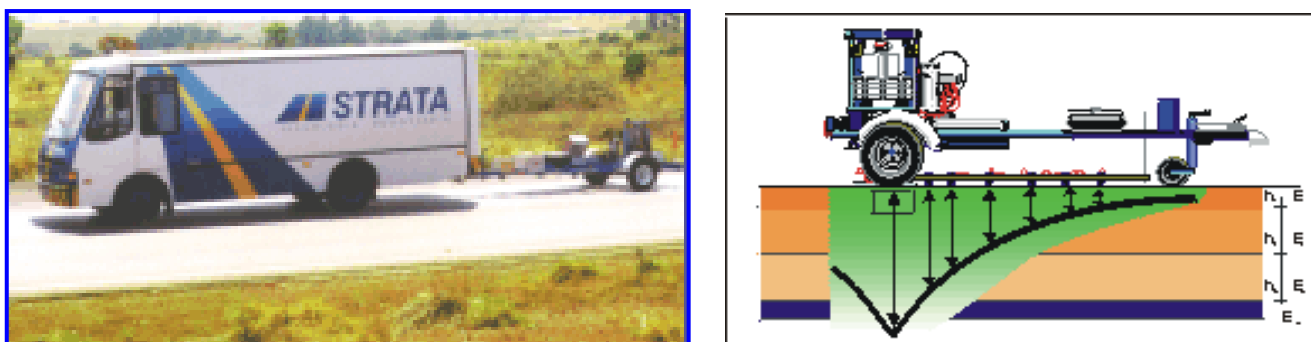


FIGURA 2.3 – Ilustração do defletômetro de Impacto FWD (obtida em www.strataengenharia.com.br em 24/03/2002)

2.2.2 – Comparação Entre Equipamentos para Ensaios Defletométricos.

Ao longo das últimas décadas, tem-se buscado analisar, comparar e correlacionar os resultados obtidos em ensaios defletométricos realizados com os equipamentos mais utilizados para esse fim.

Conforme citado por MACÊDO (1996), o estudo efetuado para o IDOT, (*Departamento de Transportes do Estado de Illinois*), em cooperação com a Universidade de Illinois, foi apresentado por Hoffman & Thompson (1981) e enfoca a utilização da Viga Benkelman (18 Kips, eixo simples com rodas duplas), do Road Rater (8 Kips, 6 – Hz) e do FWD Dynatest (8 Kips), assim como de acelerômetros instalados no pavimento, objetivando o monitoramento dos deslocamentos da superfície quando da passagem de caminhões em movimento sobre pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

As principais conclusões apontadas por esse estudo são as seguintes:

- “as deflexões no pavimento dependem do modo de carregamento e da intensidade de carga aplicada;
- em termos de resposta dos pavimentos às cargas, a resposta produzida pelo FWD é a que mais se aproxima dos deslocamentos na superfícies produzidos por um caminhão em movimento;
- as deflexões medidas com a viga Benkelman, que ocorrem sob carga quase estática, tendem a superestimar àquelas que ocorrem sob cargas de roda em movimento. A explicação deste fato está relacionada a mobilização de efeitos viscoelásticos que se fazem presentes no ensaio com a Viga Benkelman, devido à velocidade extremamente baixa do caminhão de provas durante a execução do ensaio;
- de modo geral, as deflexões obtidas com a Viga Benkelman não podem ser previstas a partir daquelas obtidas com Road Rater;
- embora bastante diferentes em todos os pavimentos testados, as deflexões e as “áreas” de bacia referentes ao Road Rater (8 Kips 15 Hz) e ao FWD (8 Kips) foram altamente correlacionáveis;
- as deflexões obtidas com o Road Rater são altamente dependentes da carga e da frequência utilizada no ensaio. Quando a carga é pequena, os equipamentos vibratórios de frequência fixa podem superestimar a rigidez do pavimento em duas vezes ou mais;
- devido ao carregamento harmônico sem período de repouso e à pré-carga estática verificada no ensaio com o Road Rater, as deflexões obtidas com este equipamento são menores do que as obtidas com o FWD e com as cargas reais de roda em movimento;”

Conforme MACÊDO (1996), o quadro 2.1 a seguir, apresenta os resultados obtidos na verificação da acurácia de carga e deflexão, fruto dos estudos desenvolvidos para o “Air Force Engineering and Services Center”, em cooperação com o “U.S. Army Enginner Waterways Experiment Station”, visando comparar diversos equipamentos NDT

comercialmente disponíveis, conforme apresentado por Bentsen e outros (1989) e Bush III & Bentsen (1990).

**QUADRO 2.1 - ACURÁCIA NAS MEDIDAS DE CARGA E DEFLEXÕES
(BENTSEN et al, 1989), CITADOS POR MACÊDO (1996)**

MEDIDA	EQUIPAMENTO	ERRO (%)*
DEFLEXÃO Revestimento em concreto asfáltico	Dynaflect	0,0 – 7,5
	Road Rater	1,8 – 14,0
	Wes	1,9 – 4,0
	FWD Dynatest	3,0 – 8,6
	HWD Dynatest	0,3 – 6,7
	FWD KUAB	10,0 – 13,0
	FWD PHOENIX	4,4 – 5,8
CARGA Revestimento em concreto de cimento	Dynaflect **	30,7 – 87,7
	Road Rater	3,4 – 5,8
	Wes	1,3 – 3,4
	FWD Dynatest	3,0 – 4,3
	HWD Dynatest	1,9 – 3,7
	FWD KUAB	1,1 – 1,6
	FWD PHOENIX	6,9 – 8,3
* Erro (%) = (valor calculado – valor medido) / (valor calculado) x 100		
** Bush III (1983) encontrou – 4,2% para pavimentos rígidos e –12,9% para pavimentos flexíveis (Ricci e outros, 1985).		

A maioria dos procedimentos normatizados para dimensionamento de reforço de pavimentos, principalmente no Brasil, baseados em deflexões medidas com a viga Benkelman, tem motivado a procura por uma correlação numérica nos valores medidos com a viga Benkelman com outros equipamentos, sobretudo com o FWD.

Nesse sentido, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos, podendo-se citar exemplos como o estudo de dois trechos experimentais feito por PINTO (1991), um da BR-101/RJ (Niterói – Manilha) e outro na BR-040/RJ (Areal – Moura Brasil), ambos com revestimento em CBUQ, com espessura igual ou superior a 10 cm, PINTO (1991),

concluiu que para a carga média de 38,4 Kw no FWD foram obtidos os valores médios das deflexões máximas, chegava-se a seguinte correlação: $D_{Viga} = 1,32 D_{FWD}$

Como este coeficiente de proporcionalidade é função da estrutura do pavimento, um estudo mais detalhado levado a efeito por PINTO, citado por MACÊDO (1996), com base nos mesmos dados que originaram a correlação acima, mostrou que, se fossem considerados, separadamente, os subtrechos homogêneos de ambas as rodovias, este coeficiente variaria entre 1,07 e 1,61, para o mesmo carregamento, e que, analisando-se independentemente as estradas, o coeficiente médio apresentado pela BR-101 foi de 1,15 enquanto o obtido para a BR-040, foi de 1,49.

Estudos realizados por FABRICIO et al (1996), em diversas rodovias dos Estados de Santa Catarina e Rio de Janeiro, sugerem as seguintes correlações:

para deflexões $D_{CFWD} < 85 \times 10^{-2}$

$$D_{CB} = 20,645(D_{CFWD} - 19)^{-2}$$

para deflexões $D_{CFWD} > 85 \times 10^{-2}$

$$D_{CB} = 8,964(D_{CFWD} - 60)^{-2}$$

Ressalvando a validade dos esforços dispendidos nessa direção, em se considerando que trata-se de uma necessidade à superação desse momento de transição do empirismo para o analítico-calibrado pelo que passa as questões de dimensionamento de pavimentos, o autor dessa dissertação é de opinião que uma correlação válida, deveria envolver variáveis relativas a rigidez da estrutura, o que parece inviável, sob o ponto de vista operacional. Considera-se mais adequado o desenvolvimento de técnicas e métodos adequados as características de cada equipamento na interpretação dos valores medidos e no uso posterior para avaliação da capacidade de carga de cada estrutura e, se necessário, o cálculo de reforço.

MEDINA et al (1994), exemplificaram a dificuldade de se obter uma correlação entre o FWD e a viga Benkelman. Além disso, as leituras com a viga são influenciadas pelo operador e, devido a baixa velocidade na aplicação da carga a resposta viscoelástica de determinadas camadas pavimento ensaiado depende da temperatura verificada .

A verificação de acurácia de ensaios realizados com viga Benkelman e FWD procedida por RODRIGUES (1996), apresentou melhores resultados para o levantamento defletométrico realizado com o FWD, uma vez que apresentou menor dispersão que os levantamentos realizados com a viga, quando procedida a repetibilidade de ensaios no mesmo ponto.

2.3 – MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA CÁLCULO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTO.

Pode-se afirmar que após a formulação da teoria da Elasticidade aplicada a maciços semi infinitos homogêneos isotrópicos por (BOUSSINESQ, 1885) e mais tarde em sistemas estratificados, (BURMISTER, 1943; ODEMARK, 1949; FOX, 1948 e outros pesquisadores), o entrave no tratamento mecanístico das estruturas de pavimentos, situou-se na indisponibilidade de ferramentas de cálculo capazes de resolver os modelos matemáticos necessários em tempo e custos acessíveis.

O espetacular avanço tecnológico verificado na área de computação, após a década de 80, possibilitou a implantação de diversos programas especializados em calcular tensões e deformações em estruturas de pavimentos com uma ou mais camadas.

Dentre os programas mais utilizados destacam-se:

- ELASTMCF;
- FEPAVE;
- ELSYM5;
- JÚLEA;
- DAMA;
- KENLAYER;
- ILLIPAVE; e
- ECOROUTE.

O programa FEPAVE (“Finite Element Analysis of Pavements”) foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, Berkeley. DUNCAN e outros (1968), considerou o pavimento como um sistema em camadas horizontais e utilizaram a teoria da elasticidade cuja solução para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos se obtém pelo método dos elementos finitos.

O meio contínuo é discretizado em elementos quadriláteros subdivididos em quatro triângulos para cada elemento, para o qual é calculada uma matriz de rigidez elementar

associada às coordenadas dos nós, à geometria e ao material que caracteriza o referido elemento.

O programa permite o cálculo na hipótese de não linearidade elástica das estruturas, permitindo a entrada dos módulos de resiliência no formato dos diversos modelos definidos nos ensaios de laboratório para determinação da relação tensão e deformação.

Deve-se a MOTTA (1991) que em decorrência de sua tese de doutorado, promoveu adaptações ao programa FEPAVE, possibilitando seu uso em computadores do tipo PC, já que antes era restrito a “main-frames” e a SILVA (1995) a atual versão do FEPAVE.

O programa ELASTMCF, foi desenvolvido e implementado por Rodrigues (1991) utilizando o Método das Camadas Finitas (MCF) desenvolvido originalmente por Booker & Small (1985) para tratar problemas de recalque por adensamento em solos estratificados em camadas horizontais.

Este método possibilita análise tridimensional dos efeitos de cargas múltiplas em estruturas de pavimentos com comportamento linear ou não-linear e a resolução do sistema de equações pela discretização apenas na direção vertical, possibilita resolver os problemas utilizando-se um mínimo espaço de memória do computador.

Sua desvantagem em relação ao Método dos Elementos Finitos, é que sendo o meio contínuo discretizado em subcamadas horizontais homogêneas e infinitas, não permite a variação dos módulos com o estado de tensões na direção horizontal.

O programa ELSYM5 é amplamente utilizado no Brasil, para cálculo de tensões e deformações em sistemas de múltiplas camadas. O programa utiliza a técnica de diferenças finitas, permite o cálculo de até 5 camadas, incluindo o subleito. As hipóteses de cálculo são as mesmas da solução de BURMISTER.

No caso de múltiplos carregamentos, considera superposições dos efeitos de cada carga no ponto verificado. Não permite a modelagem da estrutura na hipótese elástico não linear. Para cada camada, devem ser fornecidos na entrada, os módulos de elasticidade (constante), as espessuras e os coeficientes de Poisson. Permite a obtenção das tensões, deformações específicas e deslocamentos em diversos pontos no plano horizontal e vertical, previamente informados ao programa.

O Programa ELSYM5 foi utilizado na modelagem das bacias de deflexão inseridas no banco de dados utilizado na presente tese.

O programa JULEA desenvolvido por Jacob Uzan, foi utilizado por AYRES (1997) e FRANCO (2000), e permite somente a modelagem elástico linear da estrutura na forma direta.

Esse programa foi utilizado na presente tese para o cálculo de tensões e deformações nas camadas do pavimento e subleito retroanalizados, para fins de avaliação de uma camada adicional, conforme abordagem contida no Capítulo 3.

O programa ECOROUTE está descrito em JEUFFROY(1988).

2.4 – MÉTODOS DE RETROANÁLISE

Os métodos de retroanálise para avaliação estrutural de pavimentos através de ensaios defletométricos, se baseiam na determinação do módulo elástico das camadas do pavimento a partir de ensaios não destrutivos. Em todo o mundo, técnicas de retroanálises com base em dados defletométricos vêm sendo desenvolvidos e empregadas em virtude da rapidez, eficiência, acurácia e custo relativamente baixo na obtenção dos resultados.

Atualmente os métodos de retroanálise existentes podem ser classificados em dois grupos genéricos: métodos iterativos e métodos simplificados.

Os métodos iterativos buscam obter os módulos de todas as camadas do sistema existente, pavimento / subleito e através destes módulos, das espessuras das camadas e das cargas atuantes, calcular as tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto do sistema analisado.

Os métodos simplificados estimam os módulos do sistema pavimento / subleito através da aplicação de equações, tabelas, gráficos e outros procedimentos simplificados gerados a partir da Teoria da Elasticidade, aplicada aos meios homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos transformando a estrutura real multicamadas em estruturas equivalentes mais simples (duas ou três camadas, incluindo o subleito).

2.4.1 – Métodos Iterativos

Estes métodos, por utilizarem processos iterativos de convergência apresentam, em geral, boa acurácia, porém demandam muito tempo de processamento em microcomputador. Utilizam algoritmos que se baseiam, em métodos numéricos (elementos finitos, diferenças finitas e camadas finitas).

Os algoritmos que utilizam o método dos elementos finitos apresentam maior acurácia e podem efetuar análises de sistemas lineares e não lineares, apesar de demandarem mais

tempo em seu processamento. Bacias teóricas geradas em análise não lineares, usando dados de ensaios dinâmicos de laboratórios, apresentam boas concordâncias com as bacias medidas no campo, segundo estudos realizados pela equipe do Laboratório de Mecânica de Solos da COPPE / UFRJ (Brasil) .

Segundo ALBERNAZ (1997), os métodos iterativos de retroanálise podem ser classificados em três grupos:

Grupo 1 - Métodos que calculam, durante o processamento, os parâmetros elásticos de estruturas teóricas, cujas bacias de deflexão são comparadas com a bacia medida no campo. Nestes métodos, os parâmetros das estruturas teóricas são calculados através de programas de análise mecânica. A comparação entre as bacias medida e calculada é feita iterativamente, até que a semelhança entre as duas esteja dentro de um critério de aceitação previamente estabelecido. Ocorrendo isto, o conjunto de módulos da estrutura teórica que gerou a bacia calculada mais próxima da bacia medida no campo é imediatamente associado ao pavimento real analisado. Obtidos os módulos, pode-se calcular tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura.

Grupo 2 - Métodos que utilizam banco de dados de parâmetros elásticos de estruturas teóricas previamente calculados. Estes métodos são semelhantes aos anteriores, exceto pelo fato de que comparam as bacias medidas no campo com bacias teóricas previamente determinadas e armazenadas em bancos de dados, juntamente com os parâmetros elásticos das estruturas que lhes são correspondentes.

Grupo 3 - Métodos que utilizam equações de regressão estatística. Estes métodos são mais raros que os citados anteriormente e utilizam fórmulas obtidas por regressão estatística para o cálculo das deflexões teóricas em pontos previamente escolhidos da bacia de deflexão. Estas deflexões são calculadas em função do carregamento aplicado, das espessuras e dos parâmetros elásticos das camadas (incluindo o subleito). Os dados utilizados na regressão podem ser obtidos por qualquer programa de análise mecânica. Como nos métodos anteriores, a solução do problema é obtida quando a diferença entre as bacias teórica e medida atinge, durante o processo de convergência, um valor igual ou menor previamente estabelecido.

Alguns autores classificam como iterativos somente os métodos do Grupo 1 (HARICHANDRAN et al., 1993, ULLIDTZ et al., 1995) porque consideram iterativas apenas as chamadas à sub-rotinas de cálculo das tensões, deformações e deslocamentos da estrutura teórica, cuja bacia será comparada com a bacia medida. ALBERNAZ et al(1995) consideram que os processos de busca – comparação – busca em bancos de dados (Grupo 2) e de cálculo – comparação – cálculo através de equações de regressão (Grupo 3) são, também, iterativos.

Os resultados dos métodos iterativos são sensíveis a alguns parâmetros, embora já existam métodos que eliminam ou minimizam essa deficiência. Por exemplo, os valores modulares finais da estrutura analisada são fortemente dependentes dos valores modulares iniciais (seed moduli) ou da faixa de valores adotada para os módulos das camadas. Essa deficiência é atribuída às características das formulações matemáticas utilizadas nos métodos.

Algumas equações utilizadas para minimização do erro entre as deflexões medidas e calculadas representam superfícies com vários pontos de mínima e, como resultado, a mínima para a qual o processo numérico converge depende dos valores modulares inicialmente adotados. Ou seja, o processo admite várias soluções. Alguns programas já contêm artifícios matemáticos que localizam o ponto de mínima das mínimas, aumentando a acurácia dos resultados, conforme conclusão de ALBERNAZ (1997).

As espessuras das camadas da estrutura analisada também influenciam os módulos finais. Se a espessura adotada para uma camada for menor que a sua espessura real, o módulo retroanalisado pode ser significativamente maior que o módulo correto da camada, para compensar o valor da rigidez equivalente (função do módulo e da espessura) da camada. O inverso acontece se a espessura adotada for maior que a real. Outros parâmetros que influenciam os resultados dos métodos iterativos são a profundidade e o módulo de uma possível camada rígida no subleito. As dificuldades de ordem prática para a definição desta camada são as mesmas referentes às espessuras das camadas do pavimento.

Os métodos iterativos de retroanálise que gera a curva teórica no momento da comparação, normalmente utilizam programas de cálculo de tensões, deformações e deslocamentos.

Os métodos que utilizam banco de dados de bacias de deflexão geralmente são mais rápidos que os anteriores. Porém, a velocidade de processamento está diretamente ligada ao tamanho e ao nível de detalhamento do banco de dados disponível, o qual deve ser suficientemente extenso para conter toda a gama de combinações de parâmetros elásticos e geométricos de estruturas multicamadas encontrados na prática.

Os métodos que usam equações de regressão estatística são os mais rápidos dentre os métodos iterativos. Porém, dependendo, também, da gama de combinações de parâmetros elásticos e geométricos das estruturas utilizadas na determinação das equações de regressão, podem perder em acurácia devido aos reduzidos coeficientes de correlação encontrados.

O quadro 2.2 apresenta uma listagem parcial de programas de retroanálise.

QUADRO 2.2 - LISTAGEM PARCIAL DE ALGUNS PROGRAMAS DE RETROANÁLISE (ULLIDTZ et al., 1995) Citado por ALBERNAZ (1997)

Programa	Desenvolvido por	Método teórico de Cálculo	Sub-rotina de Cálculo Tensional	Método de Retroanálise	Análise	Análise da Camada Rígida	Condição da Interface das Camadas	Quantidade Máxima de Camadas	Módulos Iniciais (Seed Moduli)	Faixa de Módulos Aceitáveis	Rotina de Convergência de Erro	Função de Convergência de Erro
BISDEF	USACE-WES Bush III	Teoria das multicamadas elásticas	BISAR	Iterativo	Linear	Sim	Variável	Não pode exceder o n° de deflexões da bacia	Sim	Sim	Soma dos quadrados dos erros absolutos	Sim
BOUSDEF	Zhou et al	Odemark - Boussinesq	Odemark - Boussinesq	Iterativo	Não linear	Sim	Aderente	5	Sim	Sim	Soma dos erros percentuais	Sim
CHEVDEF	USACE-WES	Teoria das multicamadas elásticas	CHEVRON	Iterativo	Linear	Sim	Aderente	Não pode exceder o n° de deflexões da bacia	Sim	Sim	Soma dos quadrados dos erros absolutos	Sim
ELMOD / ELCOM	Ullidtz DYNATEST	Odemark - Boussinesq	Odemark - Boussinesq	Iterativo	Linear (SI. Não linear)	Sim (variável)	Aderente	Até 4 (exclusive a camada rígida)	Não	Não	Erro relativo em 5 sensores	Não
ELSDEF	USACE-WES	Teoria das multicamadas elásticas	ELSYM5	Iterativo	Linear	Sim	Aderente	Não pode exceder o n° de deflexões da bacia	Sim	Sim	Soma dos quadrados dos erros absolutos	Sim
EMOD	PCS/LAW	Teoria das multicamadas elásticas	CHEVRON	Iterativo	Linear (SI. Não linear)	Não	Aderente	3	Sim	Sim	Soma dos quadrados dos erros relativos	Não
EVERCALC	Sivanesaram et al.	Teoria das multicamadas elásticas	CHEVRON	Iterativo	Não linear	Sim	Aderente	3 (exclusive a camada rígida)	Sim	Sim	Soma dos erros absolutos	Não
FPEDDI	Uddin	Teoria das multicamadas elásticas	BASINPT	Iterativo	Não linear	Sim (variável)	?	Gerada pelo programa	?	?	?	Não
ISSEM4	Stubstad	Teoria das multicamadas elásticas	ELSYM5	Iterativo	Não linear (cilindrico)	Não	Aderente	4	Sim	Sim	Soma dos erros relativos	Não
MODCOMP3	Irwin et al	Teoria das multicamadas elásticas	CHEVRON	Iterativo	Não linear	Sim	Aderente	2 a 15	Sim	Sim	Erro relativo nos sensores	Não

QUADRO 2.2 - LISTAGEM PARCIAL DE ALGUNS PROGRAMAS DE RETROANÁLISE (ULLIDTZ et al., 1995) Citado por ALBERNAZ (1997)

Programa	Desenvolvido por	Método teórico de Cálculo	Sub-rotina de Cálculo Tensional	Método de Retroanálise	Análise	Análise da Camada Rígida	Condição da Interface das Camadas	Quantidade Máxima de Camadas	Módulos Iniciais (Seed Moduli)	Faixa de Módulos Aceitáveis	Rotina de Convergência de Erro	Função de Convergência de Erro
MODULUS	Uzan et al	Teoria das multicamadas elásticas	WESLEA	Banco de dados	Linear	Sim (variável)	Pré-definido?	Até 4 (mais a camada rígida)	Sim	Sim	Soma dos quadrados dos erros relativos	Sim
PADAL	Brown et al	Teoria das multicamadas elásticas	?	Iterativo	Linear (SL não linear)	?	Pré-definido?	?	Sim	?	Soma dos quadrados dos erros relativos	?
WESDEF	USACE-WES	Teoria das multicamadas elásticas	WESLEA	Iterativo	Linear	Sim	Variável	Até 5	Sim	Sim	Soma dos quadrados dos erros absolutos	Sim
LEEPWIN	Airfields e Pavements Division Engeneering Research and Development Center Waterways Experiment Station	Teoria das multicamadas elásticas	WESPAVE	Iterativo	Linear	Sim	Variável	Mais de 5	Sim	Sim	Opções	Sim
MICHBACK	Harichandran et al	Teoria das multicamadas elásticas	CHEVRON	Iterativo	Linear	Sim	Pré-definido	Até 4 (mais a camada rígida)	Sim	Opcional	Soma dos quadrados dos erros relativos	Sim

2.4.2 – Métodos Simplificados

Nestes métodos, conforme já definido, os módulos do sistema pavimento / subleito são estimados a partir de simplificações da teoria da elasticidade linear aplicada a meios homogêneos e isotrópicos. Por sua formulação simplificada, perdem em acurácia adequada a uma análise mais rigorosa, mas ganham em tempo de processamento, podendo ser muito mais úteis em análises preliminares, anteprojetos e gerência de pavimentos a nível de rede.

No Brasil e no exterior tem-se desenvolvido diversos estudos no sentido de se estabelecer métodos simplificados para retroanálise dos pavimentos, dentre os quais podem-se destacar os seguintes:

- método da AASHTO (1993);
- método de NOURELDIN (1993);
- método de FABRÍCIO (1994); e
- método de ALBERNAZ (1997)

2.4.2.1 – Método da AASHTO (1993)

Desenvolvido pela AASHTO (1993), este método apresenta um procedimento simplificado de retroanálise em que o pavimento real é considerado uma estrutura de duas camadas, sendo uma delas o conjunto das camadas do pavimento propriamente dito (revestimento, base, subbase) e a outra o subleito..

O módulo do subleito (M_R) é calculado pela expressão:

$$M_R = \frac{0,24 P}{d_i x r_i} \quad (2.1)$$

onde:

P = carga aplicada sobre uma área circular;
 r_i = distância radial do ponto i ; e
 d_i = deflexão no ponto i .

2.4.2.2 – Método de FABRÍCIO (1994)

O método desenvolvido por FABRÍCIO et al., (1994), baseia-se no conceito de pavimento equivalente e no modelo elástico de Hogg.

Os principais parâmetros do modelo são:

rigidez da placa (R):

$$R = \frac{E_p \times t}{12 (1 - \mu_p^2)} \quad (2.2)$$

comprimento característico (ℓ_0):

$$\ell_0 = \sqrt[3]{\frac{R (1 + \mu_{SL}) \times (3 - 4 \mu_{SL})}{E_{SL} \times 2 \times (1 - \mu_{SL})}} \quad (2.3)$$

μ_p e μ_{SL} são os coeficientes de Poisson da placa e do subleito que, no método, são considerados iguais a 0,40.

O valor do comprimento característico (ℓ_0) define a escala gráfica da carta de influência, onde a configuração geométrica do carregamento deve ser desenhada para aplicação dos critérios do método de Hogg. A deflexão no centro da carta de influência é calculada pela expressão:

$$(2.4)$$

$$D_0 = \frac{P \times N \times \ell_0}{2000 E_{SL}}$$

onde:

- D_0 - deflexão no centro da carga de influência;
- P - carga aplicada;
- N - número de “ladrilhos” abrangidos pela área de carregamento;
- ℓ_0 - comprimento característico; e
- E_{ST} - módulo elástico do subleito.

2.4.2.3 – Método de NOURELDIN (1993)

Esta metodologia foi proposta por NOURELDIN (1993) e é uma importante contribuição ao método da AASHTO (1993). O método foi desenvolvido e verificado experimentalmente a partir de deflexões obtidas com equipamentos FWD em pavimentos antigos e em construção.

Esse método foi concebido para utilizar bacias de deflexão levantadas com emprego de FWD, sendo mais tarde adaptado por ALBERNAZ(1994), para utilizar bacias de deflexão medidas através de viga Benkelman.

2.4.2.4 – Método de ALBERNAZ (1997)

O Método de ALBERNAZ (1997), foi desenvolvido a partir da adaptação ao método de NOURELDIN (1993), realizada por ALBERNAZ (1994), para uso de deflexões medidas com a viga Benkelman, com o objetivo de utilizar o extenso banco de dados defletométricos obtidos com a viga Benkelman no Brasil. Este método surgiu de dissertação apresentada a COPPE/UFRJ, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil (M.Sc.), pelo autor.

O método considera a transformação do carregamento característico dos levantamentos com a viga Benkelman no carregamento equivalente característico dos ensaios de placa,

através da análise paramétrica com o programa ELSYM5, adotando-se como critério de equivalência a igualdade do perfil longitudinal das bacias de deformação, obtidas pelos dois procedimentos.

As bacias de deflexão de campo são ajustadas através da equação:

$$D_x = \frac{1}{M \times r_x^{E_x} + B} \quad (2.5)$$

onde:

D_x - deflexão no ponto correspondente à distância radial (r_x);

r_x - distância radial;

D_0 - deflexão máxima sob o centro da área carregada ($r_x = 0$ cm);

B - coeficiente da equação ($B = 1/D_0$); e

M, E_x - coeficiente da equação obtidos no ajuste da bacia.

O critério de erro adotado nos ajustes das bacias é o do menor valor da Raiz Média Quadrática (RMS), calculada durante o processo iterativo de comparação das bacias teóricas com as bacias medidas na pista. Expressa a ordem de grandeza da média das diferenças observadas entre as deflexões medidas e as calculadas em cada bacia.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (D_{ci} - D_{pi})^2}{n}} \quad (2.6)$$

onde:

RMS - raiz média quadrática;

D_{ci} - deflexão medida no campo na posição $r_x = i$;

D_{pi} - deflexão calculada relativa à posição $r_x = i$; e

N - quantidade de valores D_{ci} (ou D_{pi}) considerados no ajuste.

ALBERNAZ (1997), desenvolveu um programa denominado RETRAN-2CL, destinado a implementar o procedimento de retroanálise de sua autoria.

Recentes contribuições no âmbito da interpretação de bacias de deflexões são encontradas em SUZUKI et al (1998), PREUSSLER et al (2000).

2.4.3 – Métodos Diretos x Métodos Inversos

Segundo CIVIDINI, AL GIONDA,(1994), citado em FARIAS (1996), dentre os métodos considerados iterativos, pode-se diferenciar duas alternativas de análise: o método direto e o método inverso. O método direto, basea-se na minimização de uma função de erro entre os valores medidos e os valores previstos. Já o método inverso, busca estabelecer uma equação não-linear entre os parâmetros a serem retro-analisados e os valores medidos.

Capítulo 3

UM MÉTODO DE RETROANÁLISE DE BACIA DE DEFLEXÃO

3.1 – Introdução

O método proposto visa determinar as características estruturais do conjunto pavimento – subleito, a partir da interpretação de bacias de deflexão obtidas na superfície do pavimento.

As principais características do método são:

- analisa sistemas de três camadas, incluindo o subleito;
- considera o sistema pavimento – subleito como elástico-linear;
- utiliza banco de dados de bacias de deflexão teóricas calculadas analiticamente (PROGRAMA ELSYM5); e
- analisa bacias de deformações levantadas através da viga Benkelman ou FWD.

Em linhas gerais, o método baseia-se nas considerações constantes do trabalho intitulado “Determinação das Características Estruturais de Pavimento, a partir da Linha de Influência Obtida em Ensaios de Carga com Pneus”, apresentado por PEREIRA (1969) do Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa(LNEC)..

As adaptações procedidas no método de PEREIRA (1969), visaram possibilitar sua implementação através de um programa computacional e as modificações inseridas foram basicamente, as seguintes:

- substituição das tabelas de bacias teóricas, calculadas através da utilização de ábacos, por banco de dados de bacias calculadas analiticamente com a utilização do programa ELSYM5; e

- introdução da verificação analítica de tensões e deformações numa quarta camada, (reforço simulado), em substituição ao processo original, onde reduzia o pavimento – subleito existente de três para duas camadas, e acrescentava o reforço, devido a limitação do método que era concebido para somente três camadas.

3.2 – PROCEDIMENTOS GERAIS

3.2.1 – Determinação das Bacias de deflexão Teóricas

3.2.1.1 – Descrição dos Parâmetros Teóricos Contidos no Banco de Dados

As bacias teóricas constantes do banco de dados, foram determinadas através da utilização do programa ELSYM5 e são caracterizadas pelos seguintes parâmetros:

δ_{2r}	: primeira ordenada da bacia normalizada;
$\delta_{4r} / \delta_{2r}$: segunda ordenada da bacia normalizada;
$\delta_{6r} / \delta_{2r}$: terceira ordenada da bacia normalizada;
$\delta_{8r} / \delta_{2r}$: quarta ordenada da bacia normalizada;
$\delta_{10r} / \delta_{2r}$: quinta ordenada da bacia normalizada;
$\delta_{2r} / \delta_{0r}$: relação entre a deflexão distante duas vezes o raio da área de contato e a deflexão máxima;
F_w	: fator de assentamento;
E_1 / E_3	: relação entre os módulos de resiliência da primeira camada e da terceira camada;
E_3 / E_2	: relação entre os módulos de resiliência da terceira camada e da segunda camada;
$H_1(r)$: espessura da 1ª camada em unidade do raio na área de contato; e
$H_2(r)$: espessura da 2ª camada em unidade do raio na área de contato;

O banco de dados possui 96.000 registros contendo os campos com os parâmetros relacionados acima, resultante da combinação das faixas de valores, conforme Quadro 3.1.

QUADRO 3.1 – FAIXA ADOTADA PARA OS PARÂMETROS DO BANCO DE DADOS DESTE TRABALHO

PARÂMETRO	FAIXA
$H_1(r)$	0,4 r a 7,4 r
$H_2(r)$	2,3 r a 8,3 r
E_1 / E_3	1 a 100
E_3 / E_2	0,1 a 10

3.2.1.2 – Procedimentos Adotados para Obtenção dos Parâmetros.

Para obtenção da bacia de deflexão e demais parâmetros teóricos, o programa ELSYM5, foi implementado com valores absolutos de H_1 , H_2 , E_1 , E_2 , E_3 e demais informações complementares, tais como a configuração do carregamento, coeficiente de Poisson, etc.

a) Valores Absolutos de H_1 e H_2 .

Os valores absolutos adotados de H_1 e H_2 , para estabelecer as combinações necessárias, foram estipulados, tendo-se em vista as espessuras correntes de pavimentos observadas no Brasil, compreendidas entre 3 e 85 cm para H_1 e 10 a 95cm para H_2 .

Os valores são implementados, em absoluto, apenas para possibilitar os cálculo do programa. Após determinada a bacia de deflexão teórica, esses valores são convertidos para unidade de raio da área de contato da carga, ou sejam assumem a seguinte configuração:

$$H_1(r) = H_1/r$$

$$H_2(r) = H_2/r$$

onde:

H_1 : é o valor absoluto da espessura da primeira camada de cada combinação;

H_2 : é o valor absoluto da espessura da segunda camada de cada combinação; e

r : é o valor absoluto do raio utilizado apenas na montagem das bacias teóricas.

O valor do Raio (r) da área da carga adotada foi de 10,8 cm, apenas para calcular a bacia de deflexão teórica que é totalmente relativa.

b) Configuração do Carregamento.

Visando a utilização do método, para interpretar bacias de deflexão medidas através de vigas Benkelman e FWD, adotou-se uma configuração simples de carga de 2,05 t e área de 366 cm².

Ressalta-se que esses valores absolutos foram adotados apenas para calcular as bacias teóricas. Os parâmetros do banco de dados são todos relativos.

c) Valores Absolutos de Módulos de Resiliência.

Os módulos de resiliência adotados no cálculo das bacias teóricas, foram escolhidos buscando a obtenção das faixas de $E_1 = 1$ a $100 E_3$ e $E_2 = 0,1$ a $10 E_3$. Procurou-se utilizar baixos valores absolutos, de forma a obter maior sensibilidade na manipulação das deformações produzidas.

Foi adotado em todas as camadas, o coeficiente de Poisson igual a 0,5. Trata-se de uma simplificação necessária, nesse caso de análise.

O erro decorrente da variação do coeficiente de Poisson entre 0,35 e 0,50, foi avaliado e concluiu-se que reflete pouco na forma da bacia de deflexão. Por outro lado, embora variações desse parâmetro entre as camadas, interfira na forma da bacia, sua implementação diferenciada conduziria a um banco de dados proibitivamente extenso.

d) Definição dos Pontos para Cálculo das Deflexões.

O programa ELSYM5, foi implementado com solicitação para fornecer as deformações na superfície ($Z = 0$) em seis pontos, correspondentes as seguintes distâncias em relação ao eixo de uma carga simples.

- 1º ponto - 0 r;
- 2º ponto - 2,097 r;
- 3º ponto - 4,192 r;
- 4º ponto - 6,287 r;
- 5º ponto - 8,384 r; e
- 6º ponto - 10,486 r.

Os valores fracionados, são decorrentes de sucessivas transformações de unidades, adotadas na implementação do ELSYM5, e não interfere na acurácia do método.

As combinações dos parâmetros de entrada do programa ELSYM5, foram geradas automaticamente. Foi criado um programa especial para esse fim, que incumbiu-se de gerar as combinações, alimentar o ELSYM5 e extrair os resultados no arquivo de saída por este gerado, além de montar o Banco de Dados. Todo o processo foi feito de forma automática, para minimizar os erros normais devidos a manipulação de grande quantidade de dados.

e) Fatores de Assentamento (F_w) .

Conforme já visto, além dos valores das relações entre módulos de resiliência, a bacia de deflexão normalizada, as espessuras em relação ao raio da área de contato da carga, consta do banco de dados, o fator de assentamento F_w .

Consoante a metodologia adotada por PEREIRA (1969), a expressão do assentamento na superfície de um sistema homogêneo, isotrópico e constituído por camadas elástico lineares é dada por:

$$\delta = \frac{2 \times (1 - \mu^2) \times \sigma \times r}{E} \times F_w \quad (3.1)$$

onde:

- μ - coeficiente de Poisson;
- F_w - fator de assentamento;
- E - módulo de elasticidade da camada inferior;
- σ - tensão vertical aplicada na superfície; e
- r - raio da área de contato da carga.

PEREIRA (1969), utilizou valores tabelados por JONES para sistemas de tripla camadas e demonstrou a validade da expressão acima para um sistema de três camadas elástico lineares, na seguinte forma:

$$\delta = \frac{2 \times (1 - \mu^2) \times \sigma \times r}{E_3} \times F_w \quad (3.2)$$

onde:

- F_w - é o fator de assentamento que é função de E_2/E_3 ; E_1/E_2 ; $H_1(r)$ e $H_2(r)$
 - E_3 - módulo de resiliência da terceira camada (subleito)
 - μ , σ e r - já definidos anteriormente.
- (3.3)

Daí, o fator F_w , definido no banco de dados foi calculado para cada combinação espessura e módulo, através da expressão:

$$F_w = \frac{E_3 \times \delta_{0r}}{2 \times (1 - \mu^2) \times \sigma \times r}$$

onde:

δ_{0r} - é a deflexão máxima no centro de aplicação da carga (cm).

Considerando os valores adotados para o coeficiente de Poisson $\mu = 0,5$, a tensão vertical $\sigma = 5,6 \text{ Kgf/cm}^2$ e raio da área de contato da carga $r = 10,8 \text{ cm}$, a expressão 3.3 acima, assume a forma:

$$F_w = \frac{E_3 \times \delta_{0r}}{90,72} \quad (3.4)$$

O parâmetro F_w , denominado por BURMISTER, apud MEDINA (1997), como coeficiente de deflexão, foi calculado e apresentado em ábacos e tabelas para várias distâncias radiais de um sistema de duas camadas elásticas. Mais tarde ACUM e FOX aplicaram a mesma teoria para sistema de três camadas.

Em última análise F_w é o fator que ajusta a expressão original de BOUSSINESQ formulada para um meio homogêneo semi infinito, para um sistema estratificado, quando se conhece as relações modulares e as espessuras das camadas envolvidas.

f) – Arquitetura do Banco de Dados Resultante .

O banco de dados resultante tem formato “PARADOX”, com 96.000 casos, contendo 12 campos numéricos do tipo “ponto flutuante”, contendo todos os parâmetros já mencionados em 3.2.1.

O quadro 3.2, ilustra a arquitetura do banco de dados calculados de bacias teóricas.

QUADRO 3.2 - BANCO DE DADOS DE BACIAS TEÓRICAS GERADAS NESTE TRABALHO

REG.	ESPESSURAS (m)		ORDENADAS DA BACIA (NORMALIZADA)					PARÂMETROS			
Num	H1 (r)	H2 (r)	δ_{2r}/δ_{2r} (%)	δ_{4r}/δ_{2r} (%)	δ_{6r}/δ_{2r} (%)	δ_{8r}/δ_{2r} (%)	δ_{10r}/δ_{2r} (%)	E3 / E2	E1 / E3	δ_{2r}/δ_{0r} (%)	FW
1	0,46296	2,31481	100	32,09272	23,15518	18,46748	15,01610	2,00000	5,00000	0,25040	1,24428
2	0,46296	2,31481	100	15,72642	17,23514	15,52749	12,75836				
1989	0,46296	2,31481	100	56,30802	38,04501	27,98172	21,89170	0,44444	25,00000	0,49755	0,45871
1990	0,46296	2,31481	100	53,17500	35,42500	26,05000	20,45833	0,55556	20,00000	0,46030	0,52303
1991	0,46296	2,31481	100	74,08982	57,34786	45,25644	36,38055	0,10526	100,00000	0,70987	0,21270
1992	0,46296	2,31481	100	66,15054	47,78495	36,06022	28,27957	0,21053	50,00000	0,61281	0,30447
1993	0,46296	2,31481	100	60,97983	42,36311	31,40058	24,50720	0,31579	33,33333	0,54905	0,38038
1994	0,46296	2,31481	100	57,13062	38,75089	28,52248	22,29836	0,42105	25,00000	0,50197	0,44796
1995	0,46296	2,31481	100	53,96959	36,07264	26,51182	20,80236	0,52632	20,00000	0,46541	0,51039
1996	0,46296	2,31481	100	74,61559	58,02536	45,94011	37,01106	0,10000	100,00000	0,71371	0,20841
1997	0,46296	2,31481	100	66,75393	48,47295	36,67103	28,78272	0,20000	50,00000	0,61746	0,29789
1998	0,46296	2,31481	100	61,65985	43,04500	31,95792	24,94448	0,30000	33,33333	0,55372	0,37196
1999	0,46296	2,31481	100	57,87988	39,41389	29,03039	22,67728	0,40000	25,00000	0,50660	0,43784
2000	0,46296	2,31481	100	54,76884	36,72089	26,98630	21,14726	0,50000	20,00000	0,47002	0,49855
95987	7,40741	8,33333	100	82,69231	78,24398	75,11655	71,62005	0,22222	50,00000	0,84352	0,04898
95988	7,40741	8,33333	100	82,88288	78,12813	73,87387	69,54454	0,33333	33,33333	0,71065	0,06769
95989	7,40741	8,33333	100	83,33831	77,78441	72,70827	67,78143	0,44444	25,00000	0,63681	0,08441
95990	7,40741	8,33333	100	83,60041	77,19059	71,49676	66,10979	0,55556	20,00000	0,58967	0,09979
95991	7,40741	8,33333	100	86,99261	80,45649	78,32966	76,24173	0,10526	100,00000	1,15469	0,02679
95992	7,40741	8,33333	100	82,64867	78,11033	75,01956	71,55712	0,21053	50,00000	0,84692	0,04844
95993	7,40741	8,33333	100	82,70393	77,92044	73,71601	69,43605	0,31579	33,33333	0,71311	0,06705
95994	7,40741	8,33333	100	83,12312	77,56757	72,55255	67,65766	0,42105	25,00000	0,63842	0,08372
95995	7,40741	8,33333	100	83,37333	76,99691	71,30614	65,95818	0,52632	20,00000	0,59072	0,09907
95996	7,40741	8,33333	100	87,27082	80,56574	78,41802	76,36197	0,10000	100,00000	1,15820	0,02646
95997	7,40741	8,33333	100	82,60784	77,99882	74,92614	71,49892	0,20000	50,00000	0,85013	0,04792
95998	7,40741	8,33333	100	82,55254	77,74120	73,56293	69,33401	0,30000	33,33333	0,71540	0,06645
95999	7,40741	8,33333	100	82,93567	77,37844	72,39505	67,53247	0,40000	25,00000	0,63981	0,08306
96000	7,40741	8,33333	100	83,14374	76,76663	71,14788	65,83937	0,50000	20,00000	0,59168	0,09837

3.2.2 – Compatibilização das Bacias de deflexão de Campo .

3.2.2.1 – Ajuste da Locação das Ordenadas das Bacias de Campo .

As curvas teóricas constantes do banco de dados, foram concebidas para uma configuração de carregamento e locação das deformações conforme o esquema da Figura 3.1.

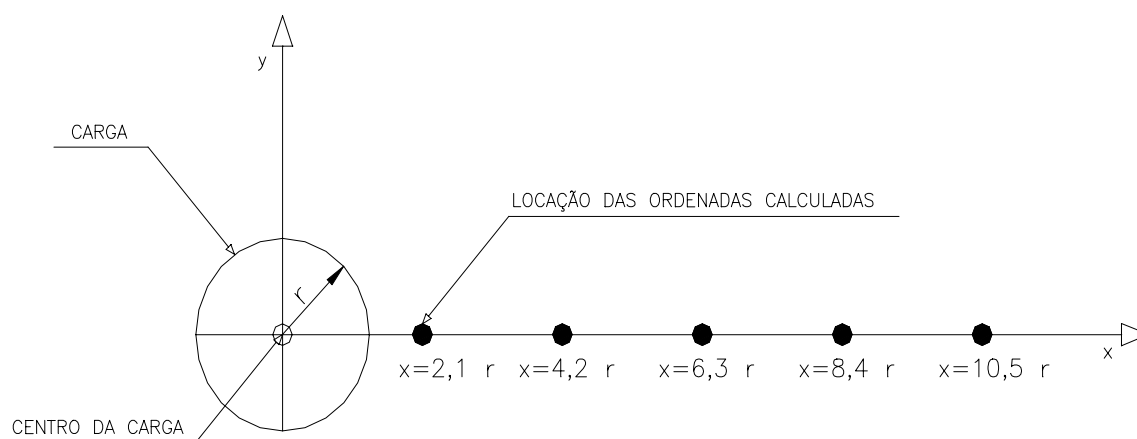


FIGURA 3.1 – Esquema da Locação das Ordenadas das Bacias

Frente a essa disposição das ordenadas das bacias teóricas, fixas em função do raio da carga, a bacia medida no campo, com pontos em tais distâncias do centro da carga, devem ser corrigidas para fornecerem as ordenadas nos pontos correspondentes aos da bacia teórica.

A interpolação é feita com equação do 1º grau, ajustada ao segmento de reta definida pelos dois pontos adjacentes.

Esse procedimento foi adotado, tendo em vista as seguintes considerações:

- 1) A busca pela bacia mais semelhante no banco de dados, é feita através de variáveis discretas ou seja: compara-se cada ordenada da bacia cujos afastamentos da carga são pré definidos, possibilitando assim, o posicionamento adequado dos geofones, no caso de FWD, ou a tomada de leituras, da viga Benkelman, na ocasião das medidas. Vale dizer que o ideal é que as leituras de campo sejam múltiplos dos raios das áreas de contato das cargas.
- 2) Em função da consideração tecida no parágrafo anterior, as coordenadas pré-fixadas pelo método, que são múltiplas dos raios (2,1 r; 4,2 r; 6,3 r; 8,4 r e 10,5 r) sempre estarão próximas das posições das leituras de campo. Sendo assim, a interpolação linear é suficiente.

No caso de bacias determinadas com emprego de FWD, em que os pontos de medidas estão dispostos no eixo longitudinal que passa pelo centro das cargas, o programa faz essa correção por interpolação, de forma a obter as deflexões relativas as distâncias de 2,1r, 4,2r, 6,3r, 8,4r e 10,5r.

No caso de bacias determinadas com a viga Benkelman, cujos pontos de medidas estão dispostos numa linha paralela ao eixo longitudinal que passa pelo centro da carga, antes de proceder a correção da locação, é necessário efetuar uma correção das distâncias ao centro da carga, conforme mostra o esquema constante da Figura 3.2.

Considerando a estrutura como elástico linear, simplificação assumida no presente trabalho, as medidas de deflexão efetuadas na linha longitudinal que passa entre as duas rodas do semi eixo do veículo de teste, são influenciadas pelas duas rodas na mesma proporção. Daí, a deflexão medida pela viga Benkelman no campo, é dividida por dois, para expressar a influência de carga de um único pneu (conforme equação 3.8).

Para considerar a influência de só um pneu, as distâncias das medidas de deflexão da bacia ao centro da carga devem ser corrigidas, um vez que as distâncias de campo, são referenciadas ao centro das duas rodas, e o que se deseja é a distâncias em relação ao centro de uma roda.

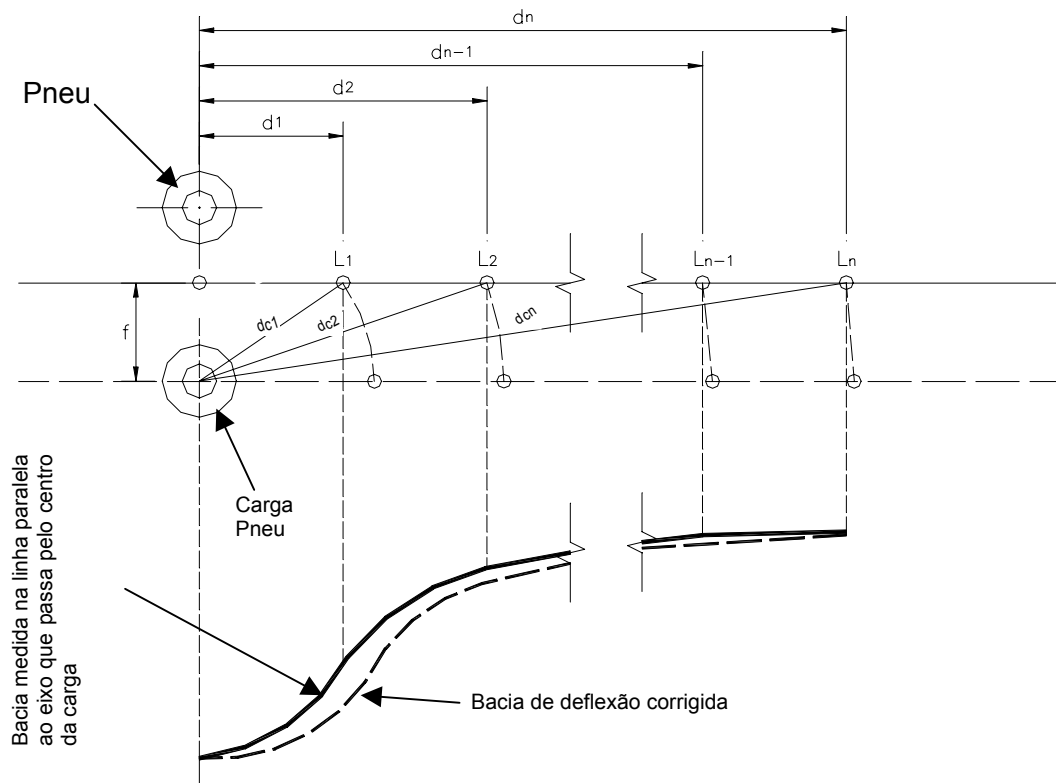


FIGURA 3.2 – Correção da Bacia de Deformação determinada com a viga Benkelman

A correção é procedida pelo programa utilizando a expressão:

$$d_{ci} = \sqrt{f^2 + d_i^2} \quad (3.5)$$

Onde:

d_{ci} = distância corrigida da leitura L_i ao centro das rodas;

d_i = distância medida da L_i ao centro das rodas; e

f = metade do afastamento entre as rodas.

3.2.2.2 – Normalização das Bacias de Campo .

Adotou-se critério de normalizar as bacias de deflexão em relação a deflexão na localização $2r$, obtendo-se:

$\delta_{2r}\%$	- 100%;
$\delta_{4r}\%$	- $\delta_{4r} / \delta_{2r} \times 100$;
$\delta_{6r}\%$	- $\delta_{6r} / \delta_{2r} \times 100$;
$\delta_{8r}\%$	- $\delta_{8r} / \delta_{2r} \times 100$; e
$\delta_{10r}\%$	- $\delta_{10r} / \delta_{2r} \times 100$.

Em alguns outros métodos, a normalização da bacia de campo é feita em função da deflexão máxima medida no centro da carga. Neste método, a normalização da bacia de campo é feita em função da deflexão medida a $2,1r$ tendo em vista as seguintes considerações:

- 1) a configuração da carga de teste é de uma roda simples; e
- 2) no caso de levantamentos defletométricos com emprego de viga Benkelman, não é possível a leitura da deflexão no centro da carga.

3.2.3 – Pesquisa da Bacia Teórica Semelhante a Real Ajustada .

Esse procedimento refere-se a pesquisa do banco de dados, utilizando-se como critério, a condição de semelhança entre as bacias medidas e as bacias teóricas.

O programa permite duas condições de ajuste, a saber:

- 1) pesquisa-se os módulos de resiliência de uma estrutura cujas espessuras foram informadas ao programa; ou
- 2) pesquisa-se uma estrutura com rigidez equivalente, nesse caso, o programa define as espessuras e os módulos de cada camada.

3.2.3.1 – Controle do Ajuste.

O ajuste entre as bacias real e a calculada pode ser controlado estipulando-se o erro máximo admitido.

O critério de erro adotado é o da soma das diferenças absolutas.

$$\epsilon = \sum \sqrt{(dm_i - dt_i)^2} \quad (3.6)$$

onde:

ϵ = erro máximo admitido;

dm_i = deflexão medida no ponto i ; e

dt_i = deflexão teórica calculada no ponto i .

O erro máximo admitido, deve ser informado ao programa, na tela de retroanálise. Caso seja omitida a informação, o programa assume como valor zero. A pesquisa se concluirá quando o erro máximo for satisfeito, ou quando atingir 2000 iterações.

3.2.4 – Cálculo dos Módulos de Resiliência.

Uma vez procedido o ajuste da bacia de deflexão medida, com uma bacia teórica do banco de dados, obtém-se os parâmetros: $[E_1 / E_3]$, $[E_3 / E_2]$, $[\delta_{2r} / \delta_{0r}]$ e $[F_w]$,

disponíveis nos respectivos campos do registro selecionado através do ajustamento estipulado.

a) Módulo de Resiliência do Subleito (E₃)

O cálculo do módulo de resiliência do subleito E₃ na retroanálise, é feito pelo programa utilizando a seguinte expressão:

$$E_3 = \frac{2 \times (1 - \mu^2) \times \sigma \times r}{\delta_{0r}} \times [F_w] b \quad (\text{Kgf/cm}^2) \quad (3.7)$$

Onde:

- σ = pressão de contato em Kgf/cm², utilizada no levantamento da bacia de campo;
- μ = coeficiente de Poisson = 0,50, gerado internamente pelo programa, visto que as bacias teóricas foram calculadas com esse valor;
- r = raio (em cm) da área de contato da carga, utilizada no levantamento das bacias de campo; e
- δ_{0r} = deflexão máxima no centro da carga.

No caso de viga Benkelman, a deflexão máxima no centro da carga é calculada pelo programa através da seguinte expressão:

$$\delta_{0r} = \frac{\delta_{2r}}{2 \times \left[\frac{\delta_{2r}}{\delta_{0r}} \right] b} \quad (\text{cm}) \quad (3.8)$$

onde:

$[\delta_{2r} / \delta_{0r}]^b$ - relação extraída do banco de dados.

No caso de FWD,

δ_{0r} - é a deflexão máxima medida no centro da carga determinada no campo; e

$[F_w] b$ - é o fator ator de assentamento, extraído do banco de dados.

b) Módulo de Resiliência da Primeira Camada (E_1)

$$E_1 = [E_1 / E_3] b \times E_3 \quad (\text{Kgf/cm}^2) \quad (3.9)$$

onde:

E_1 = módulo de resiliência da 1ª camada (Kgf/cm²); e

$[E_1 / E_3] b$ = relação extraída do banco de dados.

c) Módulo de Resiliência da Segunda Camada (E_2)

$$E_2 = [E_3 / E_2] b \times \frac{1}{E_3} \quad (3.10)$$

onde:

E_2 = módulo de resiliência da 2ª camada (Kgf/cm²); e

$[E_3 / E_2] b$ = relação extraída do banco de dados.

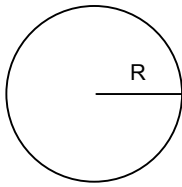
Os resultados da retroanálise é apresentado em relatório, conforme exemplo mostrado na Figura 3.3. Outros exemplos estão apresentados no Anexo A.

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 208+18

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	22 cm
2º	Sub-base	20 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

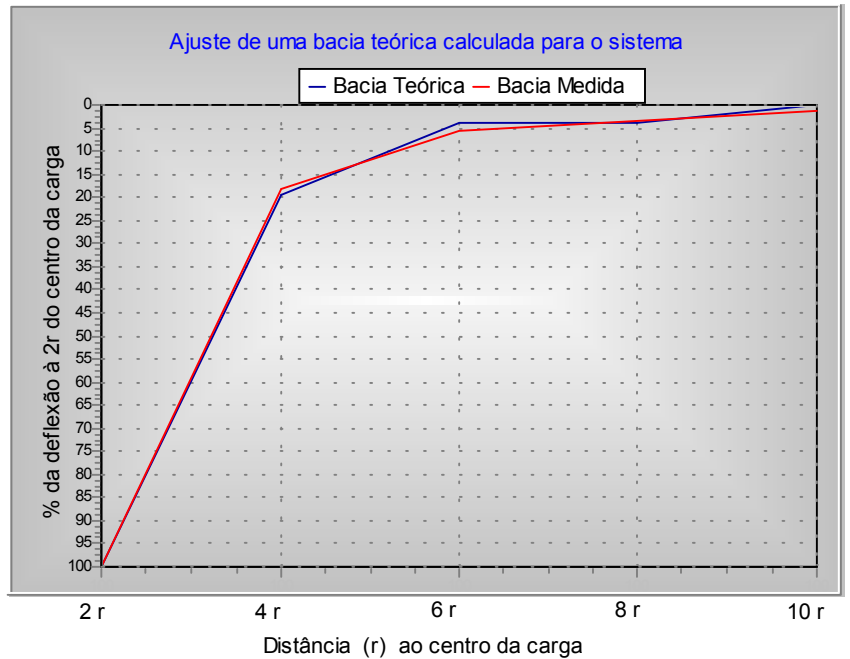
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	18,163849	19,6522
94,80796	5,6310504	3,88245
126,43072	3,5408392	3,88245
158,12888	1,4456442	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 5,024



Parâmetros calculados para a bacia

Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1837,5611 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	183,75611 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1470,0488 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,143 cm

3.2.5 – Determinação de Elementos para Pré-dimensionamento de Reforço.

3.2.5.1 – Curvas de Tensões e Deformações, para Dimensionamento de Reforço de Pavimento.

Incorporou-se ao programa desenvolvido para elaborar a retroanálise, uma rotina destinada a definir o estado de tensão e deformação da estrutura.

O programa simula a introdução de uma camada de reforço com diversas espessuras e traça curvas de tensões e deformações, variando em função da espessura do reforço.

O programa calcula automaticamente as tensões, utilizando-se uma sub-rotina do software JULEA.

A figura 3.4, mostra um exemplo de relatório emitido pelo programa. Outros exemplos estão apresentados no Anexo B.

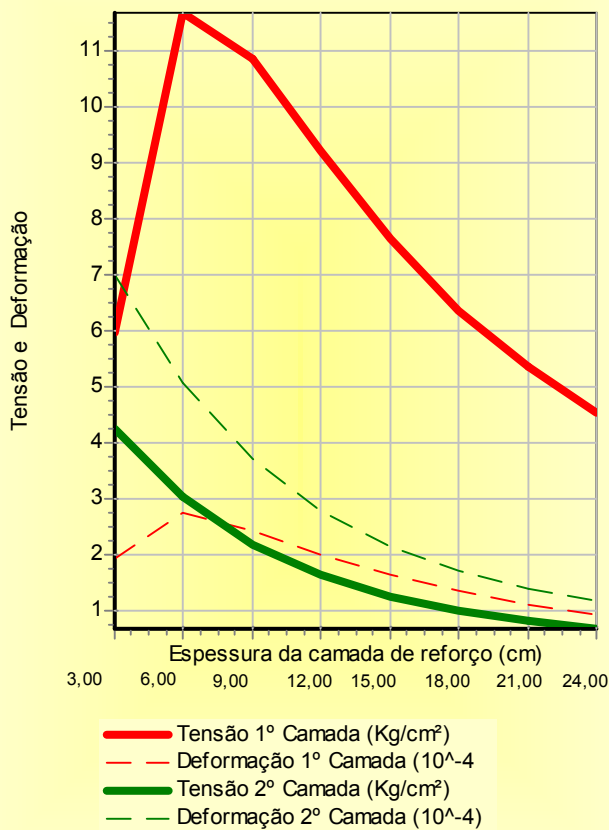
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	17,0	4090,050
3º	Sub-base	23,0	272,670
4º	Subleito	200,0	1363,350

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

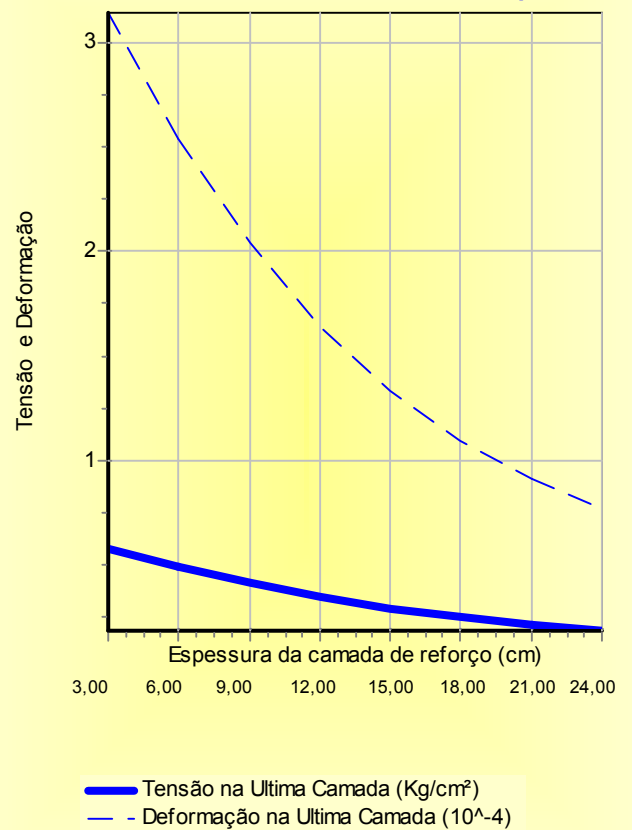
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-5,9537292	-0,0001928	-4,2302908	-0,0007003	0,5769534	0,0003147
5,999	-11,6652818	-0,0002724	-3,0114547	-0,0005065	0,4847439	0,0002543
8,999	-10,8419002	-0,0002407	-2,1763861	-0,0003688	0,4056582	0,0002043
11,999	-9,1916534	-0,0001989	-1,6249493	-0,0002765	0,3392630	0,0001640
14,999	-7,6395120	-0,0001624	-1,2519289	-0,0002139	0,2855435	0,0001330
17,998	-6,3527441	-0,0001333	-0,9909266	-0,0001701	0,2424620	0,0001092
20,998	-5,3328278	-0,0001107	-0,8035102	-0,0001384	0,2079359	0,0000909
23,998	-4,5215872	-0,0000930	-0,6644267	-0,0001148	0,1799684	0,0000766

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



3.2.5.2 – Mapeamento de Tensões e Deformações Objetivando Determinar Fatores de Equivalência de Carga.

Com o intuito de fornecer elementos destinados ao dimensionamento de reforços do pavimento, o programa determina as tensões e deformações horizontais radiais na camada crítica “revestimento”, considerando diversas configurações de carregamento.

Conforme MOTTA (1991), dentre as variáveis que podem afetar significativamente os fatores de equivalência de carga, destacam-se:

a) variáveis da carga:

- grandeza da carga, pressão de contato; e
- configuração do eixo e espaçamento entre eixos e rodas.

b) variáveis do pavimento:

- módulo de resiliência, resistência a ruptura; e
- espessura de cada camada e do subleito.

c) comportamento da estrutura do pavimento em conjunto; e

d) formas de considerar a definição de ruptura e/ou defeitos.

As variações da carga, utilizadas no programa, foram determinadas, tendo-se como base os parâmetros definidos por PEREIRA(1989), conforme constam dos quadros 3.3 a 3.6.

O programa foi instruído para definir as deformações específicas nas locações mostradas esquematicamente na Figura 3.5 em relação à carga.

QUADRO 3.3 - VARIÁVEIS DE CARGA
(PEREIRA, 1989)

EIXO SIMPLES / RODA SIMPLES			
CARGA INCIDENTE NO EIXO W_{SRS}	CARGA INCIDENTE EM UMA RODA $W = \frac{W_{SRS}}{2}$	RAIO DAS ÁREAS DE CONTATO r	PRESSÃO DE INFLAÇÃO DO PNEUMÁTICO P_i
kgf	kgf	cm	kgf/cm ²
500	250	6,5	1,9
750	375	7,8	1,97
1000	500	8,8	2,04
1250	625	9,6	2,18
1500	750	10,1	2,32
1750	875	10,8	2,39
2000	1000	11,2	2,53
2250	1125	11,6	2,67
2500	1250	11,9	2,81
2750	1375	12	3,01
3000	1500	12,3	3,16
3250	1625	12,4	3,37
3500	1750	12,5	3,58
3750	1875	12,5	3,8
4000	2000	12,6	4,01
4250	2125	12,5	4,29
4500	2250	12,6	4,5
4750	2375	12,6	4,78
5000	2500	12,5	5,06
5250	2625	12,5	5,34
5500	2750	12,4	5,69
5750	2875	12,3	6,05
6000	3000	12,2	6,4
6250	3125	12,1	6,75
6500	3250	12,2	6,96
6750	3375	12,2	7,24
7000	3500	12,3	7,31

QUADRO 3.4 - VARIÁVEIS DE CARGA
(PEREIRA, 1989)

EIXO SIMPLES / RODA DUPLA			
CARGA INCIDENTE NO EIXO W_{SRS}	CARGA INCIDENTE EM UMA RODA $W = \frac{W_{SRS}}{2}$	RAIO DAS ÁREAS DE CONTATO r	PRESSÃO DE INFLAÇÃO DO PNEUMÁTICO P_i
kgf	kgf	cm	kgf/cm ²
1000	250	6	2,18
1500	375	7,4	2,18
2000	500	8,4	2,25
2500	625	9,3	2,32
3000	750	9,9	2,46
3500	875	10,1	2,74
4000	1000	10,3	3,02
4500	1125	10,4	3,3
5000	1250	10,5	3,58
5500	1375	10,6	3,87
6000	1500	10,7	4,15
6500	1625	10,7	4,5
7000	1750	10,8	4,78
7500	1875	10,9	5,06
8000	2000	10,9	5,34
8500	2125	11	5,62
9000	2250	10,9	5,98
9500	2375	11	6,26
10000	2500	11	6,54
10500	2625	11,1	6,82
11000	2750	11,1	7,1
11500	2875	11,1	7,45
12000	3000	11,1	7,73
12500	3125	11,2	8,01
13000	3250	11,2	8,3
13500	3375	11,2	8,58
14000	3500	11,2	8,86
14500	3625	11,2	9,14
15000	3750	11,3	9,35
15500	3875	11,4	9,49
16000	4000	11,6	9,49
16500	4125	11,8	9,49
17000	4250	11,9	9,49
17500	4375	12,1	9,49
18000	4500	12,3	9,49
18500	4625	12,4	9,49
19000	4750	12,6	9,49
19500	4875	12,8	9,49
20000	5000	13	9,49
20500	5125	13,1	9,49
21000	5250	13,3	9,49
21500	5375	13,4	9,49
22000	5500	13,6	9,49

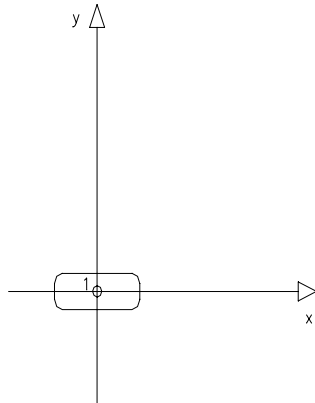
QUADRO 3.5 - VARIÁVEIS DE CARGA
(PEREIRA, 1989)

EIXOS TANDEM DUPLOS / RODAS DUPLAS			
CARGA INCIDENTE NO EIXO W_{SRS}	CARGA INCIDENTE EM UMA RODA $W = \frac{W_{SRS}}{2}$	RAIO DAS ÁREAS DE CONTATO r	PRESSÃO DE INFLAÇÃO DO PNEUMÁTICO p_i
kgf	kgf	cm	kgf/cm ²
4000	500	7,4	2,88
5000	625	8,3	2,88
6000	750	9,1	2,88
7000	875	9,8	2,88
8000	1000	10,5	2,88
9000	1125	10,9	3,02
10000	1250	11,1	3,23
11000	1375	11	3,58
12000	1500	11,1	3,87
13000	1625	11,1	4,22
14000	1750	11	4,57
15000	1875	11	4,92
16000	2000	11	5,27
17000	2125	11	5,62
18000	2250	11	5,91
19000	2375	11	6,19
20000	2500	11,1	6,47
21000	2625	11,1	6,75
22000	2750	11,1	7,1
23000	2875	11,1	7,38
24000	3000	11,2	7,66
25000	3125	11,2	7,94
26000	3250	11,2	8,23
27000	3375	11,2	8,58
28000	3500	11,2	9,14
29000	3625	11,2	9,42
30000	3750	11,3	9,49
31000	3875	11,4	9,49
32000	4000	11,6	9,49
33000	4125	11,8	9,49
34000	4250	11,9	9,49
35000	4375	12,1	9,49
36000	4500	12,3	9,49
37000	4625	12,4	9,49
38000	4750	12,6	9,49
39000	4875	12,8	9,49
40000	5000	13	9,49

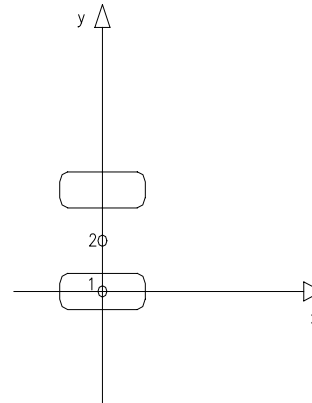
QUADRO 3.6 - VARIÁVEIS DE CARGA
(PEREIRA, 1989)

EIXOS TANDEM TRIPLOS / RODAS DUPLAS			
CARGA INCIDENTE NO EIXO W_{SRS}	CARGA INCIDENTE EM UMA RODA $W = \frac{W_{SRS}}{2}$	RAIO DAS ÁREAS DE CONTATO r	PRESSÃO DE INFLAÇÃO DO PNEUMÁTICO p_i
kgf	kgf	cm	kgf/cm ²
5000	417	6,1	3,52
6000	500	6,7	3,52
7000	583	7,3	3,52
8000	667	7,8	3,52
9000	750	8,2	3,52
10000	833	8,7	3,52
11000	917	9,1	3,52
12000	1000	9,5	3,52
13000	1083	9,9	3,52
14000	1167	10,3	3,52
15000	1250	10,6	3,52
16000	1333	11	3,52
17000	1417	11,3	3,52
18000	1500	11,7	3,52
19000	1583	12	3,52
20000	1667	12,3	3,52
21000	1750	12,3	3,66
22000	1833	12,3	3,87
23000	1917	12,1	4,15
24000	2000	12,1	4,36
25000	2083	12	4,64
26000	2167	11,9	4,85
27000	2250	11,8	5,13
28000	2333	11,8	5,34
29000	2417	11,8	5,55
30000	2500	11,7	5,83
31000	2583	11,7	6,05
32000	2667	11,6	6,33
33000	2750	11,6	6,54
34000	2833	11,6	6,75
35000	2917	11,5	7,03
36000	3000	11,5	7,24
37000	3083	11,4	7,52
38000	3167	11,4	7,73
39000	3250	11,4	7,94
40000	3333	11,4	8,23
41000	3417	11,4	8,44
42000	3500	11,3	8,72
43000	3583	11,3	8,93
44000	3667	11,3	9,21
45000	3750	11,3	9,42
46000	3833	11,3	9,49
47000	3917	11,5	9,49
48000	4000	11,6	9,49
49000	4083	11,7	9,49
50000	4167	11,8	9,49

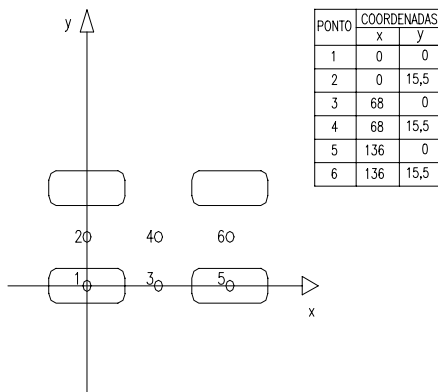
EIXO SIMPLES/RODA SIMPLES



EIXO SIMPLES/RODA DUPLA



EIXO TANDEM DUPLA



EIXO TANDEM TRIPLO

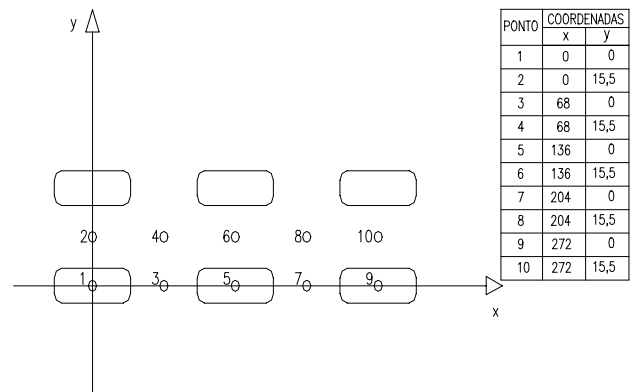


FIGURA 3.5 – Esquema dos pontos de cálculo das tensões e deformações para as várias configurações de eixos

Para os eixos em tandem, o programa analisa os pares de deformação paralelos situados na linha das rodas e nas linhas entre as rodas, de forma a considerar apenas as máximas: entre 1 e 2; entre 3 e 4; entre 7 e 8; e entre 9 e 10.

As deformações específicas foram calculadas para uma camada de revestimento de 8 cm de espessura.

Os fatores de equivalência de carga são calculados pelo programa, considerando a equivalência destrutiva avaliada sob o aspecto de fadiga das camadas críticas do pavimento.

MOTTA (1991), utiliza a Lei de Miner, para expressar o fator de equivalência como:

$$F_{ei} = \frac{Nf}{Ni} \quad (3.11)$$

onde:

F_{ei} = fator de equivalência da carga i ;

Nf = vida de fadiga do pavimento quando submetido a uma carga padrão; e

Ni = vida de fadiga do pavimento quando submetido a carga i qualquer.

Assim, aplicou-se um modelo de vida de fadiga, utilizando-se as deformações de tração devido a cargas de eixos diferenciados da frota nacional

O programa fornece o arquivo contendo as tensões calculadas para as diversas cargas, de forma que se possa utilizar qualquer outro modelo de fadiga, para o cálculo do fator de veículo.

Caso o usuário decida calcular os fatores com o programa, está disponível três modelos de fadiga para concreto betuminoso, e um para camada cimentada.

Permite também, a utilização de um modelo genérico possibilitando a introdução dos coeficientes de ajustes obtidos experimentalmente.

a) Modelo constante do manual de dimensionamento de pavimentos de rodovias e ruas do Asphalt Institute, conforme FRANCO (2000):

$$N_f = 18,4 \times 10^{4,84 \times \frac{V_{efb}}{(V_v + V_{efb})} \times 0,69} \times 0,00432 \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3,291} \times \left(\frac{1}{E} \right)^{0,854} \quad (3.12)$$

onde:

- V_{efb} = teor efetivo de betume em volume da mistura asfáltica = teor de asfalto (% Vol.);
 V_v = teor de vazios em volume da mistura asfáltica, em %;
 N_f = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;
 E^* = módulo da camada de asfalto, em psi; e
 ε_t = deformação de tração no fundo da camada asfáltica.

- b) O modelo da Shell Oil, foi desenvolvido em 1978 e faz parte do manual de dimensionamento de pavimentos de rodovias da Shell, citado em FRANCO (2000)

$$N_f = 0,0685 \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{5,6} \times \left(\frac{1}{E} \right)^{2,363} \quad (3.13)$$

onde:

- N_f = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;
 E^* = módulo da camada de asfalto, em psi; e
 ε_t = deformação de tração no fundo da camada asfáltica.

- c) Modelo sugerido por PINTO (1991)

$$N_f = 2,66 \times 10^{-9} \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3,50} \quad (3.14)$$

onde:

- N_f = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga; e
 ε_t = deformação no fundo da camada asfáltica.

d) Modelo Genérico

$$N_f = A \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^B \quad (3.15)$$

onde:

N_f = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

ε_t = deformação no fundo da camada asfáltica; e

A e B = coeficientes obtidos experimentalmente.

Adotou-se o modelo do USACE, citado em FRANCO (2000) para camadas cimentada.

$$N_f = \left(\frac{142}{\varepsilon_t} \right)^{20,3} \quad (3.16)$$

onde:

N_f = vida de fadiga; e

ε_t = deformação de tração no fundo da camada asfáltica.

O relatório gerado pelo programa permite a avaliação das deformações específicas sob os diversos semi eixos, e entre eles, para cada faixa de carga, conforme exemplo contido no Quadro 3.7. Os valores foram calculados para o pavimento da BR-418/MG – trecho Ataléia – Carlos Chagas, Estaca 688, cujas características estão relacionadas no Quadro 3.8. Outros cálculos são apresentados no Anexo C.

**QUADRO 3.7 - EXEMPLO DE RELATÓRIO DE FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGAS
CALCULADOS NESTA TESE (EIXO TANDEM DUPLO)
Modelo de Fadiga Shell**

Carga Eixo Tandem Duplo	Pontos Analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t
	1°	2°	3°	4°	5°	SHELL
3000	4,83E-05	-3,25E-07	4,83E-05			0,0067
4000	5,35E-05	-3,84E-07	5,35E-05			0,0121
5000	5,84E-05	-4,85E-07	5,84E-05			0,0198
6000	6,22E-05	-5,81E-07	6,22E-05			0,0283
7000	6,48E-05	-6,70E-07	6,48E-05			0,0359
8000	6,70E-05	-7,66E-07	6,70E-05			0,0435
9000	7,14E-05	-8,62E-07	7,14E-05			0,0620
10000	7,69E-05	-9,55E-07	7,69E-05			0,0945
11000	8,49E-05	-1,04E-06	8,49E-05			0,1660
12000	9,21E-05	-1,15E-06	9,21E-05			0,2634
13000	1,00E-04	-1,25E-06	1,00E-04			0,4305
14000	1,08E-04	-1,33E-06	1,08E-04			0,6630
15000	1,17E-04	-1,43E-06	1,17E-04			1,0074
16000	1,25E-04	-1,53E-06	1,25E-04			1,4876
17000	1,33E-04	-1,64E-06	1,33E-04			2,1421
18000	1,40E-04	-1,72E-06	1,40E-04			2,8493
19000	1,47E-04	-1,80E-06	1,47E-04			3,7047
20000	1,54E-04	-1,92E-06	1,54E-04			4,8575
21000	1,61E-04	-2,00E-06	1,61E-04			6,1769
22000	1,69E-04	-2,10E-06	1,69E-04			8,2285
23000	1,76E-04	-2,19E-06	1,76E-04			10,2445
24000	1,83E-04	-2,31E-06	1,83E-04			12,9020
25000	1,90E-04	-2,39E-06	1,90E-04			15,8152
26000	1,97E-04	-2,48E-06	1,97E-04			19,3826
27000	2,05E-04	-2,58E-06	2,05E-04			24,5471
28000	2,12E-04	-2,67E-06	2,12E-04			29,4501
29000	2,18E-04	-2,75E-06	2,18E-04			35,1329
30000	2,26E-04	-2,89E-06	2,26E-04			42,5065
31000	2,28E-04	-2,96E-06	2,28E-04			45,1449
32000	2,30E-04	-3,06E-06	2,30E-04			46,8344
33000	2,31E-04	-3,16E-06	2,31E-04			48,4198
34000	2,32E-04	-3,21E-06	2,32E-04			49,0893
35000	2,33E-04	-3,31E-06	2,33E-04			50,6914
36000	2,34E-04	-3,42E-06	2,34E-04			52,1452
37000	2,35E-04	-3,47E-06	2,35E-04			52,8427
38000	2,40E-04	-3,58E-06	2,40E-04			59,4832
39000	2,45E-04	-3,69E-06	2,45E-04			67,8772
40000	2,51E-04	-3,80E-06	2,51E-04			77,2287

3.3 – Análise Crítica de Resultados Obtidos.

Para fins de verificação da eficiência do método e do programa desenvolvido nesta tese, procedeu-se a aplicação em diversas bacias de deflexão medidas através de viga Benkelman e FWD.

Os resultados obtidos estão apresentados e discutidos nesse item.

3.3.1 – Aplicação do Método para Interpretação de Bacias de deflexão

Afim de testar à metodologia proposta, adotou-se os seguintes procedimentos:

Procedeu-se a retroanálise de bacias de deflexão, obtidos em MACÊDO (1996), referente a Rodovia BR-418 – Trecho Ataléia – Carlos Chagas, que foi objeto de estudos, e que dispõe de dados comparativos.

Vale ressaltar que MACÊDO (1996), realizou a retroanálise através da utilização do Programa RETROANA que utiliza o método numérico das camadas finitas, enquanto que o programa ELSYM5, utilizado nesta tese para cálculo das bacias teóricas, utiliza o método numérico das diferenças finitas. Daí, uma comparação em termos de valor de módulos de resiliência isoladamente, pode guardar discrepância inerentes ao método de cálculo adotado.

Foi elaborado uma análise estatística nos valores dos módulos de resiliência obtidos nos dois procedimentos, mostrada no Quadro 3.8

QUADRO 3.8 - QUADRO COMPARATIVO DOS MÓDULOS RETROANALISADOS NESTA TESE COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS POR MACÊDO (1996)

ESTACA	CAPA (cm)	BASE (cm)	SUB BASE (cm)	ERRO % FWD	DEFLEXÕES (0,01mm) - FWD							MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS LADO ESQUERDO - MACEDO (kgf/cm2)			MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS - REPAV (kgf/cm2)		
					0	20	30	45	65	90	120	B	SB	SL	B	SB	SL
100+12,00	2,50	20,00	16,50	14,5	142	82	51	22	8	4	2	1470	300	1610	1851	185	1480
208+18,00	4,00	18,00	20,00	10,8	143	91	54	21	8	3	2	1500	300	1400	1838	184	1470
370+04,00	4,00	20,00	25,00	9,9	127	83	48	20	8	3	2	1540	410	1690	2069	207	1655
509+16,00	4,00	18,00	18,00	8,2	137	76	44	17	6	3	3	1750	300	1785	1918	192	1534
588+00,00	4,00	13,00	23,00	12,3	122	62	32	12	5	3	2	2080	300	2120	4090	273	1363
688+00,00	4,00	20,00	20,00	7,3	121	65	34	13	6	4	3	1640	370	1420	1717	343	1717
829+08,00	4,00	20,00	20,00	10,8	117	62	32	10	4	3	3	1560	420	1925	1776	355	1776
1115+14,00	3,00	20,00	27,00	14,2	134	84	48	17	5	4	3	1700	600	1980	1896	190	1896
1134+08,00	2,00	18,00	20,00	6,5	131	76	48	23	13	8	6	1666	360	1510	1170	439	1462
1266+04,00	4,00	24,00	16,00	8,8	147	86	54	28	15	9	8	1350	300	1300	1052	421	1052
1285+00,00	3,00	15,00	28,00	10,2	130	74	39	14	6	4	4	1690	410	2230	1663	333	1330
1373+00,00	4,00	20,00	29,00	12,6	125	69	38	15	5	3	2	1350	700	1840	2102	210	1682
1490+10,00	5,00	17,00	20,00	4,5	108	66	40	17	6	3	3	1720	460	2230	1924	385	1924
1591+00,00	4,00	11,00	30,00	4,7	134	66	31	6	3	2	2	1400	910	1700	2854	285	1713
1657+04,00	4,00	13,00	22,00	4,8	100	57	31	12	6	5	4	1940	740	2080	3380	507	1690
1694+00,00	5,00	16,00	28,00	12,0	128	60	23	6	4	3	2	1200	800	1625	1623	325	1623
1784+00,00	5,00	14,00	25,00	9,9	106	61	36	14	6	3	2	2010	600	1520	2479	248	1983
1836+16,00	4,00	16,00	23,00	8,9	73	40	20	9	3	2	2	2800	1060	2120	2846	569	2846
1863+02,00	4,00	15,00	32,00	18,2	80	42	24	11	7	5	5	2100	1100	1980	1957	978	1957
1969+08,00	4,00	14,00	25,00	16,4	90	48	25	9	3	3	2	2460	870	2300	2308	462	2308
2093+00,00	5,00	15,00	30,00	11,8	98	54	30	16	9	6	4	2050	880	1310	2646	397	1323
2137+16,00	4,00	17,00	30,00	13,8	107	63	35	16	8	5	3	1480	810	1670	2020	404	1616
2251+00,00	4,00	16,00	18,00	9,3	125	77	45	23	12	7	5	1660	420	1320	2074	311	1037
2364+00,00	5,00	15,00	20,00	9,4	112	58	32	13	6	5	4	1740	485	1500	1639	492	1639
2569+00,00	4,00	17,00	35,00	6,6	106	61	38	18	8	4	3	1700	690	1420	2613	261	1568

Observação: B = Base

SB = Sub Base

SL = Subleito

Foram retroanalizadas um total de 25 bacias, para as quais MACÊDO (1996) também determinou os módulos de resiliência através da retroanálise. Foram obtidos os seguintes valores estatísticos comparativos:

- **REPAV**

Camada de base:

MR médio = 1962 Kgf/cm²

Desvio padrão = 177 Kgf/cm²

Camada de sub-base:

MR médio = 358 Kgf/cm²

Desvio padrão = 177 Kgf/cm²

Camada de subleito:

MR médio = 1676 Kgf/cm²

Desvio padrão = 394 Kgf/cm²

- **MACÊDO**

Camada de base

MR médio = 1733 Kgf/cm²

Desvio Padrão = 436 Kgf/cm²

Camada de sub-base

MR médio = 574 Kgf/cm²

Desvio Padrão = 252 Kgf/cm²

Camada de subleito

MR médio = 1713 Kgf/cm²

Desvio Padrão = 320 Kgf/cm²

Nos quadros 3.9 e 3.10 estão transcritos os valores característicos da estrutura do pavimento e os valores dos módulos de resiliência retroanalizados para as camadas de base, subbase e subleito. Os resultados obtidos pelo programa desenvolvido encontram-se tabulados de forma a permitir comparação com os resultados obtidos por MACÊDO (1996).

A figura 3.6, mostra graficamente a comparação entre os valores obtidos nesta tese com os módulos obtidos por MACÊDO (1996).

MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS LADO ESQUERDO - MACÊDO x REPAV (kgf/cm²)

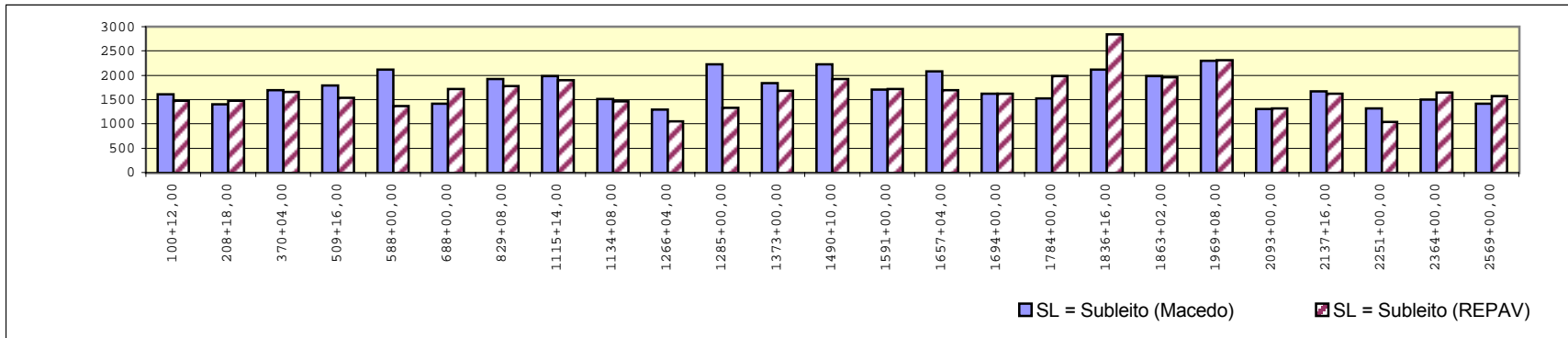
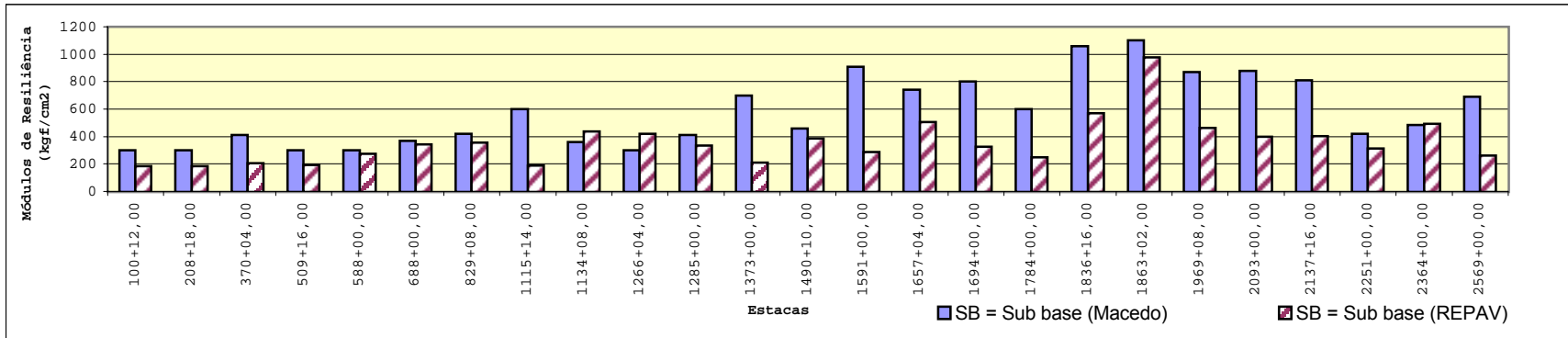
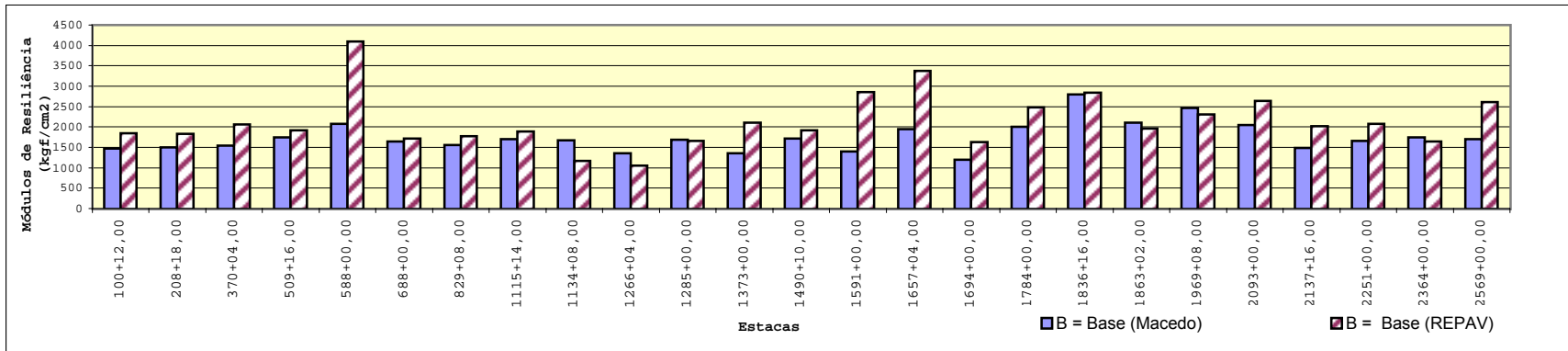


FIGURA 3.6 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS NESTA TESE COM OS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS POR MACÊDO (1996)

MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS LADO DIREITO - MACEDO x REPAV (kgf/cm²)

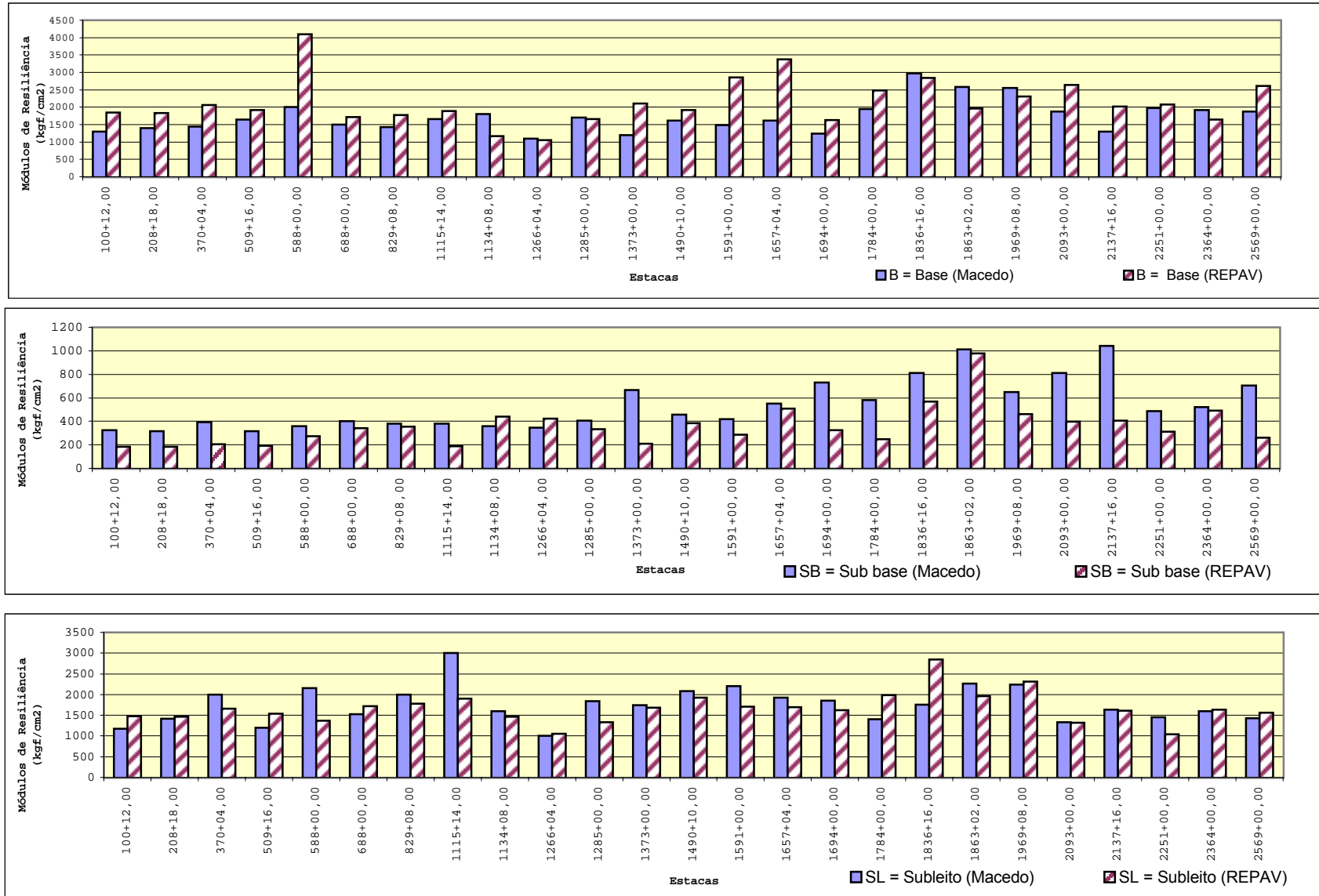


FIGURA 3.6 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS NESTA TESE COM OS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS POR MACÊDO (1996)

QUADRO 3.9 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIAS RETROANALISADOS NESTA TESE E POR MACÊDO (1996)

Rodovia: BR-418/MG

Trecho: Ataléia - Carlos Chagas

Lado Esquerdo

ESTACA	CAPA (cm)	BASE (cm)	SUB BASE (cm)	ERRO % FWD	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS LADO ESQUERDO - MACEDO (kgf/cm2)			MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS - REPAV (kgf/cm2)			DIFERENÇAS OBSERVADAS %		
					B	SB	SL	B	SB	SL	B	SB	SL
100+12,00	2,50	20,00	16,50	14,5	1470	300	1610	1851	185	1480	25,9	38,3	8,0
208+18,00	4,00	18,00	20,00	10,8	1500	300	1400	1838	184	1470	22,5	38,7	5,0
370+04,00	4,00	20,00	25,00	9,9	1540	410	1690	2069	207	1655	34,4	49,5	2,1
509+16,00	4,00	18,00	18,00	8,2	1750	300	1785	1918	192	1534	9,6	36,1	14,0
688+00,00	4,00	20,00	20,00	7,3	1640	370	1420	1717	343	1717	4,7	7,2	20,9
829+08,00	4,00	20,00	20,00	10,8	1560	420	1925	1776	355	1776	13,8	15,4	7,8
1115+14,00	3,00	20,00	27,00	14,2	1700	600	1980	1896	190	1896	11,5	68,4	4,3
1134+08,00	2,00	18,00	20,00	6,5	1666	360	1510	1170	439	1462	29,8	21,8	3,2
1266+04,00	4,00	24,00	16,00	8,8	1350	300	1300	1052	421	1052	22,1	40,3	19,1
1285+00,00	3,00	15,00	28,00	10,2	1690	410	2230	1663	333	1330	1,6	18,9	40,4
1373+00,00	4,00	20,00	29,00	12,6	1350	700	1840	2102	210	1682	55,7	70,0	8,6
1490+10,00	5,00	17,00	20,00	4,5	1720	460	2230	1924	385	1924	11,8	16,4	13,7
1694+00,00	5,00	16,00	28,00	12,0	1200	800	1625	1623	325	1623	35,3	59,4	0,1
1784+00,00	5,00	14,00	25,00	9,9	2010	600	1520	2479	248	1983	23,3	58,7	30,5
1836+16,00	4,00	16,00	23,00	8,9	2800	1060	2120	2846	569	2846	1,6	46,3	34,2
1863+02,00	4,00	15,00	32,00	18,2	2100	1100	1980	1957	978	1957	6,8	11,1	1,2
1969+08,00	4,00	14,00	25,00	16,4	2460	870	2300	2308	462	2308	6,2	46,9	0,4
2093+00,00	5,00	15,00	30,00	11,8	2050	880	1310	2646	397	1323	29,1	54,9	1,0
2137+16,00	4,00	17,00	30,00	13,8	1480	810	1670	2020	404	1616	36,5	50,1	3,2
2251+00,00	4,00	16,00	18,00	9,3	1660	420	1320	2074	311	1037	24,9	25,9	21,4
2364+00,00	5,00	15,00	20,00	9,4	1740	485	1500	1639	492	1639	5,8	1,4	9,3
2569+00,00	4,00	17,00	35,00	6,6	1700	690	1420	2613	261	1568	53,7	62,1	10,4
MÉDIA					1733,5	574,8	1713,0	1962,7	358,6	1676,3	21,2	38,1	11,8
DESVIO PADRÃO					367,4	252,7	320,4	436,5	177,2	394,7	15,6	20,6	11,5

Observação: B = Base

SB = Sub Base

SL = Subleito

QUADRO 3.10 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIAS RETROANALISADOS NESTA TESE E POR MACÊDO (1996)

Rodovia: BR-418/MG

Trecho: Ataléia - Carlos Chagas

Lado direito

ESTACA	CAPA (cm)	BASE (cm)	SUB BASE (cm)	REFORÇO (cm)	ERRO % FWD	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS LADO DIREITO - MACEDO (kgf/cm2)			MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS - REPAV (kgf/cm2)			DIFERENÇAS OBSERVADAS %		
						B	SB	SL	B	SB	SL	B	SB	SL
100+12,00	2,50	20,00	16,50	20,00	14,5	1300	323	1180	1851	185	1480	42,3	42,7	25,5
208+18,00	4,00	18,00	20,00	20,00	10,8	1392	314	1419	1838	184	1470	32,0	41,5	3,6
370+04,00	4,00	20,00	25,00	20,00	9,9	1443	393	2002	2069	207	1655	43,4	47,4	17,3
509+16,00	4,00	18,00	18,00	20,00	8,2	1638	318	1204	1918	192	1534	17,1	39,7	27,4
688+00,00	4,00	20,00	20,00	20,00	7,3	1500	403	1520	1717	343	1717	14,5	14,8	13,0
829+08,00	4,00	20,00	20,00	20,00	10,8	1430	382	2000	1776	355	1776	24,2	7,0	11,2
1115+14,00	3,00	20,00	27,00	20,00	14,2	1660	382	2999	1896	190	1896	14,2	50,4	36,8
1134+08,00	2,00	18,00	20,00	20,00	6,5	1800	360	1600	1170	439	1462	35,0	21,8	8,6
1266+04,00	4,00	24,00	16,00	20,00	8,8	1100	345	1008	1052	421	1052	4,4	22,0	4,4
1285+00,00	3,00	15,00	28,00	20,00	10,2	1699	405	1842	1663	333	1330	2,1	17,9	27,8
1373+00,00	4,00	20,00	29,00	20,00	12,6	1200	666	1750	2102	210	1682	75,2	68,4	3,9
1490+10,00	5,00	17,00	20,00	20,00	4,5	1622	456	2084	1924	385	1924	18,6	15,6	7,7
1694+00,00	5,00	16,00	28,00	20,00	12,0	1240	730	1850	1623	325	1623	30,9	55,5	12,3
1784+00,00	5,00	14,00	25,00	20,00	9,9	1950	580	1400	2479	248	1983	27,1	57,3	41,7
1836+16,00	4,00	16,00	23,00	20,00	8,9	2965	812	1760	2846	569	2846	4,0	29,9	61,7
1863+02,00	4,00	15,00	32,00	20,00	18,2	2580	1013	2259	1957	978	1957	24,2	3,4	13,4
1969+08,00	4,00	14,00	25,00	20,00	16,4	2550	650	2240	2308	462	2308	9,5	29,0	3,1
2093+00,00	5,00	15,00	30,00	20,00	11,8	1881	811	1335	2646	397	1323	40,6	51,1	0,9
2137+16,00	4,00	17,00	30,00	20,00	13,8	1300	1040	1638	2020	404	1616	55,4	61,2	1,3
2251+00,00	4,00	16,00	18,00	20,00	9,3	1977	486	1459	2074	311	1037	4,9	36,0	28,9
2364+00,00	5,00	15,00	20,00	20,00	9,4	1921	520	1602	1639	492	1639	14,7	5,4	2,3
2569+00,00	4,00	17,00	35,00	20,00	6,6	1870	706	1429	2613	261	1568	39,7	63,0	9,7
MÉDIA						1728,1	549,8	1708,2	1962,7	358,6	1676,3	26,1	35,5	16,5
DESVIO PADRÃO						476,4	223,5	444,7	436,5	177,2	394,7	18,5	20,0	15,7

Observação: B = Base

SB = Sub Base

SL = Subleito

Os resultados estatísticos mostram que existe uma boa aproximação entre os resultados obtidos nos dois procedimentos.

Na mesma série de bacias de deflexão, retroanalizadas, procurou-se verificar os níveis de erros observados no ajustamento das bacias teóricas com as bacias de campo, quando não estipulado o erro máximo.

Nas figuras 3.7 a 3.8, apresenta-se a distribuição dos erros verificados nas retroanálises das bacias levantadas com FWD e com viga Benkelman.

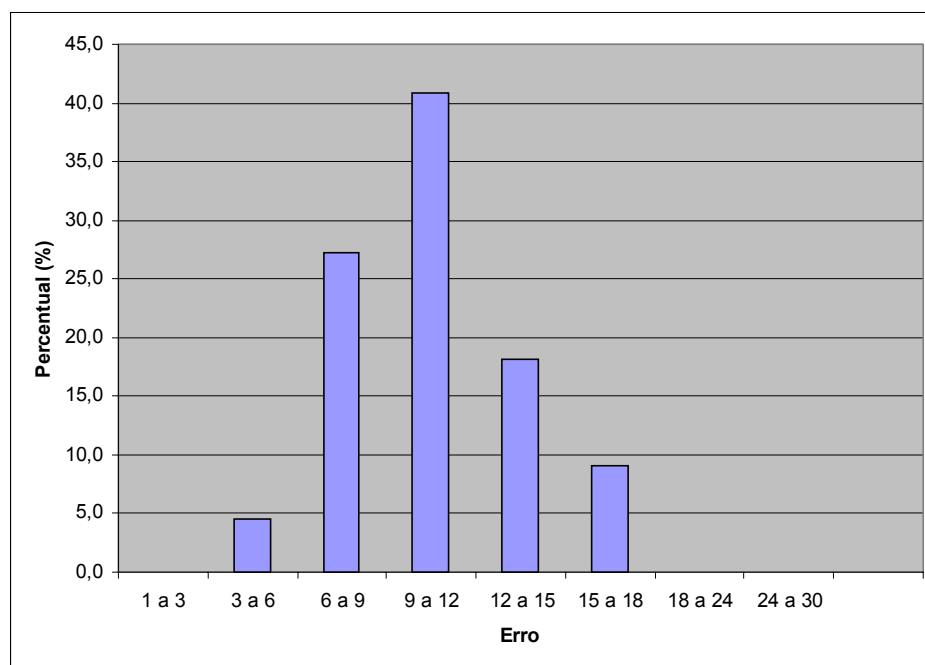


FIGURA 3.7 – Distribuição de erros obtidos no ajustamento da retroanálise, após 2.000 iterações – bacias levantadas com FWD

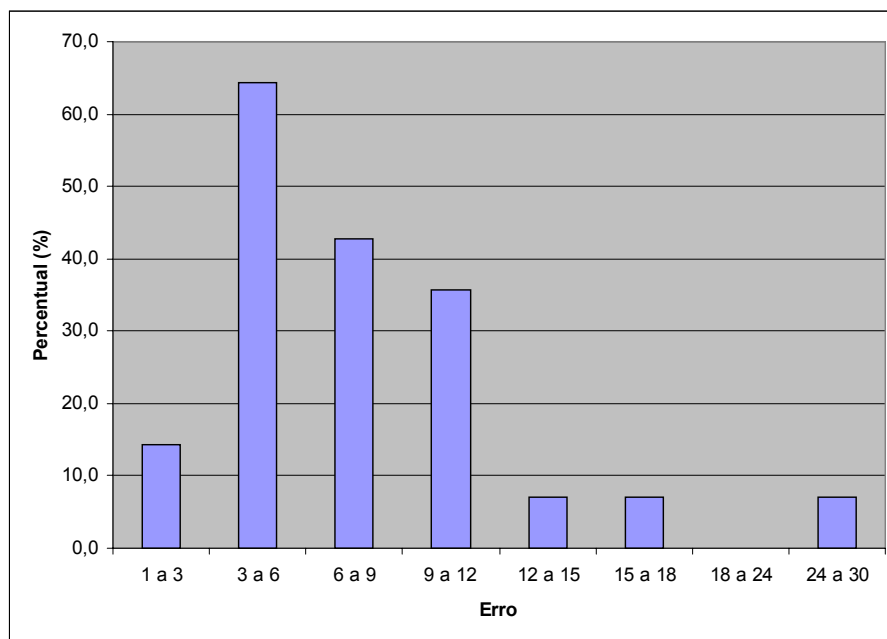


FIGURA 3.8 – Distribuição de erros obtidos no ajustamento da retroanálise, após 2.000 iterações – bacias levantadas com viga Benkelman

Concluiu-se que para esse caso, o método é mais eficiente quando retroanalisado em bacias levantadas com a viga Benkelman.

Visando aferir a validade dos módulos de resiliência, obtidos na retroanálise, adotou-se os seguintes procedimentos:

- procedeu-se a retroanálise das bacias de campo;
- com os módulos de elasticidade obtidos, utilizou-se o programa ELSYM5 para calcular a bacia de deflexão; e
- comparou-se a bacia de campo com a bacia recalculada pelo ELSYM5.

Os resultados obtidos, constam das figuras 3.9 e 3.10

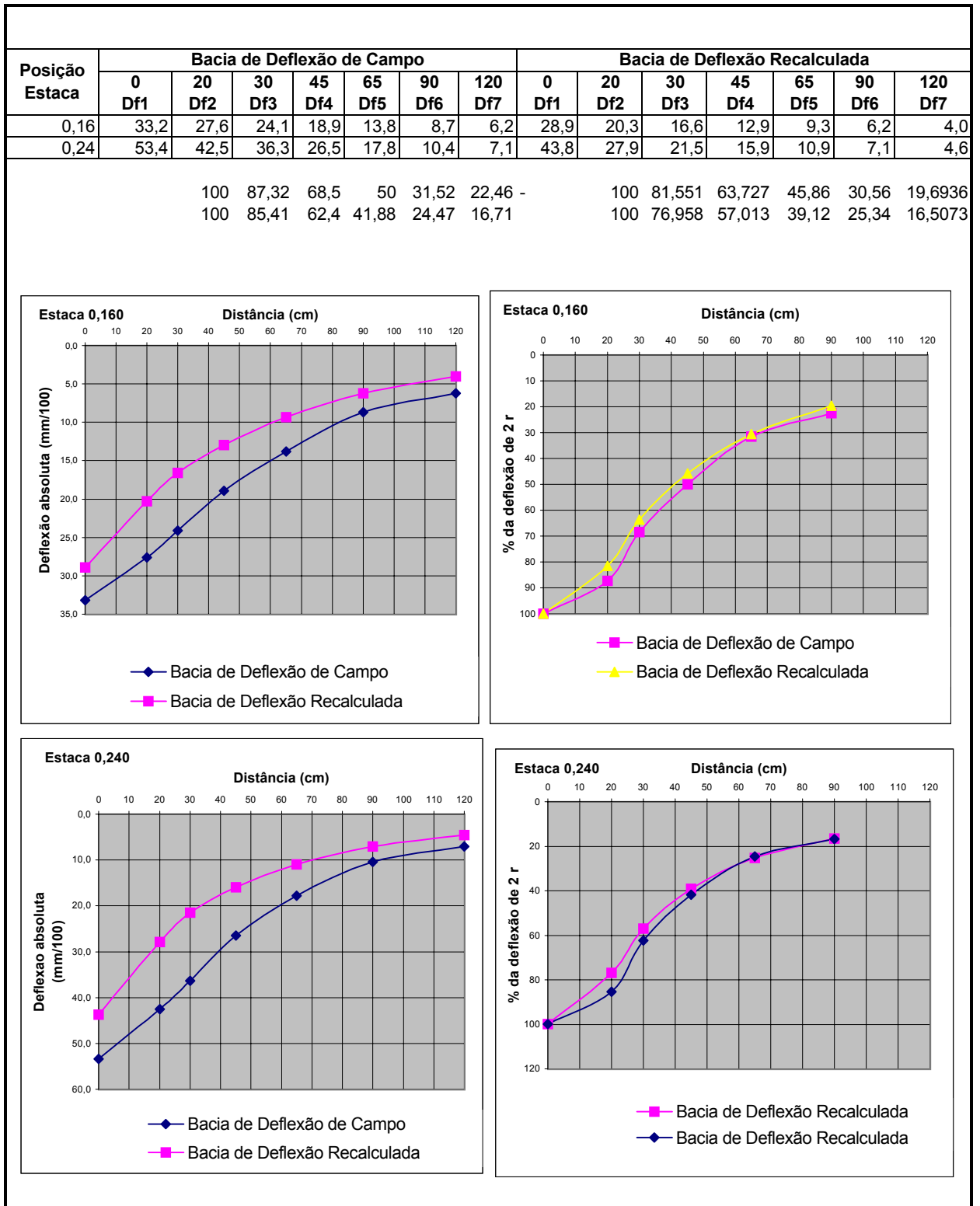
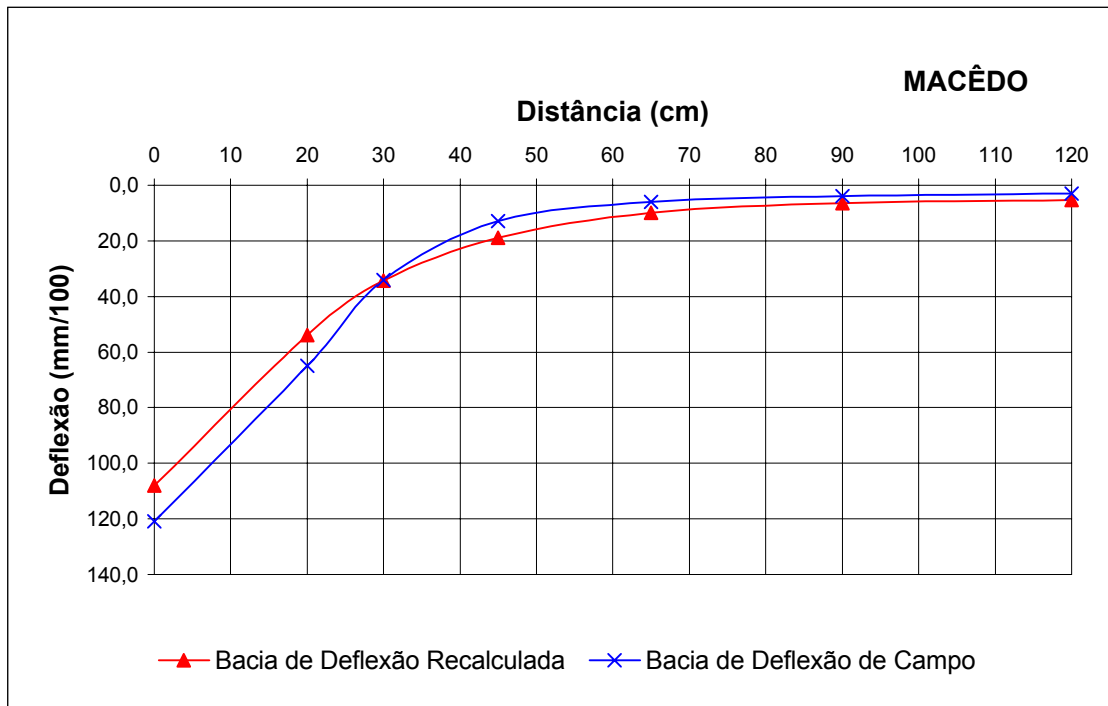
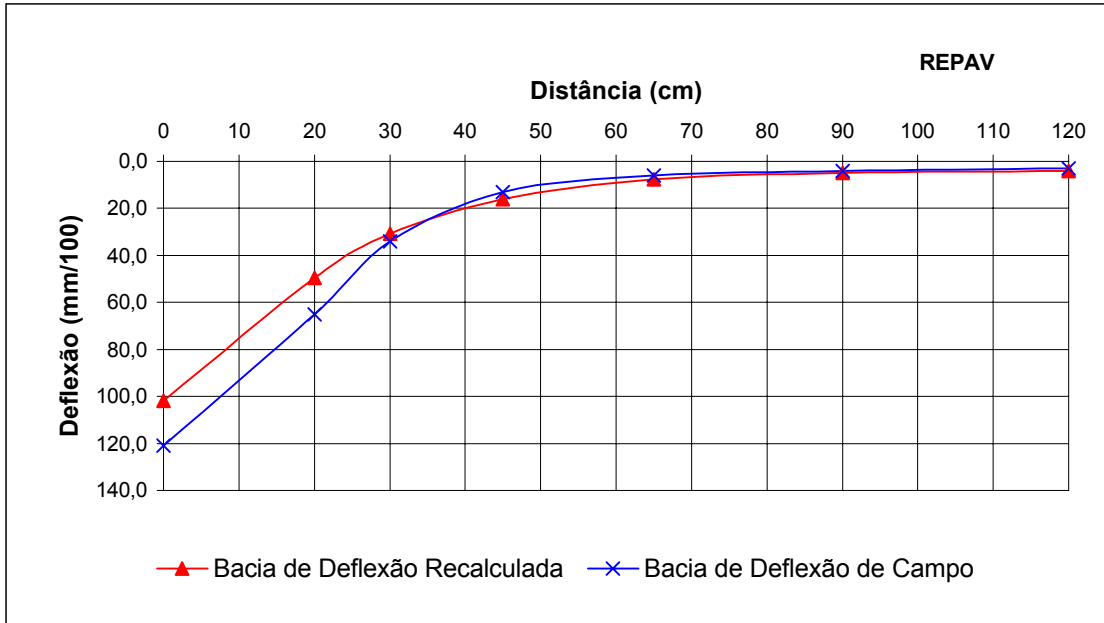
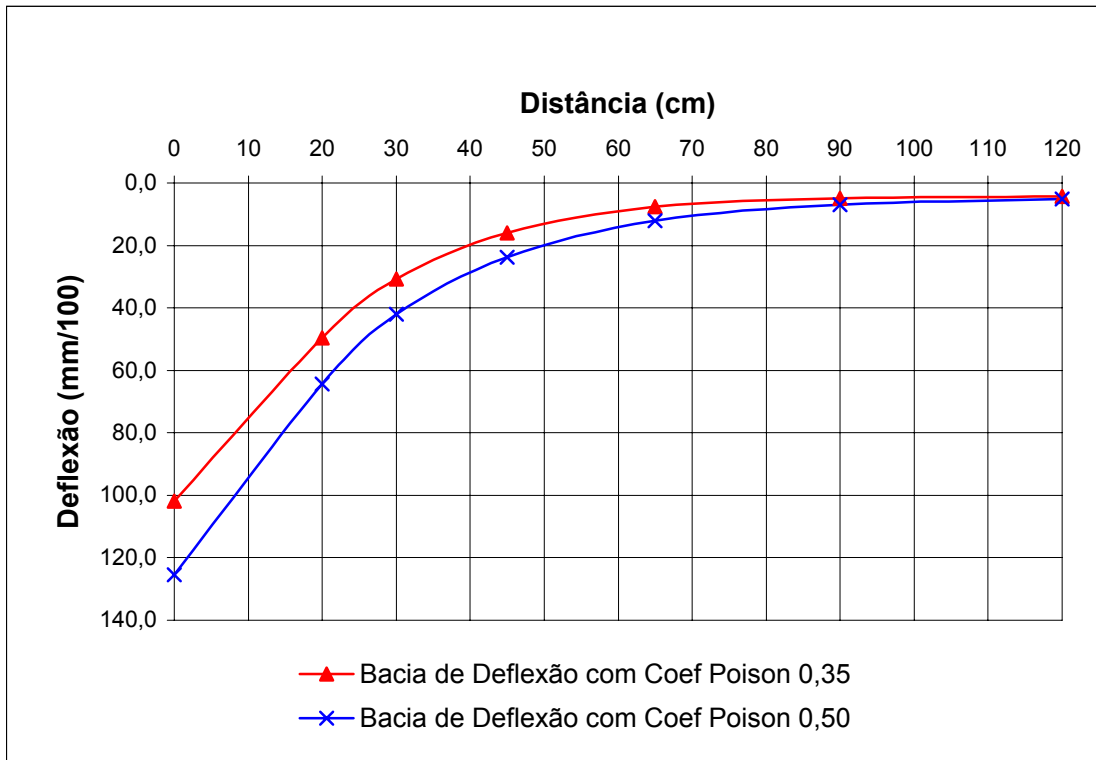


FIGURA 3.9 - Comparação entre a bacia medida no campo e a bacia recalculada pelo ELSYM5 estaca 160 e 240 BR-101/RJ - Angra dos Reis- Tarituba - Viga Benkelman



**FIGURA 3.10 - Comparação entre a bacia medida no campo e a bacia recalculada pelo ELSYM5
BR-418/MG - Trecho Ataleia-Carlos Chagas - est. 688 - FWD**



**FIGURA 3.11 - Comparação entre a bacia medida no campo e a bacia recalculada pelo ELSYM5
BR-418/MG - Trecho Ataleia-Carlos Chagas - est. 688 - FWD**

3.3.2 - Resultados obtidos na aplicação do método para cálculo dos fatores de equivalência de cargas

Foram calculados os fatores de equivalência de cargas, conforme a metodologia descrita nesta dissertação, utilizando-se os resultados das retroanálises elaboradas para a Rodovia BR-418/MG trecho Ataléia Carlos Chagas, obtendo-se os resultados transcritos no Quadro 3.11 . Calculou-se também os fatores de equivalência baseado na metodologia da AASHTO e do USACE, conforme o Manual de Reabilitação de Pavimentos do DNER(1998). A comparação estabelecida permite avaliar a diferença que se manifesta, podendo-se observar que é mais acentuada maior com relação aos equivalentes calculados pela metodologia do USACE. A constatação é coerente, em se considerando que os efeitos para os quais foi estabelecida a equivalência são diferentes . Para rápida visualização, os resultados obtidos na aplicação das três metodologias, constam da Figura 3.12.

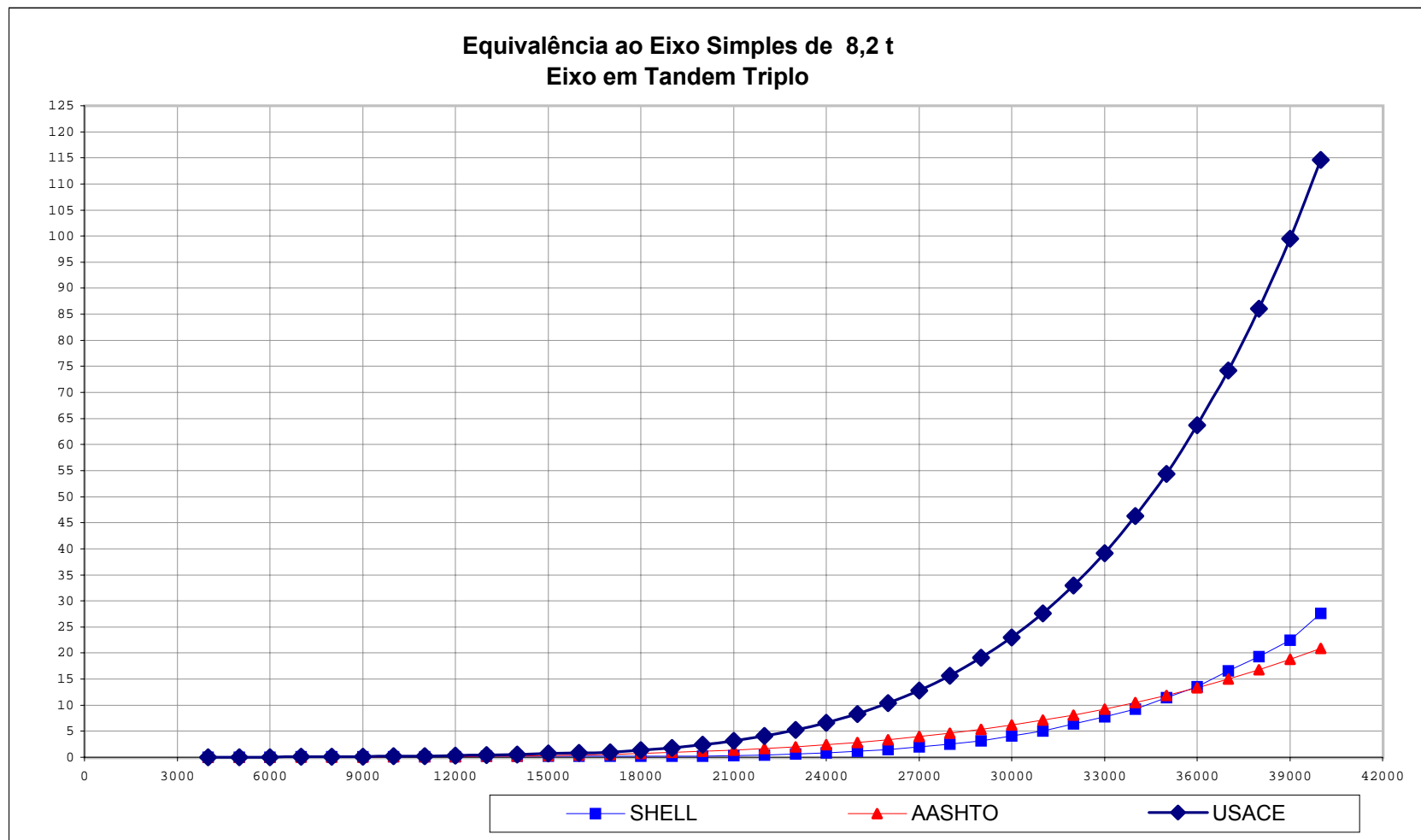


FIGURA 3.12 - COMPARAÇÃO ENTRE OS FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGAS CALCULADOS PELA METODOLOGIA PROPOSTA NESTA E AQUELES CALCULADOS PELOS MÉTODOS DA AASHTO E DO USACE (DNER,1998)

QUADRO 3.11 - COMPARAÇÃO ENTRE OS FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE E AS EQUIVALÊNCIAS CALCULADAS ATRAVÉS DO MÉTODO DA AASHTO E DO USACE

Eixo TandemTriplo Carga (kgf)	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t		
	1°	2°	3°	4°	5°	SHELL	AASHTO	USACE
4000	2,02E+10	3,48E+08	2,02E+10	3,48E+08	2,02E+10	0,022887	0,001257	0,00841
5000	2,06E+10	3,62E+08	2,06E+10	3,62E+08	2,06E+10	0,025699	0,003222	0,01779
6000	2,23E+10	4,37E+08	2,22E+10	4,37E+08	2,23E+10	0,039914	0,006955	0,03280
7000	2,38E+10	5,18E+08	2,37E+10	5,18E+08	2,38E+10	0,057747	0,01333	0,05501
8000	2,49E+10	5,92E+08	2,49E+10	5,92E+08	2,49E+10	0,07516	0,023419	0,08610
9000	2,57E+10	6,54E+08	2,57E+10	6,54E+08	2,57E+10	0,090396	0,038497	0,12782
10000	2,67E+10	7,37E+08	2,66E+10	7,37E+08	2,67E+10	0,11088	0,060052	0,18201
11000	2,74E+10	8,07E+08	2,73E+10	8,07E+08	2,74E+10	0,127983	0,089785	0,25059
12000	2,80E+10	8,79E+08	2,79E+10	8,79E+08	2,80E+10	0,145275	0,12962	0,33554
13000	2,86E+10	9,55E+08	2,85E+10	9,55E+08	2,86E+10	0,16261	0,181705	0,43891
14000	2,91E+10	1,03E+09	2,90E+10	1,03E+09	2,91E+10	0,179613	0,24842	0,56279
15000	2,94E+10	1,09E+09	2,93E+10	1,09E+09	2,94E+10	0,192048	0,332378	0,70937
16000	2,98E+10	1,18E+09	2,97E+10	1,18E+09	2,98E+10	0,208182	0,436429	0,88085
17000	3,01E+10	1,24E+09	3,00E+10	1,24E+09	3,01E+10	0,219588	0,563666	0,96845
18000	3,05E+10	1,33E+09	3,03E+10	1,33E+09	3,05E+10	0,23393	0,717426	1,33219
19000	3,07E+10	1,40E+09	3,05E+10	1,40E+09	3,07E+10	0,243889	0,901296	1,80121
20000	3,09E+10	1,48E+09	3,07E+10	1,48E+09	3,09E+10	0,253358	1,119112	2,39797
21000	3,21E+10	1,53E+09	3,20E+10	1,53E+09	3,21E+10	0,316071	1,374968	3,14816
22000	3,40E+10	1,62E+09	3,38E+10	1,62E+09	3,40E+10	0,433675	1,673211	4,08102
23000	3,63E+10	1,68E+09	3,61E+10	1,68E+09	3,63E+10	0,628707	2,018452	5,22962
24000	3,81E+10	1,77E+09	3,79E+10	1,77E+09	3,81E+10	0,831855	2,415564	6,63113
25000	4,05E+10	1,85E+09	4,03E+10	1,85E+09	4,05E+10	1,168248	2,869683	8,32711
26000	4,22E+10	1,90E+09	4,20E+10	1,90E+09	4,22E+10	1,481776	3,386215	10,36387
27000	4,45E+10	1,98E+09	4,43E+10	1,98E+09	4,45E+10	2,009032	3,970838	12,79270
28000	4,63E+10	2,06E+09	4,61E+10	2,06E+09	4,63E+10	2,522383	4,629498	15,67029
29000	4,82E+10	2,14E+09	4,79E+10	2,14E+09	4,82E+10	3,138991	5,368421	19,05896
30000	5,05E+10	2,21E+09	5,02E+10	2,21E+09	5,05E+10	4,088857	6,194108	23,02708
31000	5,24E+10	2,29E+09	5,21E+10	2,29E+09	5,24E+10	5,044631	7,113337	27,64934
32000	5,46E+10	2,36E+09	5,44E+10	2,36E+09	5,46E+10	6,424259	8,133172	33,00717
33000	5,64E+10	2,44E+09	5,62E+10	2,44E+09	5,64E+10	7,730138	9,260957	39,18902
34000	5,83E+10	2,52E+09	5,80E+10	2,52E+09	5,83E+10	9,247774	10,50432	46,29081
35000	6,05E+10	2,58E+09	6,02E+10	2,58E+09	6,05E+10	11,46659	11,87119	54,41620
36000	6,23E+10	2,65E+09	6,20E+10	2,65E+09	6,23E+10	13,54991	13,36976	63,67707
37000	6,45E+10	2,71E+09	6,42E+10	2,71E+09	6,45E+10	16,53055	15,00854	74,19380
38000	6,63E+10	2,78E+09	6,60E+10	2,78E+09	6,63E+10	19,32444	16,79631	86,09575
39000	6,81E+10	2,86E+09	6,78E+10	2,86E+09	6,81E+10	22,49738	18,74216	99,52160
40000	7,06E+10	2,96E+09	7,03E+10	2,96E+09	7,06E+10	27,57202	20,85548	114,61976

CAPÍTULO 4

PROGRAMA PARA RETROANÁLISE DE PAVIMENTOS – REPAV.

Este capítulo apresenta o programa, mostrando todos os passos necessários para o seu funcionamento.

O programa, de fácil instalação e utilização, foi desenvolvido em DELPHI versão 5 e funciona em qualquer microcomputador com sistema operacional Windows 98 ou superior.

A figura 4.1 ilustra a tela inicial do programa REPAV.



Figura 4.1 - Tela de Abertura

REPAV

Identificação | Dados de Entrada | Retroanálise | Dimensionamento | Fatores de Equivalencia

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 208+18

Identificação das Camadas

1ª camada: Base

2ª camada: Subbase

Sobre Sair

TUTORIAL

Figura 4.2 - Tela ‘Identificação do Projeto’.

A figura 4.2 ilustra a tela de “**Identificação**” do projeto, é nesta tela que será dado ao programa o nome da Rodovia, o segmento e a Estaca/Km em questão.

Dispositivo de Ensaio

Fwd
 Benkelman **1**

Estrutura do Pavimento Existente

2 Espessura da 1ª camada (cm): 22
Espessura da 2ª camada (cm): 20

Carga de Teste

3 Carga de Teste (Ton): 4
Pressão de Contato (kgf/cm²): 5,6
Área de contato (cm²): 714,3
Raio equivalente da área de contato (cm): 15,08
Constante da viga: 2
Distância entre eixo das rodas (cm): 31

Dados da Bacia

Nº da Leitura	Distância (Crescente)	Leitura do Extensômetro	Distância Corrigida	<input checked="" type="checkbox"/> Deflexões
L0	0	0	0	143
L1	20	0	0	91
L2	30	0	0	54
L3	45	0	0	21
L4	65	0	0	8
L5	90	0	0	3
L6	120	0	0	2
L7	0	0	0	0
L8	0	0	0	0
L9	0	0	0	0
L10	0	0	0	0
L11	0	0	0	0
L12	0	0	0	0

Erro máximo aceitável: 0 **4**

Diferença média absoluta
 Diferença média relativa ponderada **5** Ok

Sobre Sair

Figura 4.3 - Tela 'Entrada de Dados'

A figura 4.3 ilustra a tela de “**Entrada de Dados**” do programa, é nesta tela que se insere os dados de ensaios de campo.

A posição **1** desta tela apresenta o campo “*Dispositivo de Ensaio*”, neste campo deve-se optar entre **FWD** ou **Benkelman** como dispositivo de ensaio.

A posição **2** desta tela apresenta o campo “*Estrutura do Pavimento Existente*”, neste campo deve-se especificar as espessuras da 1ª e 2ª camadas.

A posição **3** desta tela apresenta o campo “*Carga de Teste*”, neste campo são informados alguns dos dados necessários para a utilização do programa, tais como: carga de teste, pressão de contato, área de contato, raio equivalente da área de contato e, caso a opção de ensaio seja Viga Benkelman, constante da viga entre outros.

A posição **4** apresenta o campo “*Dados da Bacia*”, é neste campo que se informa os dados de campo dos ensaios, podendo optar por entrar com as leituras do Extensômetro ou, caso já as possua, com as Deflexões.

Após a entrada dos dados pressiona-se o botão Ok (posição **5**). Após o pressionamento do botão o usuário será levado à próxima tela, onde já estará sendo realizada a pesquisa de retroanálise.

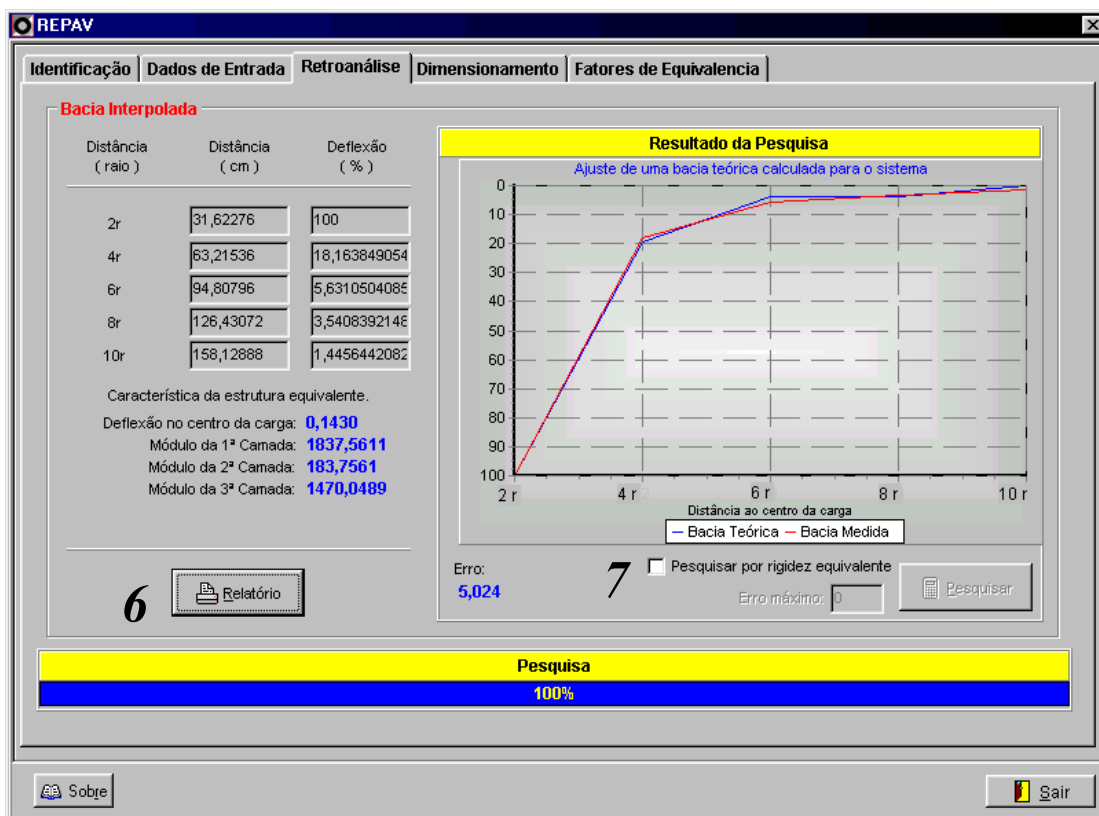


Figura 4.4 - Tela 'Retroanálise'

A figura 4.4 ilustra a tela “**Retroanálise**”, nesta tela são apresentados os resultados da retroanálise efetuada com os dados informados na tela anterior.

Após a pesquisa de retroanálise realizada é possível visualizar um relatório (ver figura 4.5) pressionando-se o botão Relatório (posição **6**).

A posição **7** apresenta uma opção onde é possível informar o erro máximo admissível para a realização de uma pesquisa de rigidez equivalente, que retorna ao usuário uma estrutura com rigidez equivalente à estrutura anteriormente informada.

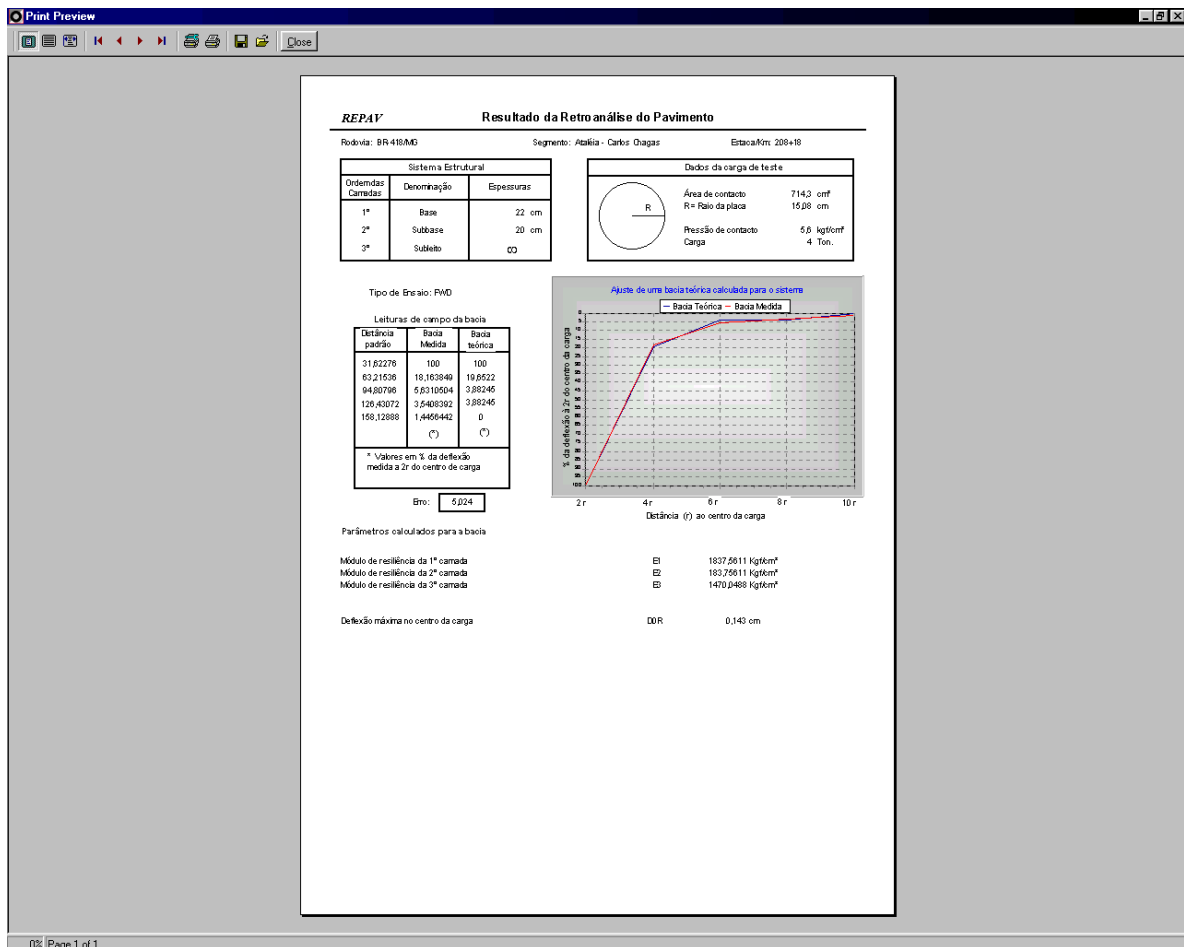


Figura 4.5 - Relatório de Avaliação Mecânica

A figura 4.5 ilustra o “**Relatório de Avaliação Mecânica do Pavimento**”, onde é apresentado, em formato de impressão, o relatório com os dados obtidos na retroanálise, podendo estes relatórios serem salvos, pressionando-se o pequeno botão com o ícone ‘salvar’, para posterior visualização, pressionando-se o ícone ‘abrir’.

Características das Camadas

Camadas	Denominação	Espessura (cm)	Coeficiente de Poison	Resiliência kgf/cm ²
Reforço	Reforço Projetado	3	0,5	30000
1º		22,000	0,5	1837,561
2º		20,000	0,5	183,756
3º	Subleito	200	0,5	1470,049

Posições a serem verificadas

	x	y	Profundidades
9	0	15,5	1º 2,970
			2º 24,780
			3º 44,800

Configuração do Carregamento

	Número de Cargas		Carga (Kg)	Pressão de Contato	Área de Contato	Raio da Área cont.
	x	y				
1º	0	0	2050	5,60	366	10,8
2º	0	15	2050	5,6	366	10,8
3º						
4º						

Buttons: 12 Gerar Relatório, Ler Relatório, 100%, 13 Calc. Equivalencia, Sobre, Sair

Figura 4.6 - Tela 'Dimensionamento'

A figura 4.6 ilustra a tela “**Dimensionamento**”, nesta tela são inseridos os dados para calcular um pré-dimensionamento de reforço do pavimento.

A posição **8** apresenta o campo para entrada dos dados que serão utilizados nos cálculos de pré-dimensionamento. Apresenta as áreas: “*Denominação*”, onde é possível informar um nome para as camadas; “*Espessura*”, onde é possível informar aqui as espessuras das camadas, sendo que a caixa espessura do reforço projetado estará sendo variada automaticamente para calcular o pré-dimensionamento; “*Coeficiente de Poison*”, nestas caixas devem ser informados os coeficientes de Poison, podendo diferir o valor entre as camadas, apenas respeitando que seu valor não pode ser ≤ 0 ou ≥ 1 ; “*Resiliência*”, estas caixas são preenchidas automaticamente pelo programa, exceto àquela referente ao reforço, que deve ter o seu valor informado pelo usuário. Todos os valores destes campos podem ser alterados pelo usuário.

As posições **9** e **10** se referem às posições que se queiram ensaiar, na horizontal (posição **9**) e na vertical (posição **10**).

A posição **11** refere-se às configurações de carregamento que se queiram calcular.

A posição **12** apresenta o botão Gerar Relatório, após o preenchimento correto de todos os dados anteriormente citados o pressionamento deste botão irá gerar uma pequena matriz de cálculo que dará origem ao relatório que está mostrado na figura 4.7.

A posição **13** apresenta o botão Calcular Equivalência, que após seu pressionamento irá gerar uma grande matriz de dados para os cálculos de equivalência que serão posteriormente citados.

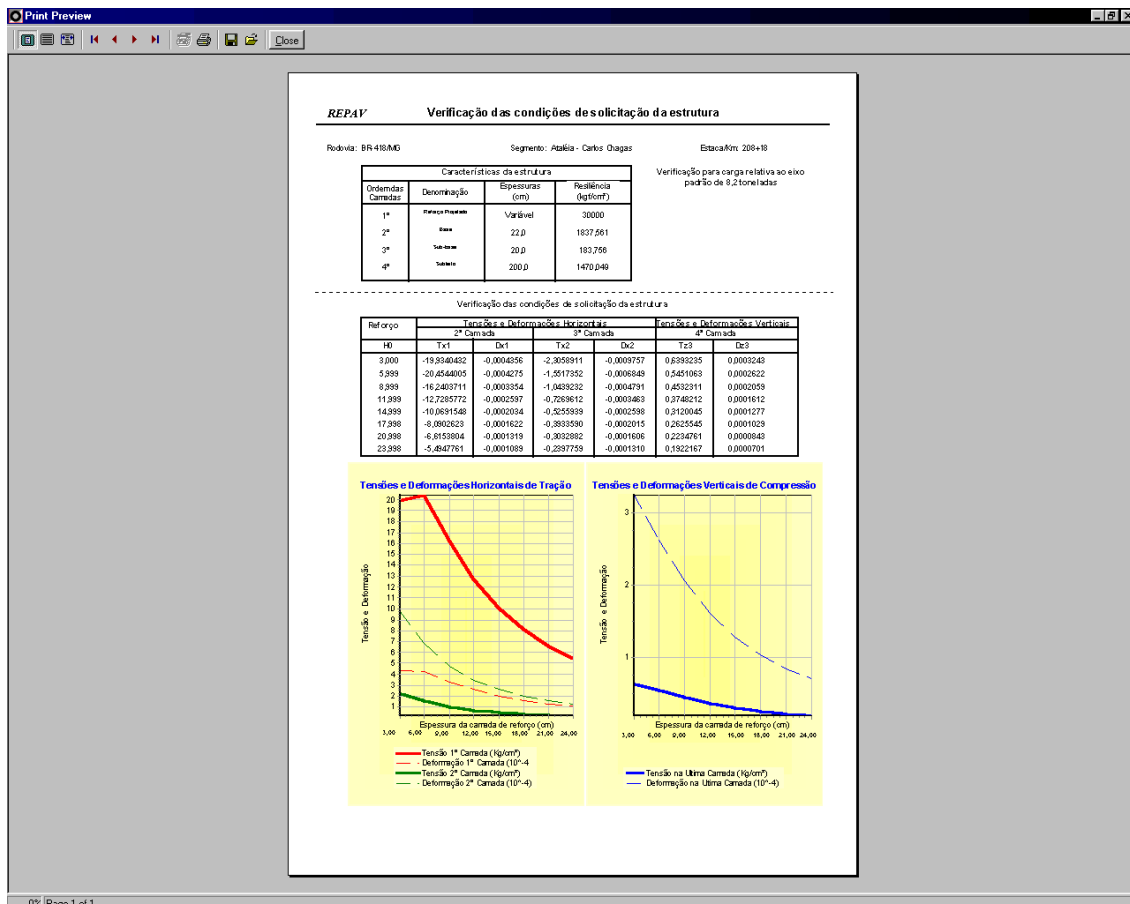


Figura 4.7 - Tela 'Relatório das Condições de Sollicitação da Estrutura'

A figura 4.7 ilustra o “Relatório das Condições de Sollicitação da Estrutura”, onde é apresentado, em formato de impressão, o relatório com os dados obtidos no Dimensionamento efetuado na tela anterior, podendo estes relatórios serem salvos, pressionando-se o pequeno botão com o ícone ‘salvar’, para posterior visualização, pressionando-se o ícone ‘abrir’.

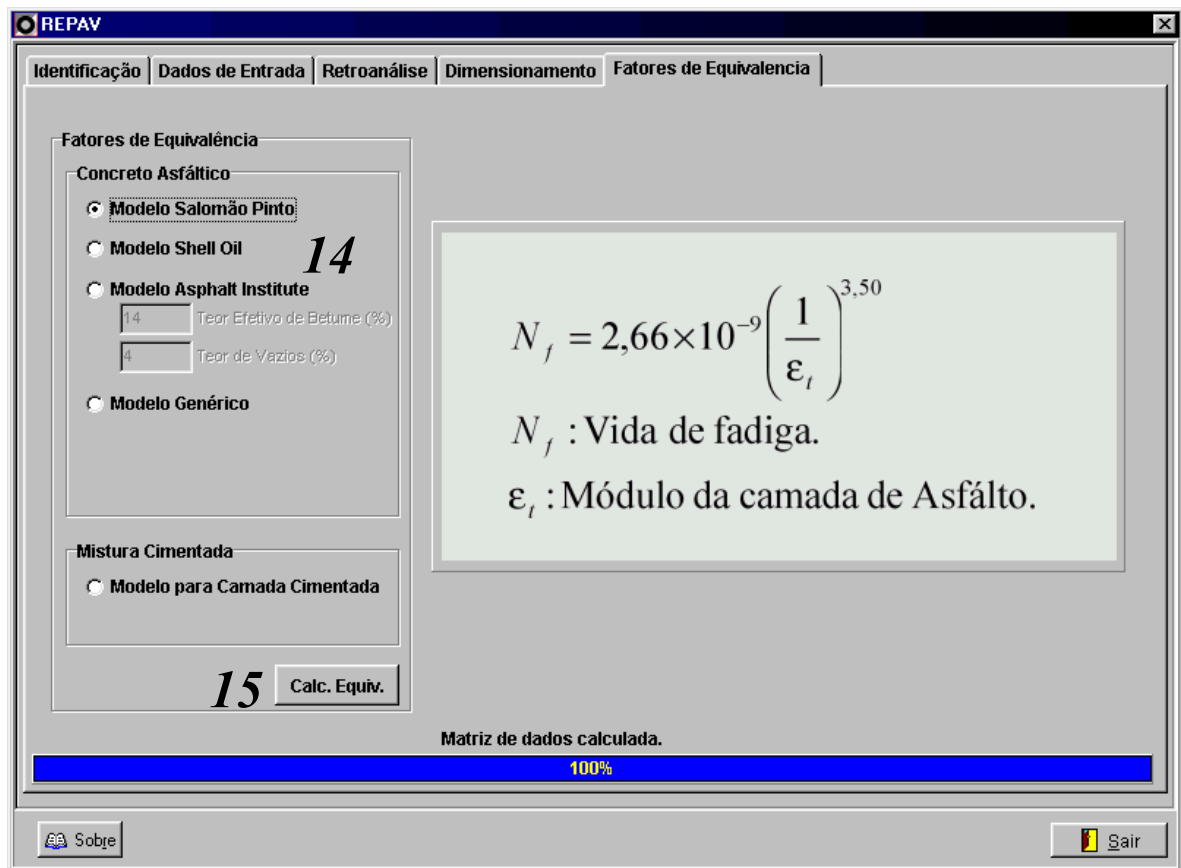


Figura 4.8 - Tela 'Fatores de Equivalência'.

A figura 4.8 ilustra a tela “**Fatores de Equivalência**”, após o cálculo de geração de uma matriz de dados o programa permite que sejam feitos cálculos de equivalência (posição **14**), utilizando-se os modelos: para “*Camadas Cimentadas*” com fórmula desenvolvida por Motta/Pinto; “*Shell Oil*” ;e “*Asphalt Institute*” com fórmulas desenvolvidas pelos mesmos. Após a seleção da fórmula pressione o botão Calcular Equivalência posição **15**, os resultados serão salvos na pasta especificada pelo usuário na janela *salvar...* que é apresentada, os arquivos estão pré-formatados para inserção em uma Planilha de cálculos (EXCEL ou similar).

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

5.1 – Conclusões

- 1) Desenvolveu-se um método simplificado de retroanálise de bacias de deflexão de pavimentos para determinação dos módulos de resiliência das camadas de um sistema de pavimento e subleito, objetivando sua aplicação na avaliação estrutural do pavimento existente para dimensionamento do reforço requerido para sua restauração. O método desenvolvido considera o conjunto pavimento / subleito como um sistema elástico-linear de três camadas, cujas características estruturais são determinadas a partir da interpretação de bacias de deflexão obtidas na superfície do pavimento, com emprego da viga Benkelman ou FWD, comparadas as bacias teóricas calculadas analiticamente com auxílio do programa ELSYM5 e armazenadas em um banco de dados.
- 2) A principal fonte de informação de que se valeu o Autor foi o trabalho intitulado “Determinação das Características Estruturais do Pavimento a partir da Linha de Influência Obtida em Ensaios de Cargas com Pneus”, apresentado por ORLANDO ALMEIDA PEREIRA, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Lisboa (1969), procedendo-se adaptações visando a sua implementação através de programas computacionais.
- 3) A implantação do método é feita através do programa REPAV, cujo desenvolvimento está compreendido no propósito da presente tese, tendo sido incorporado a esse programa uma rotina destinada ao pré-dimensionamento de reforço, incluindo um procedimento para determinação dos fatores de equivalência entre os diversos tipos de eixos em relação a uma carga padrão, sob o aspecto de falência do pavimento por fadiga do revestimento.

- 4) Para efeito de teste, o método de retroanálise desenvolvido nesta tese foi aplicado experimentalmente utilizando-se os dados referentes a rodovia BR-418, trecho Ataléia – Carlos Chaga, no estado de Minas Gerais, compilados de MACEDO (1996) obtendo-se resultados que apresentaram boa concordância com os resultados obtidos pelo autor em referência.
- 5) A avaliação estrutural de pavimentos através de ensaios não destrutivos e uma necessidade presente, bem como, a interpretação de bacias de deflexão através de teorias de retroanálises é sem dúvidas um procedimento adequado, face a disponibilidade de recursos computacionais.

5.2 – Sugestões para Novas Pesquisas

- 1) A implementação do método desenvolvido nesta tese, ampliando-o para quatro camadas, aplicando-se técnicas mais rápidas de manipulação de bancos de dados e dotando-o de procedimentos adequados a torná-lo uma ferramenta auxiliar no processo de retroanálise considerando a não linearidade do sistema pavimento / subleito.
- 2) A instrumentação de pavimentos em trechos experimentais, o que seria uma grande contribuição à calibração de processos de retroanálises e o desenvolvimento de técnicas de treinamento de redes neurais capazes de subsidiar a interpretação de bacias de deflexões de forma mais ágil e acurada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

ACUM, W., FOX, L. – Computation of load stresses in a three-layer elastic system geotechnique, nº 4, Dec. 1951

ALBERNAZ C. A. V., “Retroanálise do Módulo de Resiliência de Pavimentos Flexíveis e de Subleito para fins de Anteprojeto, Análise Estrutural e Gerência de Pavimentos”, 28ª RAPV, ABPV, Belo Horizonte, 1994.

ALBERNAZ C. A. V. et al – “Avaliação Simplificada de Pavimentos Através da Retroanálise”, 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador/BA – 1996

ALBERNAZ C. A. V., “Método Simplificado de retroanálise de Módulo de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a partir da Bacia de Deflexões” – tese de Mestrado, COPPE / UFRJ, 1997.

ANDREATINI, L. P. V., Um Método para a Análise e Interpretação das Deflexões em Pavimentos Flexíveis – III Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro; 1968, IV Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 1967.

ANDREATINI, L. P. V., Um Método para a Análise e Interpretação das Deflexões em Pavimentos Flexíveis – Publicação n. 439, IPR/DNER, 1970.

AYRES, JR., M, Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis, PhD. Dissertation, University of Maryland, College Park, U.S.A., 1997

BARROS, S.T., “O Cálculo da deflexão dos sistemas elásticos de duas e três camadas” – Publicação 146; IPR – Rio de Janeiro, 1966.

BENTSEN, R. A., NAZARIAN, S., & HARRISON, J. A., “Reliability Testing of Seven Nondestructive Pavement Testing Devices”, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, A. J. Bush III & Y. Baladi Eds., American Society for Testing and Materials, 1989.

BOUSSINESQ, L., Application des Potentials à L’Étude de l’Équilibre et du Mouvement des Solides Elastiques – Gauthier – Villars, Paris, 1885.

BURMISTER, D. M., The theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Application to the Design of Airports Runway – Highway Research Board, Proc., 1943

BUSH II, A. J., & BENTSEN, R. A., “Nondestructive Evaluation Equipment for Airfield Pavements”, Transportation Research Board, TRR-1260, 1990.

CARDOSO, S. H., Avaliação Estrutural Não-destrutiva de Aeroportos – A Experiência Brasileira – Seminário de Manutenção de Aeroportos – OACI, DIRENG, INFRAERO, 1992.

CARDOSO, S. H., SEIXAS, S. e RODRIGUES FILHO, S., Nondestructive Evaluation and Overlay Design of Airfield Flexible Pavements in Brazil – A Case Study – 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Arfields – Vol. 2, Minneapolis, pp. 1089 – 1108, 1994.

CARNEIRO, F. B. L., Viga Benkelman – Instrumento Auxiliar do Engenheiro de Conservação – Cadernos de Engenharia Rodoviária 2 – STC/DERRJ, 1966.

CERATTI, J. A. P., Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos, Tese D. Sc., COPPE/UFRJ, 1991.

CIVIDINI, AL GIONDA, G., - “Deterministic and Probabilistic Back Analysis in Rock Mechanics, International Workshop on the Applications of Computacional Mechanics in Geotechnical Engineering” – Rio de Janeiro, Balkema, 1994.

DNER, Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro, 1998.

DUARTE, J. C., et al – “Correlação entre Deflexões Características em Pavimentos Flexíveis Medidas com a Viga Benkelman e com FWD”, 30^a RAPv, Salvador/BA – 1996.

DUNCAN, J. M., MONISMITH, C. L. e WILSON, E. L., Finite Element Analysis of Pavements – HRR 228 – HRB., 1968

FABRÍCIO, J. M., GONÇALVES, E. A. e FABRÍCIO O. F., Metodologia Não Destrutiva para Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis através da Interpretação das Bacias de deflexão – Anais da 23^a. RAP – ABPv, Vol. 3., 1988

FABRÍCIO, J. M., GONÇALVES, E. A. e FABRÍCIO O. F., Utilização das “Bacias de deformação” na Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – Anais da 21^a. RAP – ABPv, Vol. 1., 1986

FABRÍCIO, J. M., SILVA, G. A., GONÇALVES, E. A., et al., Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis Existentes: Uma Contribuição para Projetos de Reforço – Anais da 26^a. RAP – ABPv., 1992

FABRÍCIO, J. M., SILVA, G. A., GONÇALVES, E. A., et al., Método Simplificado de Retroanálise em Pavimentos Flexíveis – Anais da 28^a. RAP – ABPv., 1994

FARIAS, M. M. e MONTEIRO, S. A. – Utilização de Modelos Elásticos Lineares e Não Lineares na Retroanálise de Propriedades do Pavimento, 30^a RAPv, Salvador/BA – 1996.

FOX, L., Computation of traffic stresses in a simple road structure H. M. Stationery Office, London, 1948

FRANCO, F. A. C. P., Um sistema para análise mecânica de pavimentos asfáltico, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000

HARICHANDRAN, R. S., MAHMOOD, T., RAAB, A. & BALADI, G., “Modified Newton Algorithm for Backcalculation of Pavement Layer Properties”, TRR 1384, Transportation Research Board, 1993.

HOFFMAN, M. S., & THOMPSON, M. R., “Backcalculation non-Linear Resilient Moduli from Deflection Data”, TRR-852, Transportation Research Board, 1981b.

HOFFMAN, M. S., & THOMPSON, M. R., “Backcalculation Non-Linear Resilient Moduli from Deflection Data”, TRR-852, Transportation Research Board, 1982.

HOFFMAN, M. S., & THOMPSON, M. R., “Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Devices”, TRR-852 – Transportation Research Board, 1981a.

JEUFFROY, G., e BACHELER, J. – Essai d’interprétation théorique de certains résultats de l’ AASHTO Road Test, Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, Paris, 1967

JEUFFROY, G., ECOROUTE: Un Nouveau Logiciel de Calcul des Structures des Chaussées. – Revue Générale des Routes n. 649., 1988

LYTTON, R. L., Backcalculation of Pavement Layer Properties – ASTM STP 1026. 1989

MACÊDO, J. A. G., Interpretação de Ensaios Defletométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. 1996

MACÊDO, J. A. G., Seminário I – Estudo Comparativo entre Alguns Equipamentos para Ensaios Não Destrutivos (NDT) em Pavimentos (Revisão Bibliográfica) – UFRJ/COPPE. 1993

MAHONEY, J. P., COETZEE, N. F., STUBSTAD, R. N., & LEE, S. W., “A Performance Comparison of Selected Backcalculation Computer Programs”, Nondestructive testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, A. J. Bush III & Baladi Eds., American Society for Testing and Materials, 1989.

MEDINA, J., MACÊDO, J. A. G., MOTTA, L. M. G., & ALBERNAZ, C. A. V., “Utilização de Ensaios Defletométricos e de Laboratório para Avaliação Estrutural de Pavimentos”, 28ª RAPV, Belo Horizonte – MG, 1994.

MEDINA, J. – Mecânica dos Pavimentos, 1ª Edição, Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1997

MOTTA, L. M. G., “Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas”, Tese DSc., COPPE/UFRJ, 1991.

NOURELDIN, A. S., “A New Scenario for Backcalculation of Layer Moduli of Flexible Pavement”, TRR 1384, Transportation Research Board, 1993.

ODEMARK, N., Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements According to the Theory of Elasticity. 1949

PAIVA, C. E. L., “Estudos de avaliações das condições estruturais de um pavimento a partir de Bacia de deflexão” – 32º RAPv, Brasília/DF, 2000.

PEREIRA, A. M. – Análise Crítica dos Fatores de Equivalência Adotados pelo DNER e sua Adequação às Rodovias de Tráfego Pesado, Associação Brasileira de Pavimentação, Boletim Técnico nº 11 – 1986.

PEREIRA, O. A., Determinação das Características Estruturais de Pavimentos a partir da Linha de Influência obtida em Ensaio de Carga com Pneus Relat. Proc. 52/5/3441, LNEC. 1969

PEREIRA, O. A., Dimensionamento de Pavimentos: Apreciação dos Métodos de Dimensionamento de Reforço – Os Métodos Estrangeiros – Pavimentos Rodoviários, Vol. IV, LNEC. 1972

PINTO, SALOMÃO, “Estudo do comportamento à Fadiga de misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos” – Tese Dsc, COPPE/UFRJ, 1991.

PREUSSLER, E. S., “Ensaio Dinâmico de Solo Arenoso”, Tese MSc, COPPE/UFRJ, 1978.

PREUSSLER, E. S., “Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço”, Tese DSc., COPPE/UFRJ, 1983.

PREUSSLER, E. S., et al – Caracterização da Condição Elástica do Subleito, 32ª - RAPv, Brasília/DF – 2000.

PREUSSLER, E. S., et al – Retroanálise – Processos para a Avaliação Estrutural de Pavimentos, 32ª RAPv, Brasília/DF – 2000

RODRIGUES, R. M., “Estudo dos Trincamentos dos Pavimentos”, Tese DSc, COPPE/UFRJ, 1991.

RODRIGUES, R. M., Um Projeto de Reforço de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários pelo Método da Resiliência”: Uma Nova Versão do Programa TECNAPAV, Tese Msc., COPPE/UFRJ, 1987.

RODRIGUES, R. M. e ROCHA FILHO N. R., “A avaliação estrutural dos pavimentos por meio de levantamentos defletométricos” – 30ª RAPv, Salvador/BA, 1996.

SILVA, P. D. E. A., Contribuição para Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPAVE em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis, Tese Msc., COPPE/UFRJ, 1995.

SMITH, R. E., & LYTTON, R. L., “Operating Characteristics and User Satisfaction of Commercially Available NDT Equipment”, Transportation Research Board, TRR-1007, 1985.

SOLOTEST, “Solotest – viga eletrônica, www.solotest.com.br” – Acessado em 19/03/02 às 19 horas e 35 minutos.

STRATA, www.strataengenharia.com.br, acessado em 24/03/2002.

SUZUKI, C. Y., et al – Procedimento de cálculo para Estimativa de Parâmetros da Bacia de Deflexão em Pavimentos Flexíveis, 31ª RAPV, São Paulo/SP – 1998.

ULLIDTZ, P., BATTIATO, LARSEN, B, K., & STUBSTAD, R. N., “Verification of the Analytical – Empirical Method of Pavement Evaluation based on FWD Testing, 6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1987.

ULLIDTZ, P., et al., Analytical Procedures in Nondestructive Testing Pavement Evaluation – TRR 1482, TRB., 1995

ANEXO A

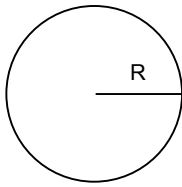
RELATÓRIOS DOS RESULTADOS DAS
RETROANÁLISES ELABORADAS NESTA TESE.

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 100+12

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	22,5 cm
2º	Sub-base	16,5 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

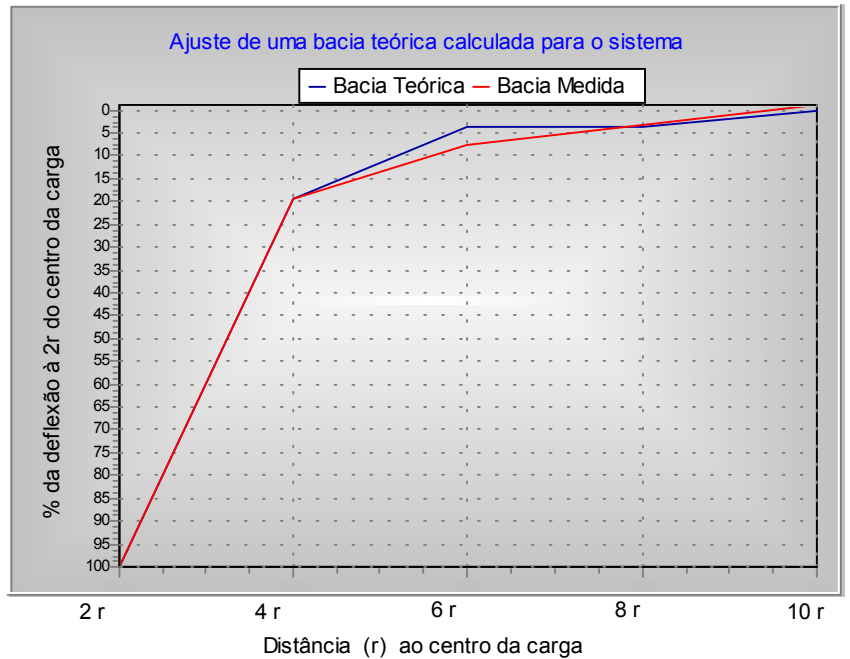
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	19,324557	19,6522
94,80796	7,6875564	3,88245
126,43072	3,2829040	3,88245
158,12888	-	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 5,865



Parâmetros calculados para a bacia

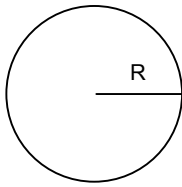
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1850,5016 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	185,05016 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1480,4013 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,142 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 208+18

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	22 cm
2º	Sub-base	20 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

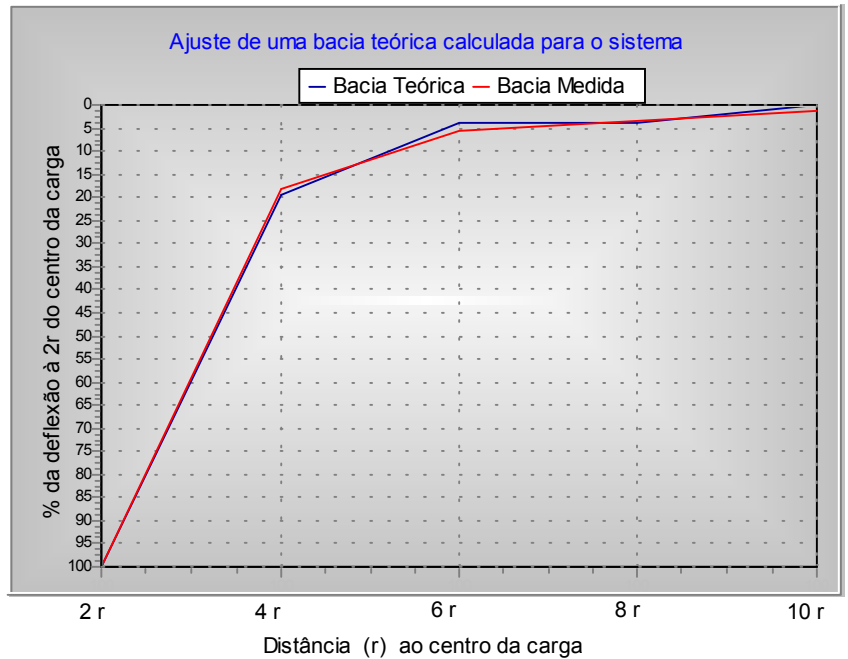
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	18,163849	19,6522
94,80796	5,6310504	3,88245
126,43072	3,5408392	3,88245
158,12888	1,4456442	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 5,024



Parâmetros calculados para a bacia

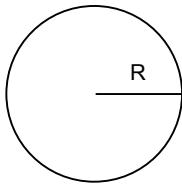
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1837,5611 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	183,75611 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1470,0488 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,143 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 370+04,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	24 cm
2º	Sub-base	25 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

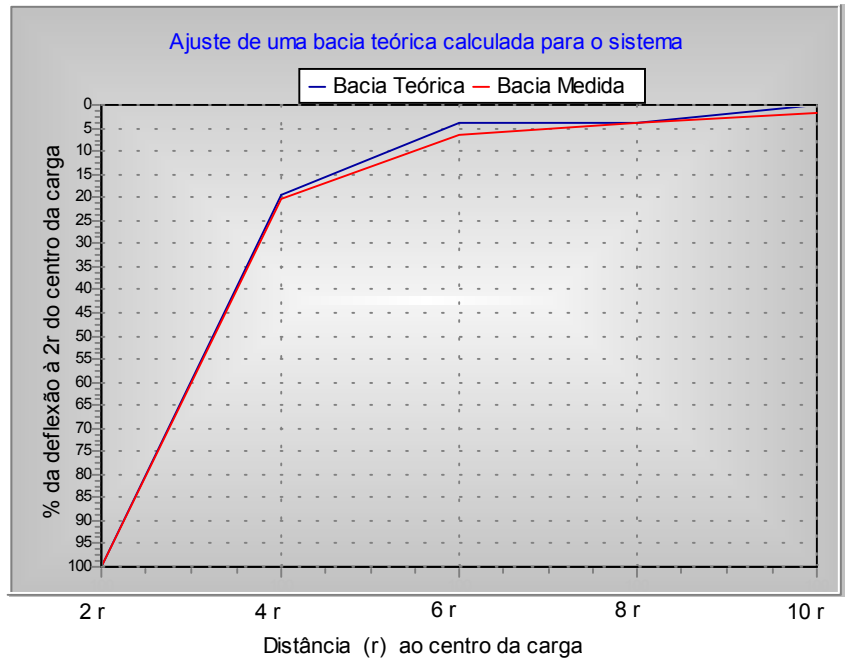
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	20,170364	19,6522
94,80796	6,3146122	3,88245
126,43072	3,9706671	3,88245
158,12888	1,6211331	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 4,660



Parâmetros calculados para a bacia

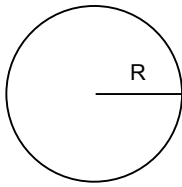
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	2069,0648 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	206,90648 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1655,2518 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,127 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 509+16

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	22 cm
2º	Sub-base	18 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

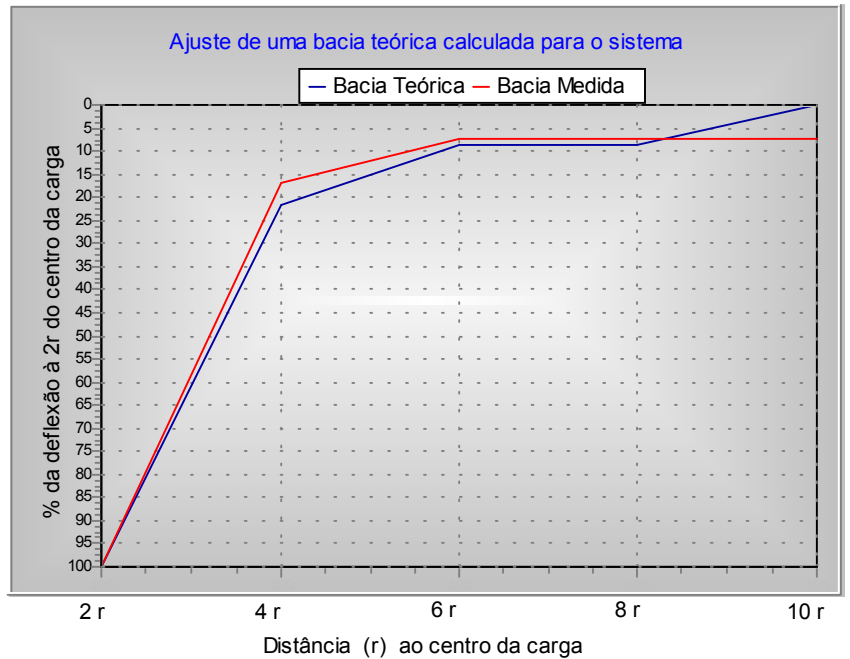
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	16,995415	21,44231
94,80796	7,3029958	8,45353
126,43072	7,3029958	8,45353
158,12888	7,3029958	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 14,051



Parâmetros calculados para a bacia

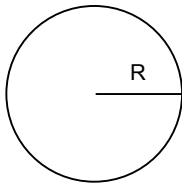
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1516,4349 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	303,28698 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1516,4349 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,137 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 588+0

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	17 cm
2º	Sub-base	23 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

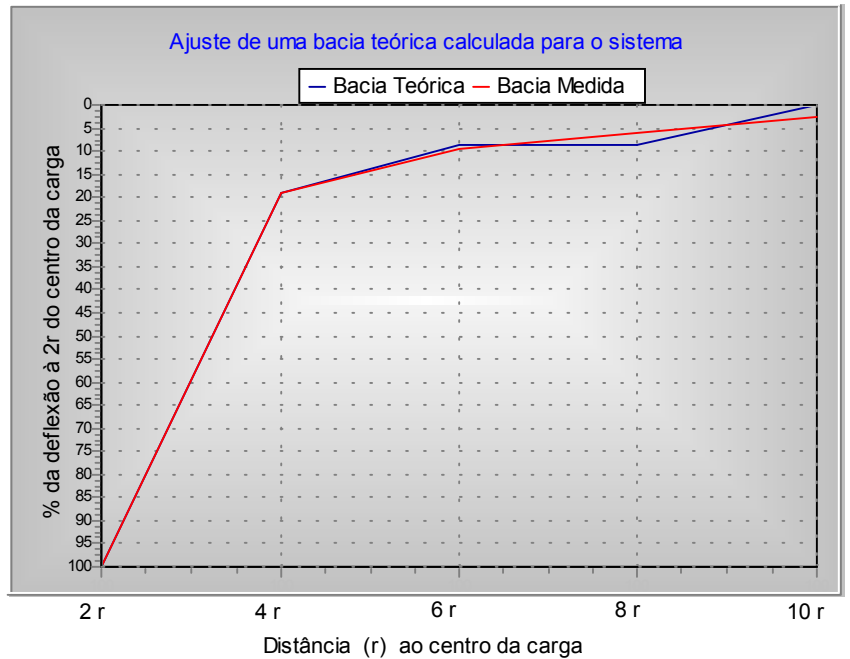
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	18,851601	19,12252
94,80796	9,5177108	8,6755
126,43072	5,9847952	8,6755
158,12888	2,4434559	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 6,247



Parâmetros calculados para a bacia

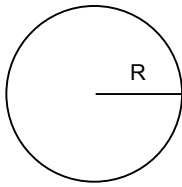
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	4090,0495 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	272,66997 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1363,3498 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,122 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 688

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	24 cm
2º	Sub-base	20 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

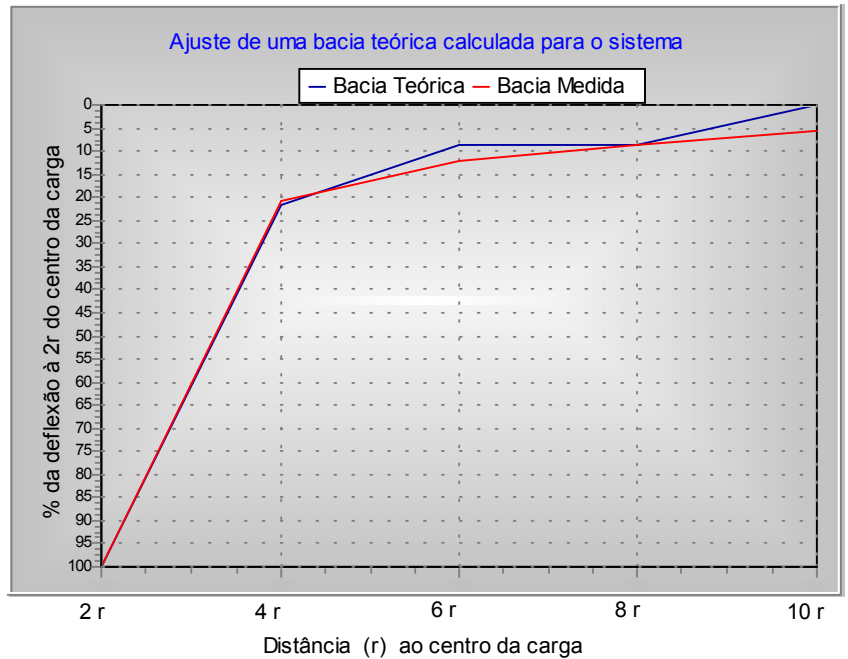
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	20,879335	21,44231
94,80796	12,101986	8,45353
126,43072	8,7797236	8,45353
158,12888	5,4495395	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 9,987



Parâmetros calculados para a bacia

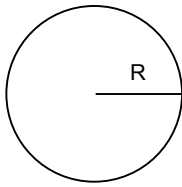
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1716,9552 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	343,39104 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1716,9552 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,121 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 829+8,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	24 cm
2º	Sub-base	20 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

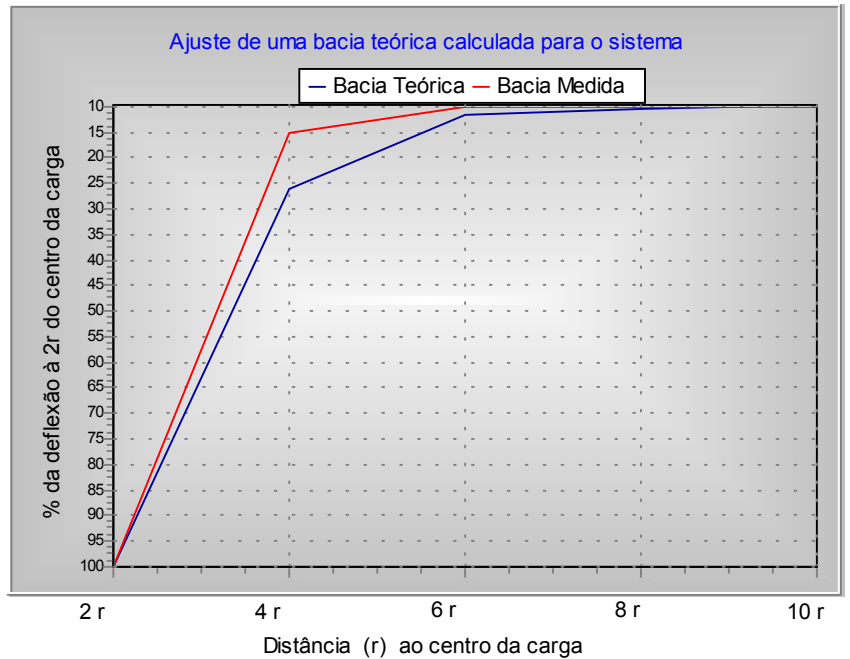
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	15,311949	26,11731
94,80796	10,128308	11,71285
126,43072	10,128308	10,49658
158,12888	10,128308	9,70493
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 13,182



Parâmetros calculados para a bacia

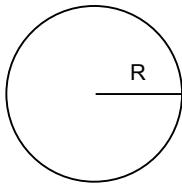
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1847,3351 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	369,46703 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1477,8681 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,117 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1115+14,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	23 cm
2º	Sub-base	27 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

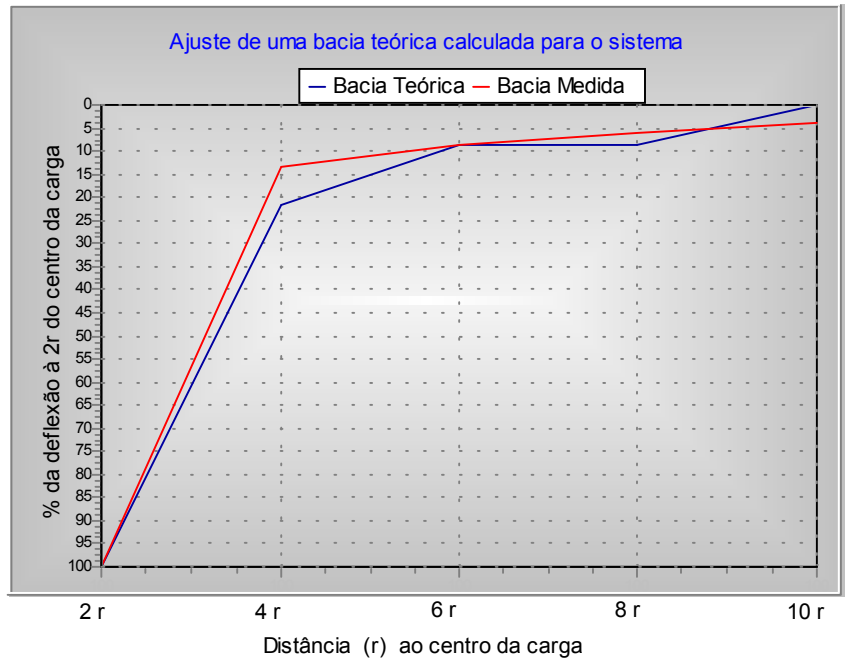
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	13,597508	21,44231
94,80796	8,6003431	8,45353
126,43072	6,2393589	8,45353
158,12888	3,8727453	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 14,079



Parâmetros calculados para a bacia

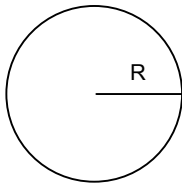
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1550,3849 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	310,07699 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1550,3849 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,134 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1134+08

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	20 cm
2º	Sub-base	20 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

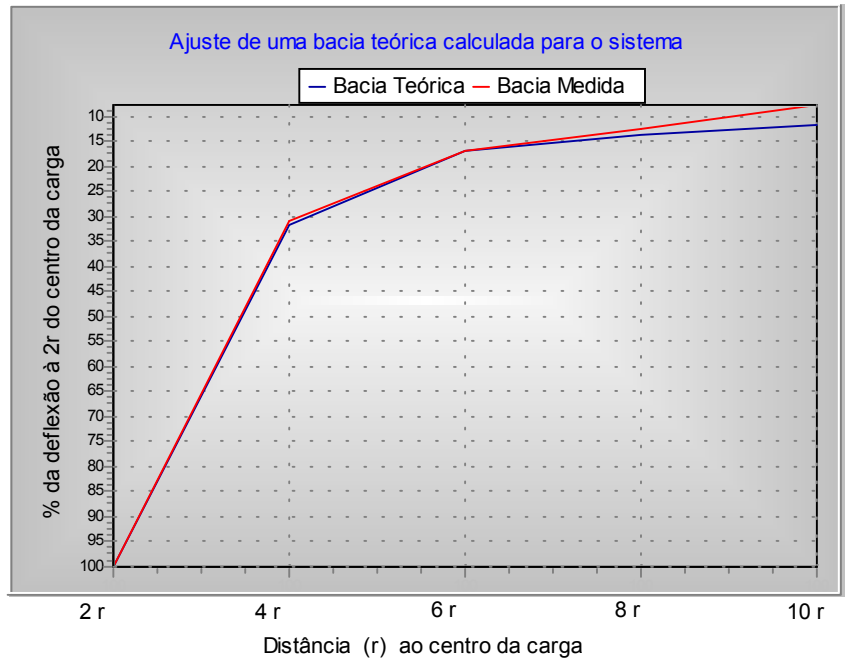
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	30,670487	31,56796
94,80796	16,954192	16,93651
126,43072	12,299892	13,74095
158,12888	7,6344941	11,75543
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 6,477



Parâmetros calculados para a bacia

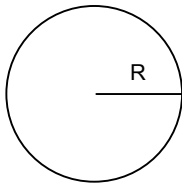
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1461,9299 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	438,57843 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1169,5439 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,131 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1266+4,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	28 cm
2º	Sub-base	16 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

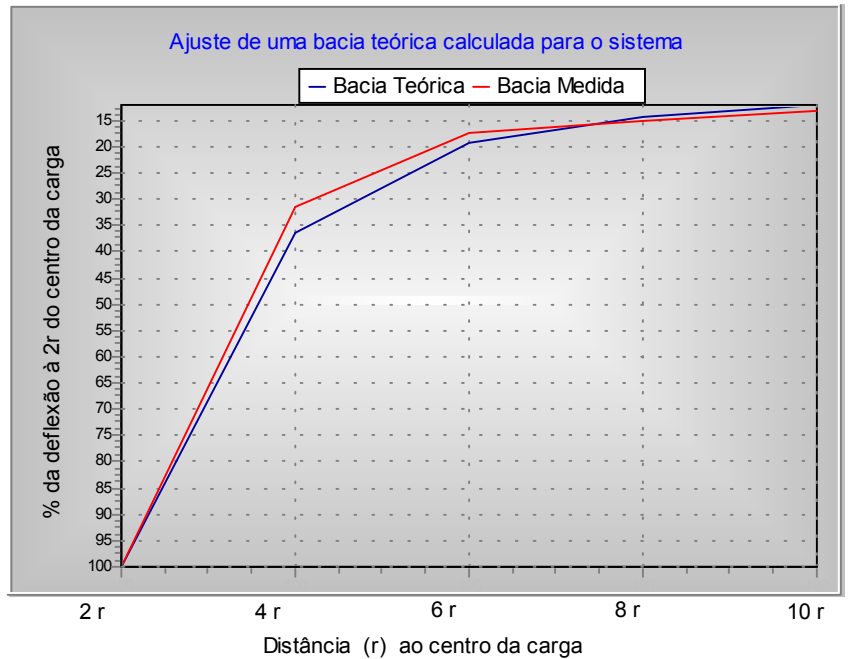
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	31,570413	36,57319
94,80796	17,269418	19,13068
126,43072	15,210131	14,35782
158,12888	13,145933	12,0415
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 8,821



Parâmetros calculados para a bacia

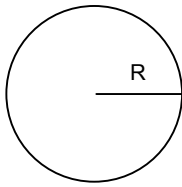
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1052,1343 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	420,85373 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1052,1343 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,147 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1285

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	18 cm
2º	Sub-base	28 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

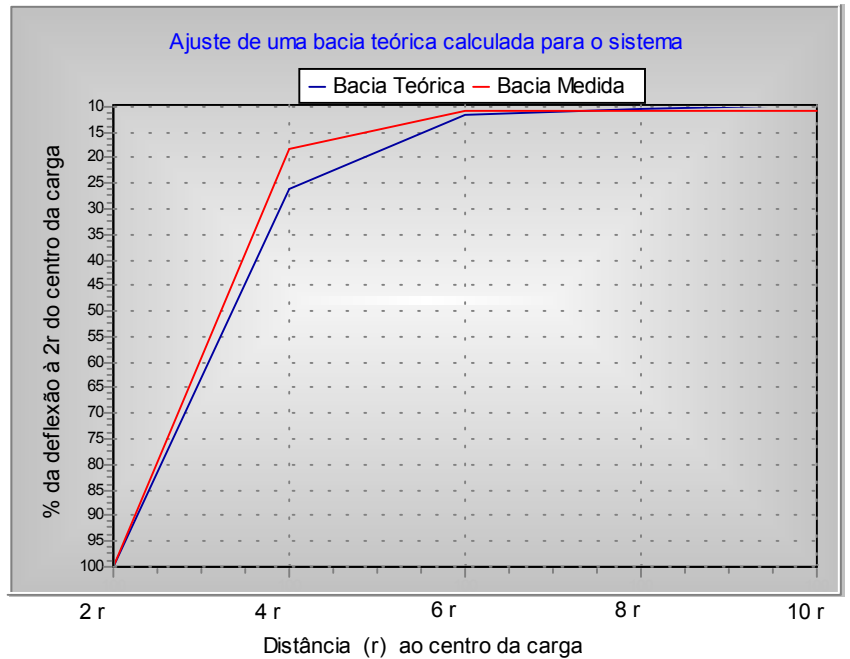
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	18,497815	26,11731
94,80796	11,020680	11,71285
126,43072	11,020680	10,49658
158,12888	11,020680	9,70493
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 10,152



Parâmetros calculados para a bacia

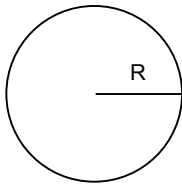
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1662,6016 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	332,52033 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1330,0813 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,13 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1373

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	24 cm
2º	Sub-base	29 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

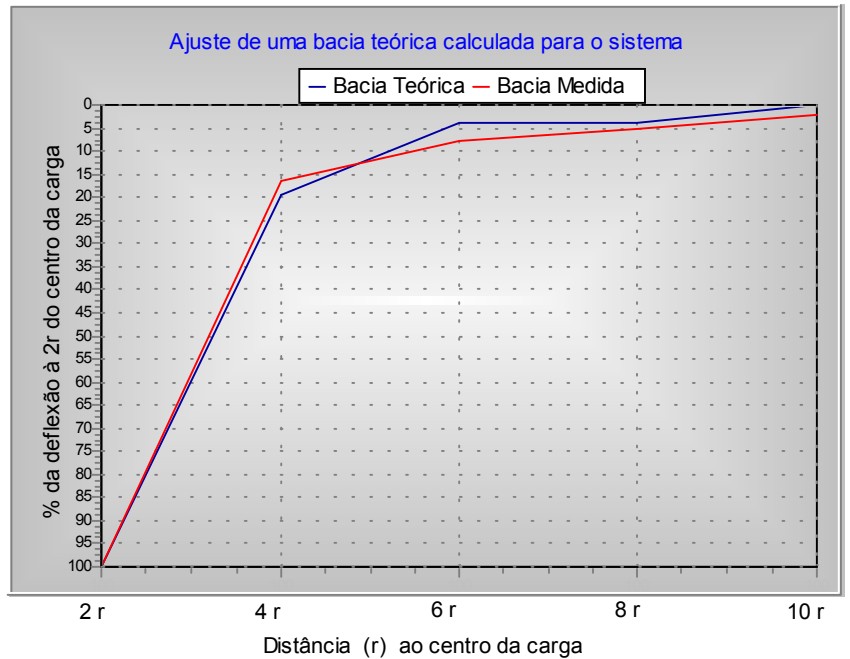
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	16,592584	19,6522
94,80796	7,9966017	3,88245
126,43072	5,0283124	3,88245
158,12888	2,0529457	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 10,373



Parâmetros calculados para a bacia

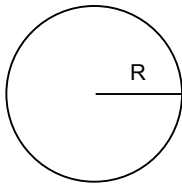
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	2102,1699 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	210,21699 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1681,7359 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,125 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1490+10,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	22 cm
2º	Sub-base	20 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

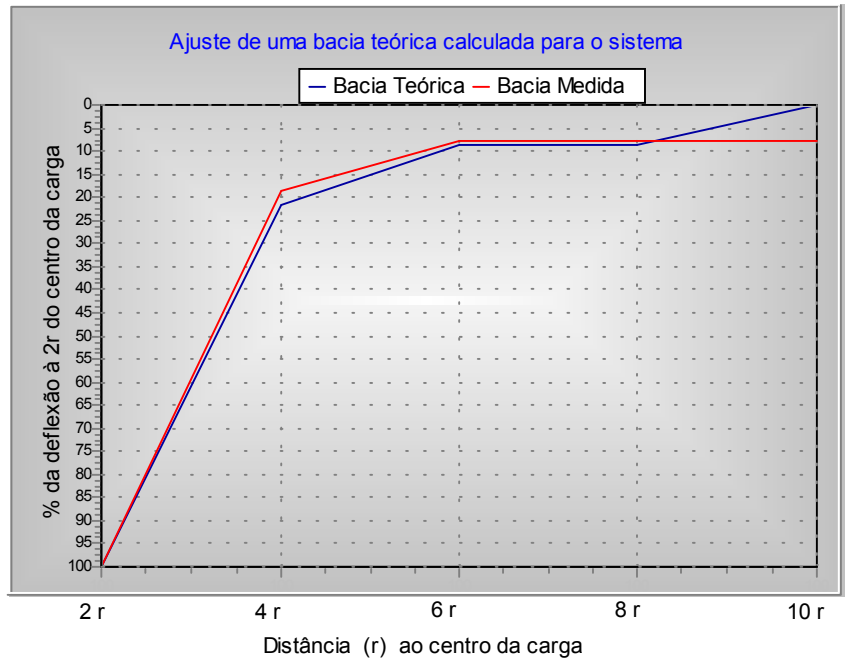
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	18,611631	21,44231
94,80796	7,9974902	8,45353
126,43072	7,9974902	8,45353
158,12888	7,9974902	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 11,740



Parâmetros calculados para a bacia

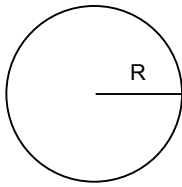
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1923,6257 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	384,72515 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1923,6257 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,108 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1591

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	15 cm
2º	Sub-base	30 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

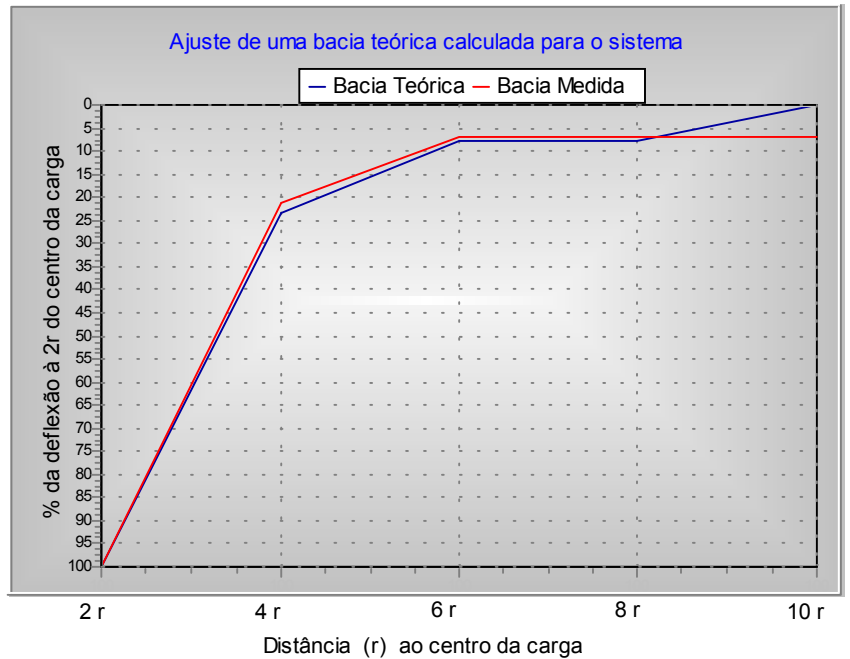
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	21,204860	23,39799
94,80796	7,0682867	7,85662
126,43072	7,0682867	7,85662
158,12888	7,0682867	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 10,838



Parâmetros calculados para a bacia

Módulo de resiliência da 1º camada
 Módulo de resiliência da 2º camada
 Módulo de resiliência da 3º camada

E1 5226,9375 Kg/cm²
 E2 174,23125 Kg/cm²
 E3 1045,3875 Kg/cm²

Deflexão máxima no centro da carga

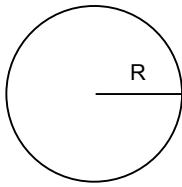
D0R 0,134 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1657+4,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	17 cm
2º	Sub-base	22 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

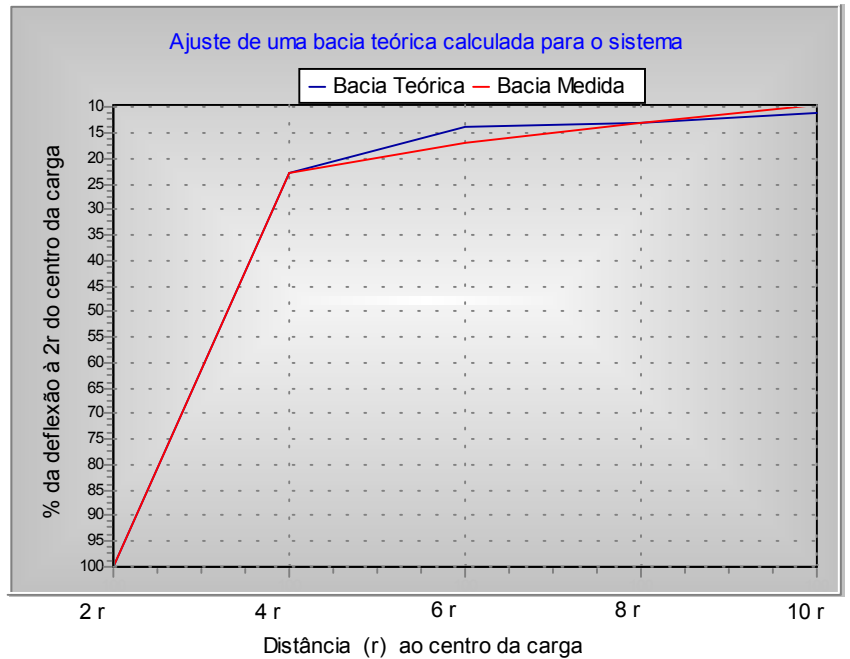
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	22,579042	22,60764
94,80796	16,720737	13,78326
126,43072	13,078968	12,806
158,12888	9,4285164	11,02564
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 4,836



Parâmetros calculados para a bacia

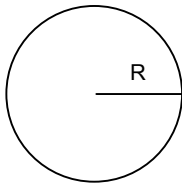
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	3380,4487 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	507,06781 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1690,2243 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,1 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1694

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	21 cm
2º	Sub-base	28 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

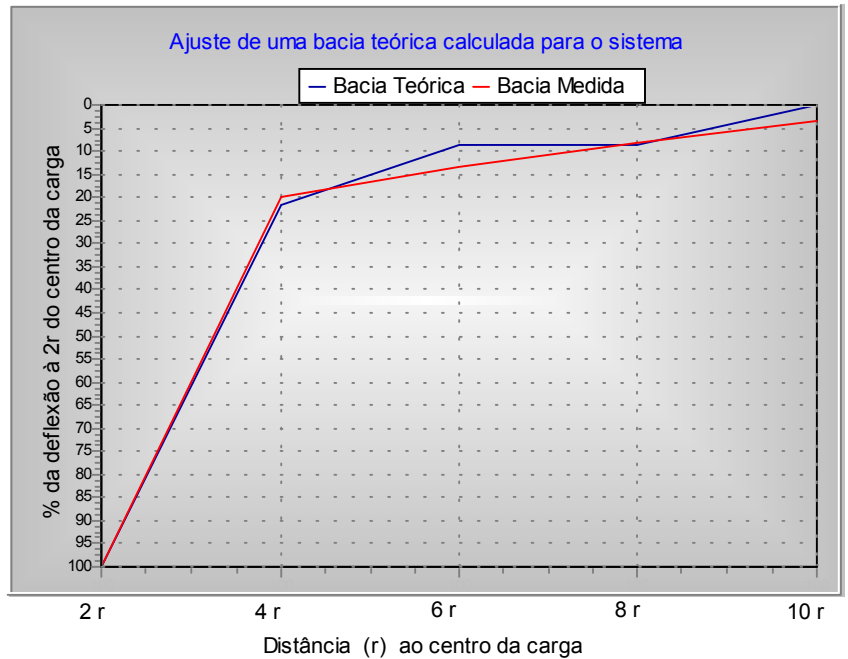
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	19,746180	21,44231
94,80796	13,419743	8,45353
126,43072	8,4384172	8,45353
158,12888	3,4452140	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 10,123



Parâmetros calculados para a bacia

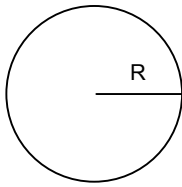
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1623,0592 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	324,61185 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1623,0592 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,128 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1784

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	19 cm
2º	Sub-base	25 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

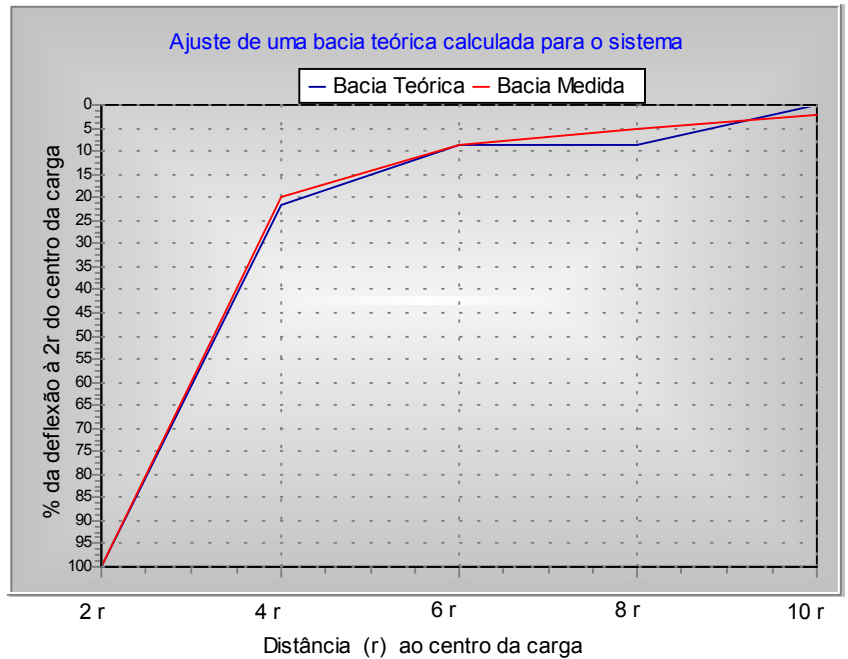
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	19,969855	21,44231
94,80796	8,4465756	8,45353
126,43072	5,3112588	8,45353
158,12888	2,1684663	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 6,790



Parâmetros calculados para a bacia

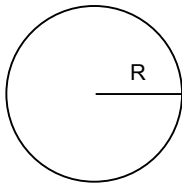
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1959,9206 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	391,98412 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1959,9206 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,106 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1836+16,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	20 cm
2º	Sub-base	23 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

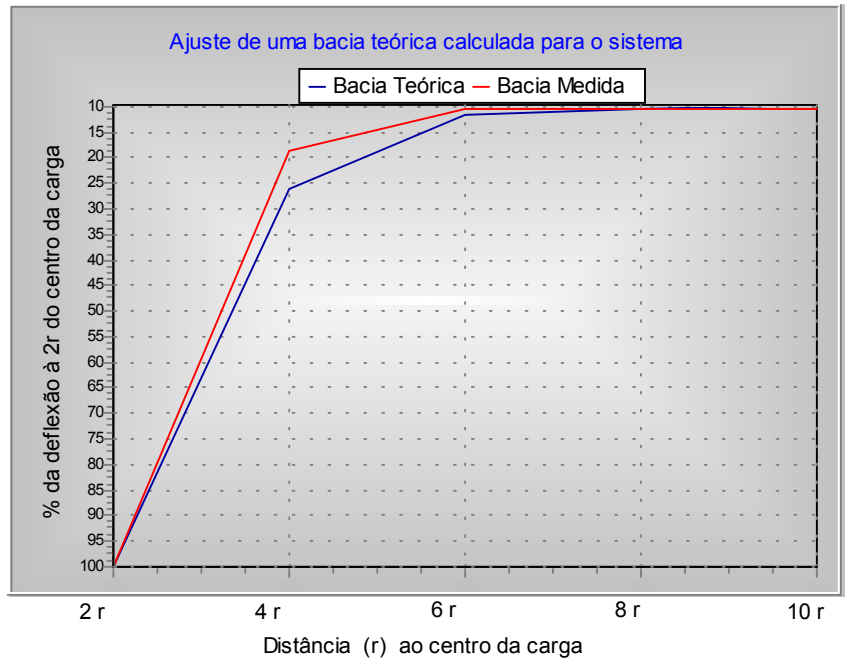
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	18,795303	26,11731
94,80796	10,632655	11,71285
126,43072	10,632655	10,49658
158,12888	10,632655	9,70493
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 9,466



Parâmetros calculados para a bacia

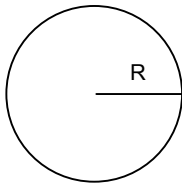
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	2960,7974 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	592,15949 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	2368,6379 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,073 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1863+2,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	19 cm
2º	Sub-base	32 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

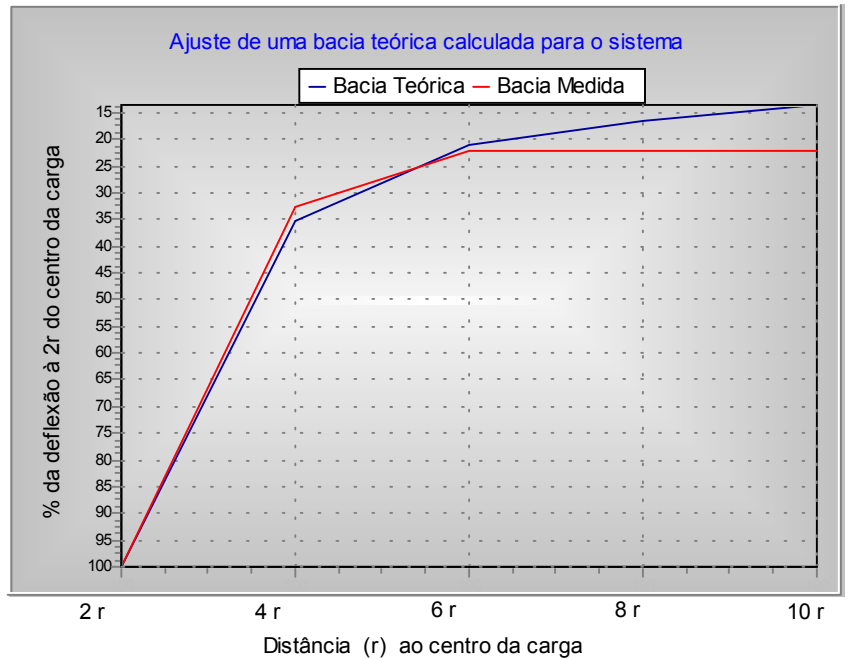
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	32,561988	35,27526
94,80796	22,130152	20,91349
126,43072	22,130152	16,44283
158,12888	22,130152	13,56927
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 18,178



Parâmetros calculados para a bacia

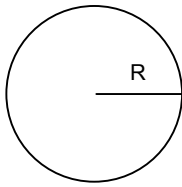
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1956,8026 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	978,40133 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1956,8026 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,08 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1969+8,00

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	18 cm
2º	Sub-base	25 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

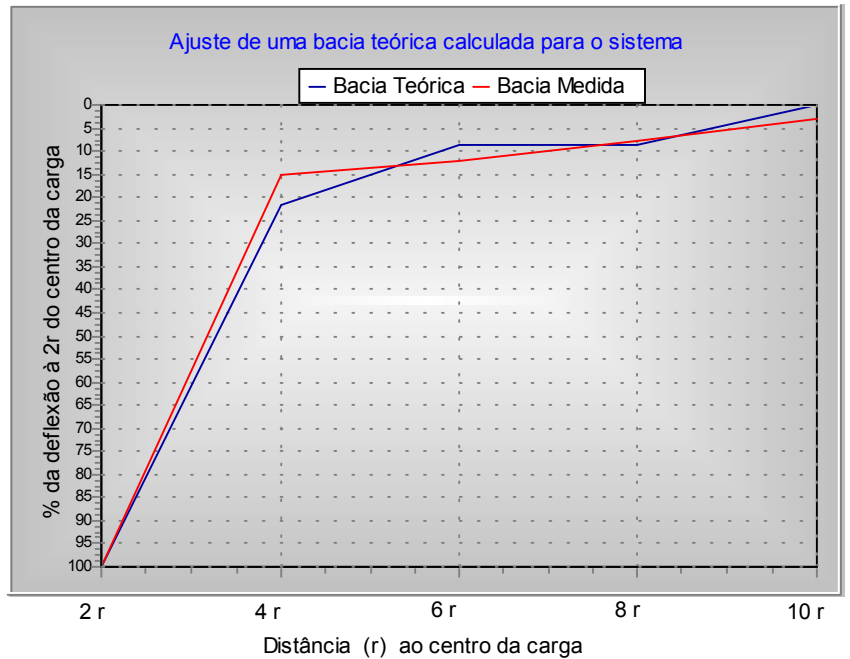
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	15,193534	21,44231
94,80796	12,203910	8,45353
126,43072	7,6738938	8,45353
158,12888	3,1330765	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 13,912



Parâmetros calculados para a bacia

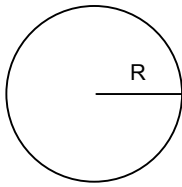
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	2308,3509 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	461,67018 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	2308,3509 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,09 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 2093

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	20 cm
2º	Sub-base	30 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

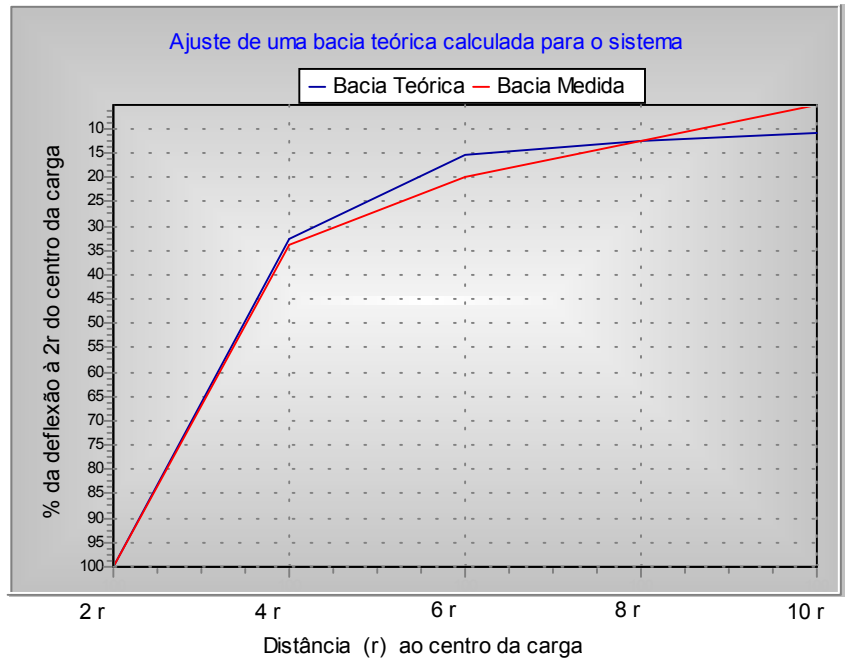
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	33,787890	32,63105
94,80796	19,938159	15,39819
126,43072	12,537237	12,31351
158,12888	5,1186693	11,0131
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 11,815



Parâmetros calculados para a bacia

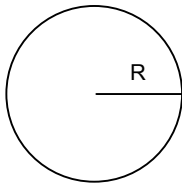
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	2645,5557 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	396,83375 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1322,7778 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,098 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 2137+16

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	21 cm
2º	Subbase	30 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

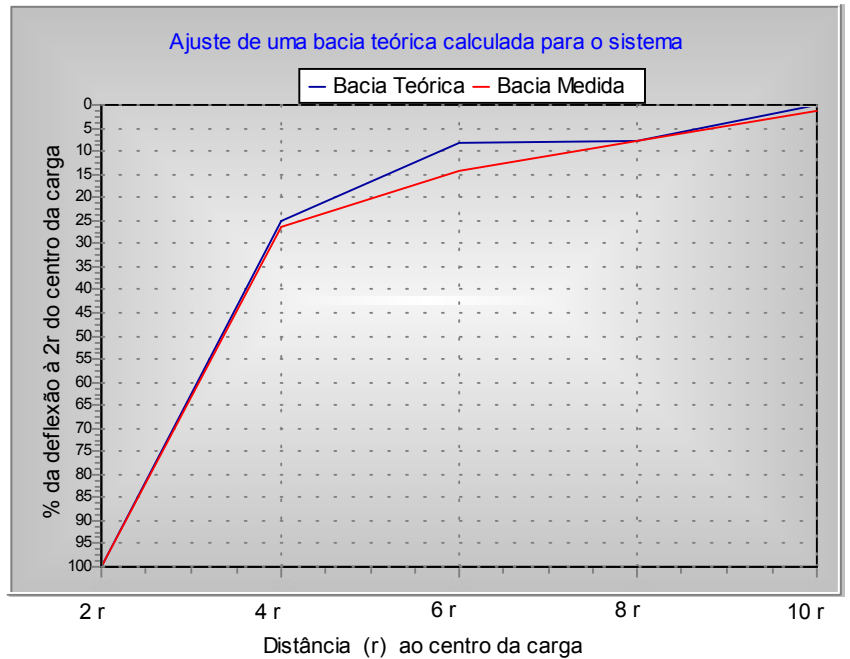
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	26,450105	25,32189
94,80796	14,204097	8,14497
126,43072	7,8048992	7,77062
158,12888	1,3904433	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 1,722



Parâmetros calculados para a bacia

Módulo de resiliência da 1º camada
 Módulo de resiliência da 2º camada
 Módulo de resiliência da 3º camada

E1 2588,8132 Kg/cm²
 E2 258,88080 Kg/cm²
 E3 1553,2848 Kg/cm²

Deflexão máxima no centro da carga

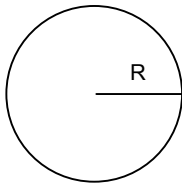
D0R 0,107 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 2251

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	20 cm
2º	Sub-base	30 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

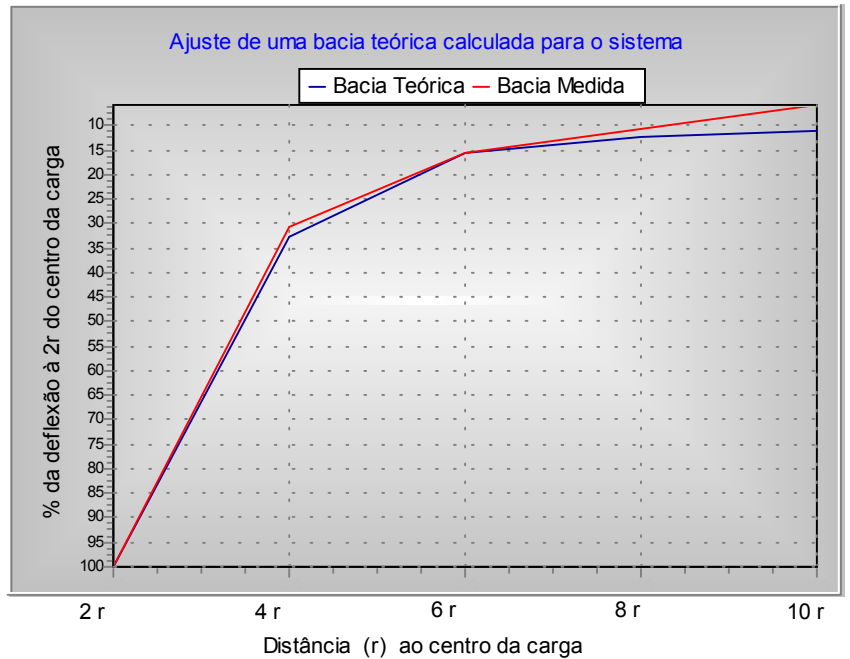
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	30,458861	32,63105
94,80796	15,672165	15,39819
126,43072	10,725693	12,31351
158,12888	5,7674271	11,0131
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 9,280



Parâmetros calculados para a bacia

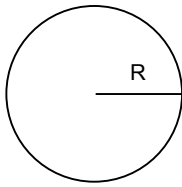
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	2074,1156 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	311,11766 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1037,0578 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,125 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 2364

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	20 cm
2º	Sub-base	20 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

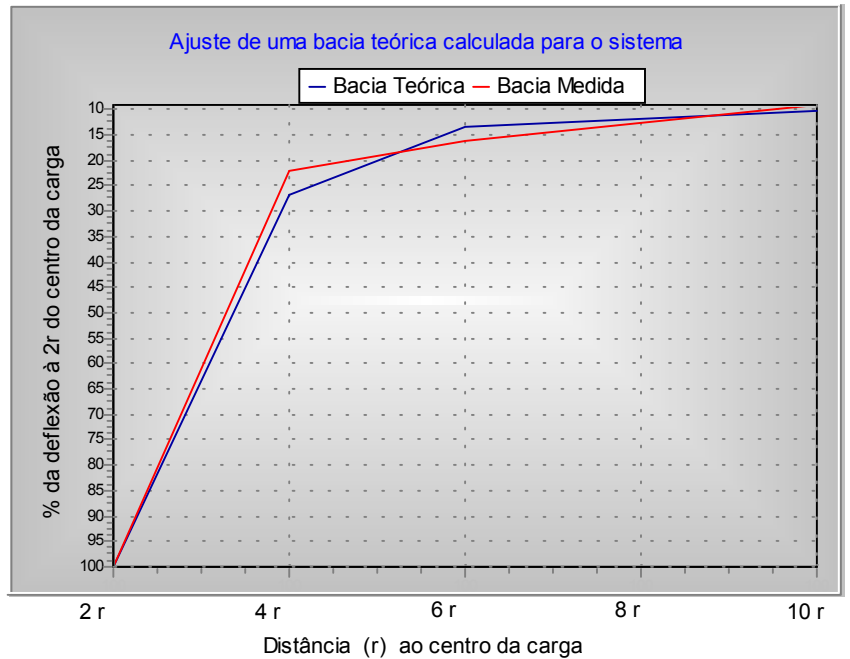
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	22,123004	26,83349
94,80796	16,162347	13,61886
126,43072	12,642195	11,80462
158,12888	9,1136501	10,40905
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 9,387



Parâmetros calculados para a bacia

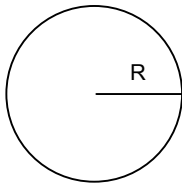
Módulo de resiliência da 1º camada	E1	1639,1421 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	491,74314 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1639,1421 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,112 cm

Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 2569

Sistema Estrutural		
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras
1º	Base	21 cm
2º	Sub-base	35 cm
3º	Subleito	∞

Dados da carga de teste		
	Área de contacto	714,3 cm²
	R = Raio da placa	15,08 cm
	Pressão de contacto	5,6 kgf/cm²
	Carga	4 Ton.

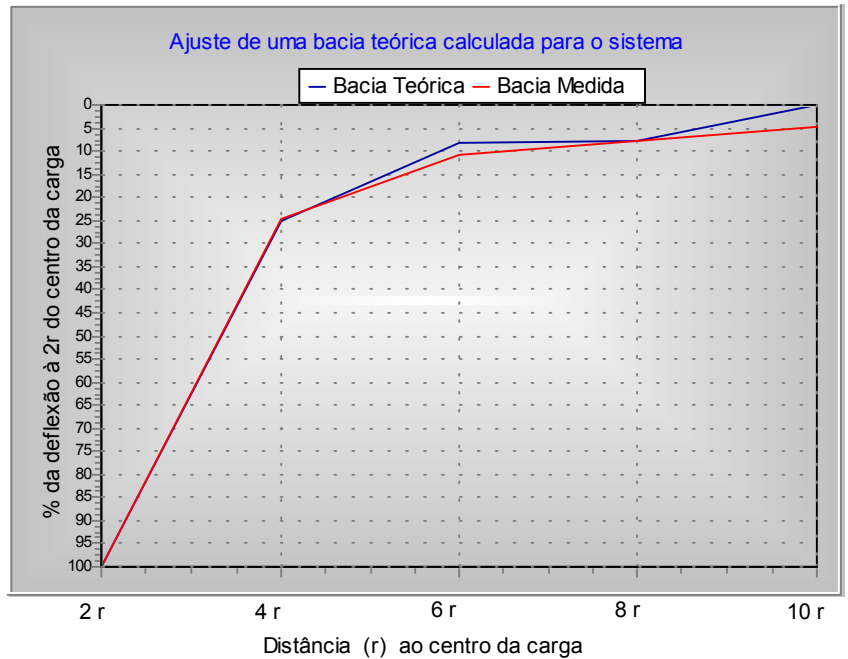
Tipo de Ensaio: FWD

Leituras de campo da bacia

Distância padrão	Bacia Medida	Bacia teórica
31,62276	100	100
63,21536	24,813708	25,32189
94,80796	10,714645	8,14497
126,43072	7,7732386	7,77062
158,12888	4,8248183	0
	(*)	(*)

* Valores em % da deflexão medida a 2r do centro de carga

Erro: 7,905



Parâmetros calculados para a bacia

Módulo de resiliência da 1º camada	E1	2613,2359 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 2º camada	E2	261,32307 Kgf/cm²
Módulo de resiliência da 3º camada	E3	1567,9384 Kgf/cm²
Deflexão máxima no centro da carga	D0R	0,106 cm

ANEXO B

RELATÓRIOS DAS VERIFICAÇÕES DAS CONDIÇÕES
DE SOLICITAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO,
CONSIDERANDO UMA CAMADA ADICIONAL,
ELABORADAS NESTA TESE.

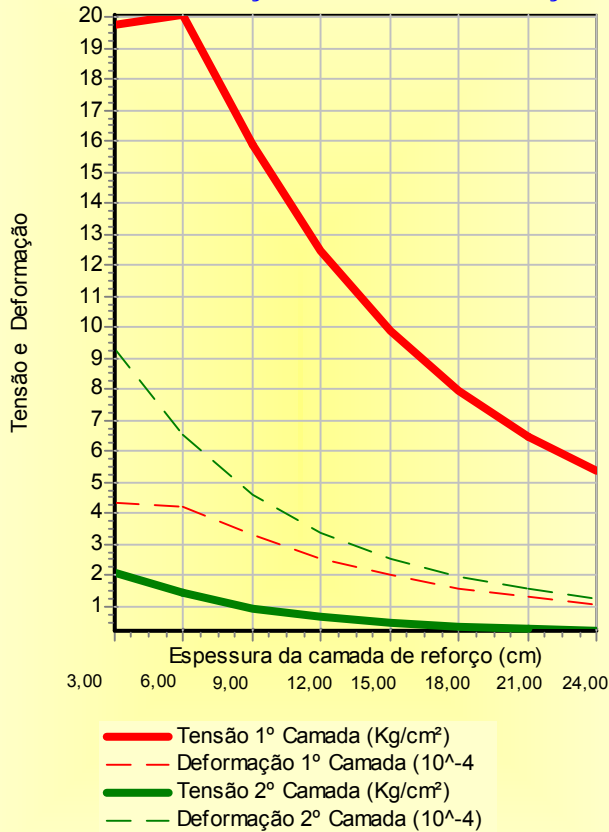
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	22,5	1850,502
3º	Sub-base	16,5	185,050
4º	Subleito	200,0	1480,401

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

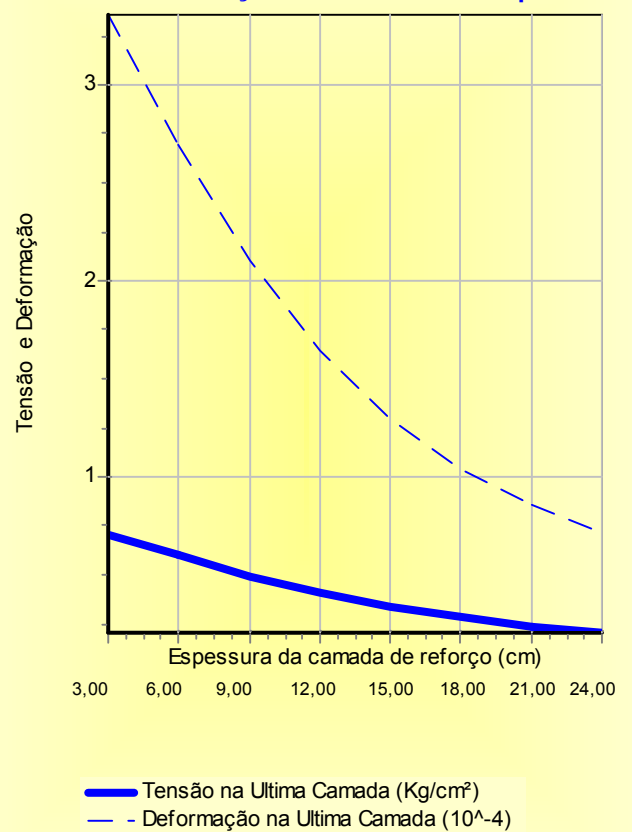
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-19,7308119	-0,0004321	-2,1207666	-0,0009278	0,7069653	0,0003358
5,999	-20,0642265	-0,0004207	-1,4286937	-0,0006562	0,5990041	0,0002696
8,999	-15,8916115	-0,0003295	-0,9614357	-0,0004616	0,4940608	0,0002101
11,999	-12,4560217	-0,0002553	-0,6696875	-0,0003351	0,4063416	0,0001642
14,999	-9,8625983	-0,0002002	-0,4843400	-0,0002522	0,3363525	0,0001298
17,998	-7,9334213	-0,0001598	-0,3625886	-0,0001960	0,2817020	0,0001045
20,998	-6,4947061	-0,0001301	-0,2796299	-0,0001566	0,2388240	0,0000857
23,998	-5,4003552	-0,0001075	-0,2211432	-0,0001279	0,2047556	0,0000713

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



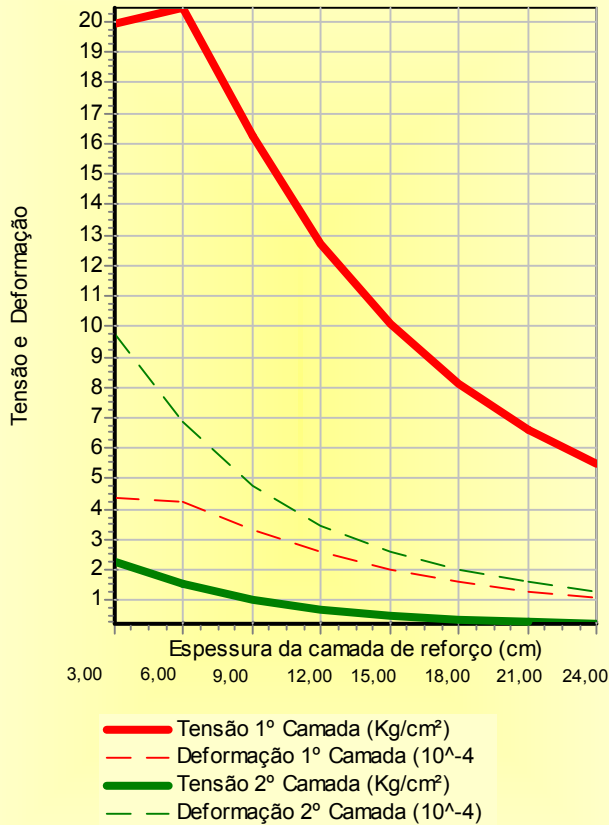
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	22,0	1837,561
3º	Sub-base	20,0	183,756
4º	Subleito	200,0	1470,049

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

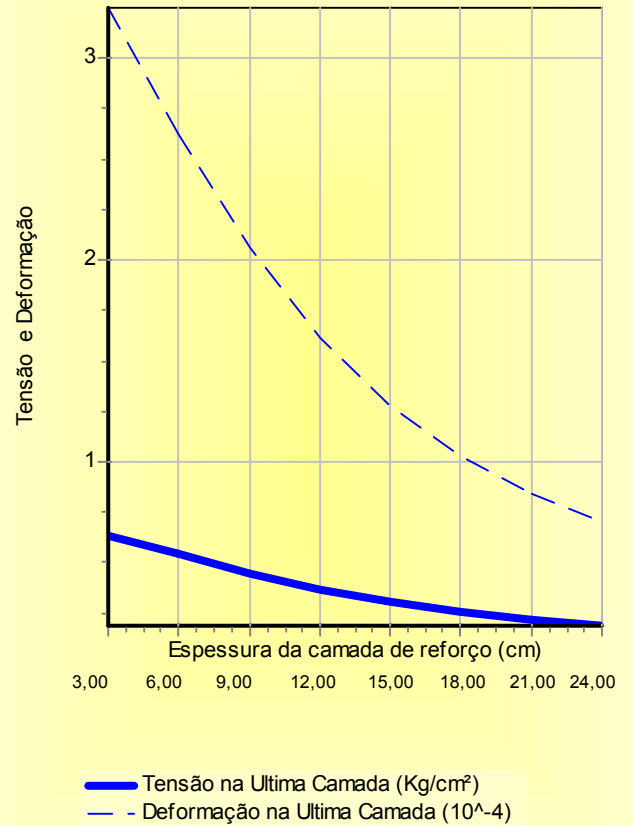
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-19,9340432	-0,0004356	-2,3058911	-0,0009757	0,6393235	0,0003243
5,999	-20,4544005	-0,0004275	-1,5517352	-0,0006849	0,5451063	0,0002622
8,999	-16,2403711	-0,0003354	-1,0439232	-0,0004791	0,4532311	0,0002059
11,999	-12,7285772	-0,0002597	-0,7269612	-0,0003463	0,3748212	0,0001612
14,999	-10,0691548	-0,0002034	-0,5255939	-0,0002598	0,3120045	0,0001277
17,998	-8,0902623	-0,0001622	-0,3933590	-0,0002015	0,2625545	0,0001029
20,998	-6,6153804	-0,0001319	-0,3032882	-0,0001606	0,2234761	0,0000843
23,998	-5,4947761	-0,0001089	-0,2397759	-0,0001310	0,1922167	0,0000701

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



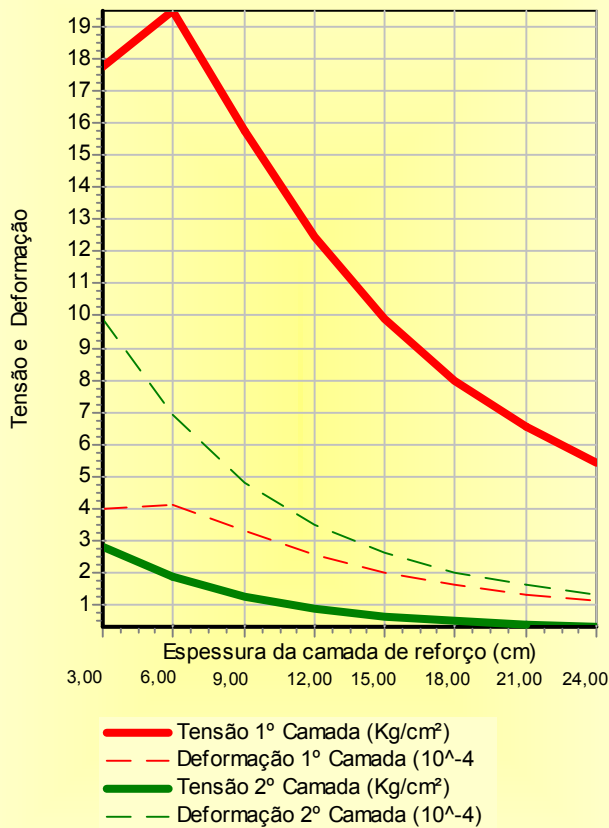
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	20,0	2069,065
3º	Sub-base	25,0	206,906
4º	Subleito	200,0	1655,252

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

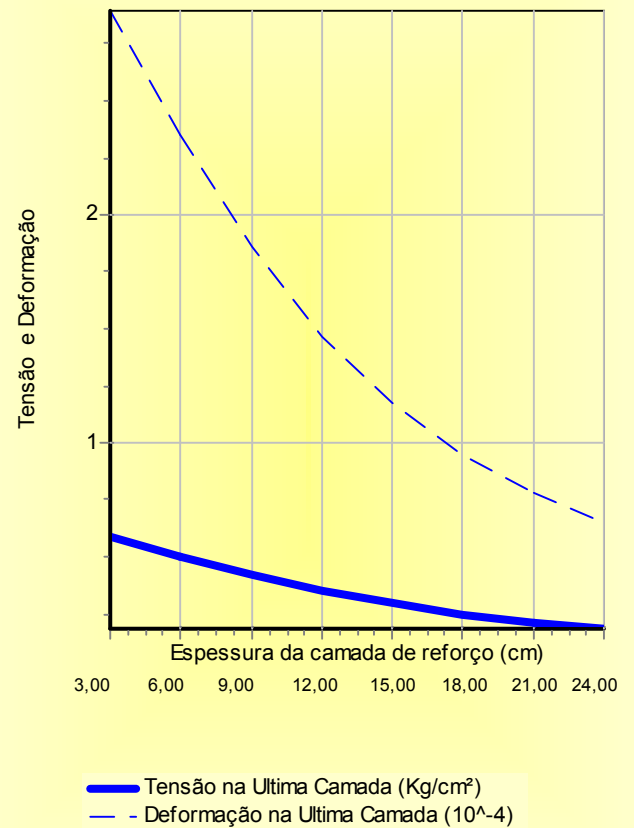
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-17,7596373	-0,0003979	-2,7695583	-0,0009937	0,5899930	0,0002888
5,999	-19,5197843	-0,0004106	-1,8525247	-0,0006891	0,5054182	0,0002348
8,999	-15,7827820	-0,0003270	-1,2489978	-0,0004789	0,4240015	0,0001860
11,999	-12,4592761	-0,0002548	-0,8721439	-0,0003452	0,3539184	0,0001467
14,999	-9,8901371	-0,0002002	-0,6334313	-0,0002585	0,2972869	0,0001171
17,998	-7,9561350	-0,0001599	-0,4761876	-0,0002003	0,2521462	0,0000948
20,998	-6,5097567	-0,0001300	-0,3686627	-0,0001596	0,2161161	0,0000779
23,998	-5,4081572	-0,0001074	-0,2926049	-0,0001301	0,1871453	0,0000650

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



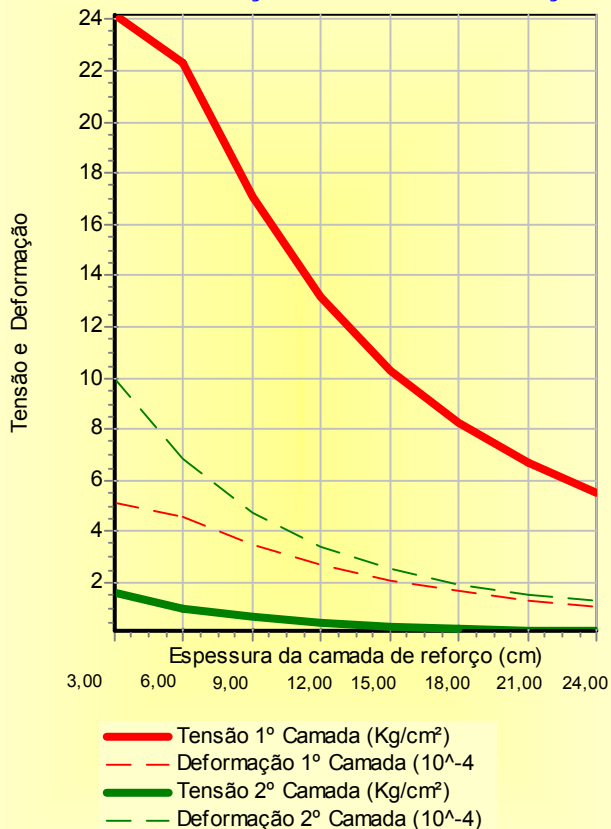
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	22,0	1516,435
3º	Sub-base	18,0	303,287
4º	Subleito	200,0	1516,435

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

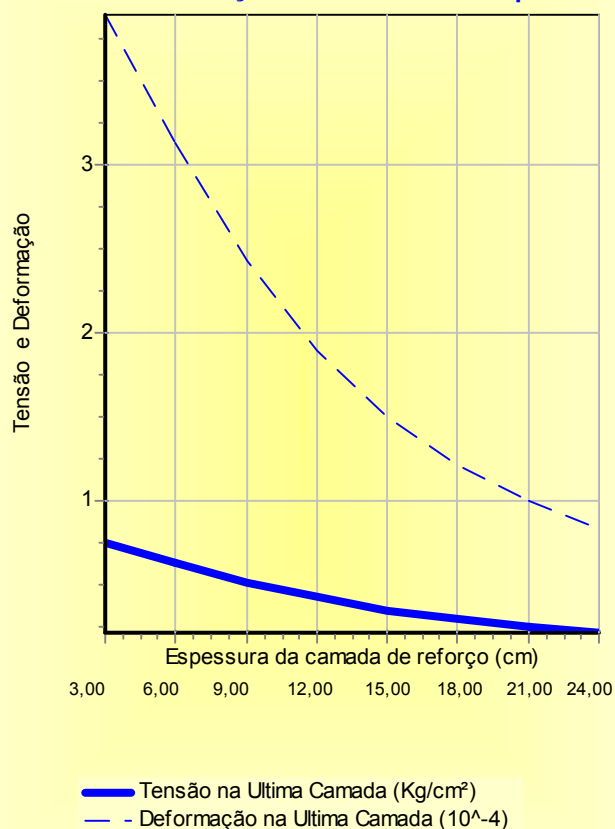
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-24,1869917	-0,0005097	-1,5988588	-0,0009981	0,7434980	0,0003891
5,999	-22,2761228	-0,0004607	-1,0204301	-0,0006873	0,6253072	0,0003122
8,999	-17,0712001	-0,0003506	-0,6532633	-0,0004740	0,5105528	0,0002426
11,999	-13,1482799	-0,0002673	-0,4349998	-0,0003394	0,4166367	0,0001894
14,999	-10,2980179	-0,0002076	-0,3018143	-0,0002530	0,3429972	0,0001498
17,998	-8,2222018	-0,0001647	-0,2172645	-0,0001953	0,2862123	0,0001208
20,998	-6,6944878	-0,0001334	-0,1614420	-0,0001551	0,2420670	0,0000992
23,998	-5,5426087	-0,0001099	-0,1231198	-0,0001261	0,2072237	0,0000828

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



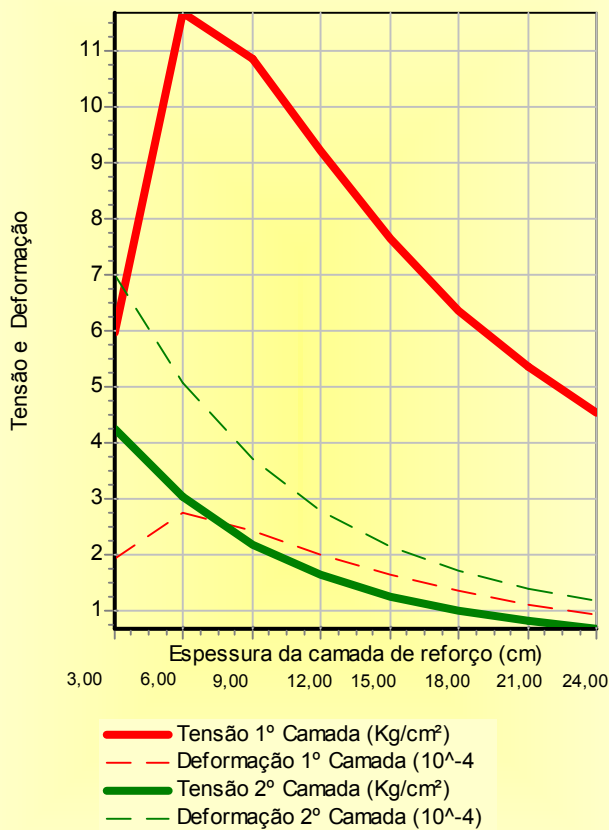
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	17,0	4090,050
3º	Sub-base	23,0	272,670
4º	Subleito	200,0	1363,350

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

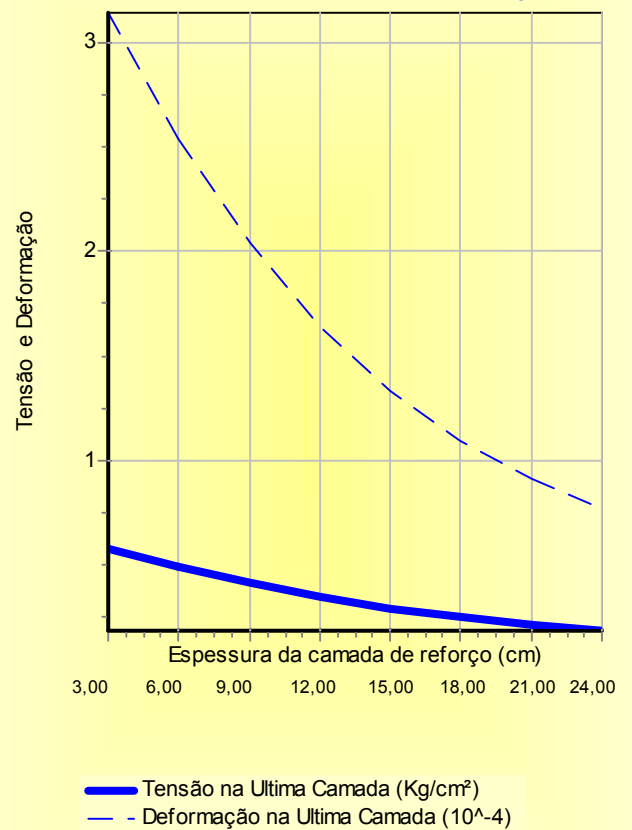
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-5,9537292	-0,0001928	-4,2302908	-0,0007003	0,5769534	0,0003147
5,999	-11,6652818	-0,0002724	-3,0114547	-0,0005065	0,4847439	0,0002543
8,999	-10,8419002	-0,0002407	-2,1763861	-0,0003688	0,4056582	0,0002043
11,999	-9,1916534	-0,0001989	-1,6249493	-0,0002765	0,3392630	0,0001640
14,999	-7,6395120	-0,0001624	-1,2519289	-0,0002139	0,2855435	0,0001330
17,998	-6,3527441	-0,0001333	-0,9909266	-0,0001701	0,2424620	0,0001092
20,998	-5,3328278	-0,0001107	-0,8035102	-0,0001384	0,2079359	0,0000909
23,998	-4,5215872	-0,0000930	-0,6644267	-0,0001148	0,1799684	0,0000766

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



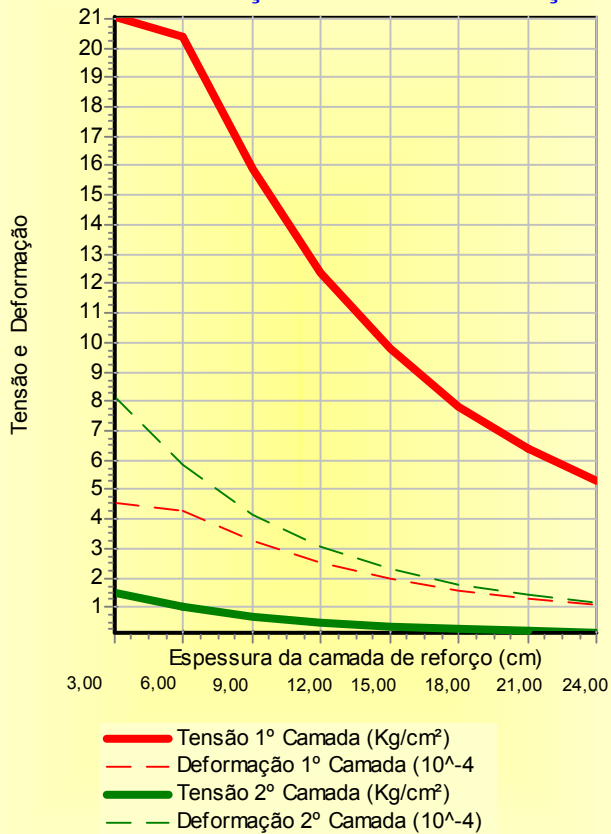
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	24,0	1716,955
3º	Sub-base	20,0	343,391
4º	Subleito	200,0	1716,955

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

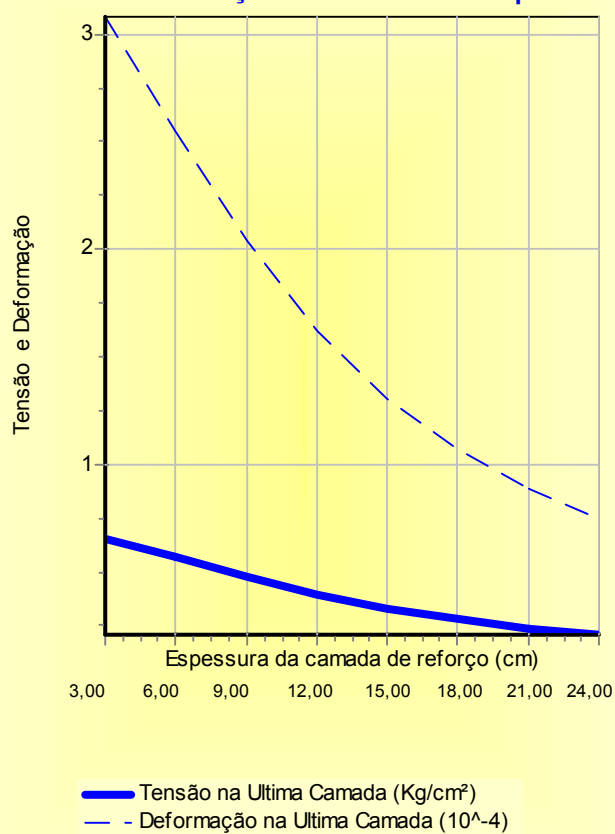
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-21,0528334	-0,0004549	-1,5112563	-0,0008149	0,6548029	0,0003087
5,999	-20,3657712	-0,0004263	-1,0239657	-0,0005855	0,5632209	0,0002552
8,999	-15,8988035	-0,0003301	-0,6865112	-0,0004165	0,4705503	0,0002040
11,999	-12,3841032	-0,0002544	-0,4731993	-0,0003046	0,3909838	0,0001626
14,999	-9,7709444	-0,0001990	-0,3372771	-0,0002304	0,3264814	0,0001306
17,998	-7,8404553	-0,0001586	-0,2482794	-0,0001797	0,2755280	0,0001066
20,998	-6,4065095	-0,0001288	-0,1880147	-0,0001438	0,2351436	0,0000884
23,998	-5,3186934	-0,0001064	-0,1457981	-0,0001177	0,2027981	0,0000743

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



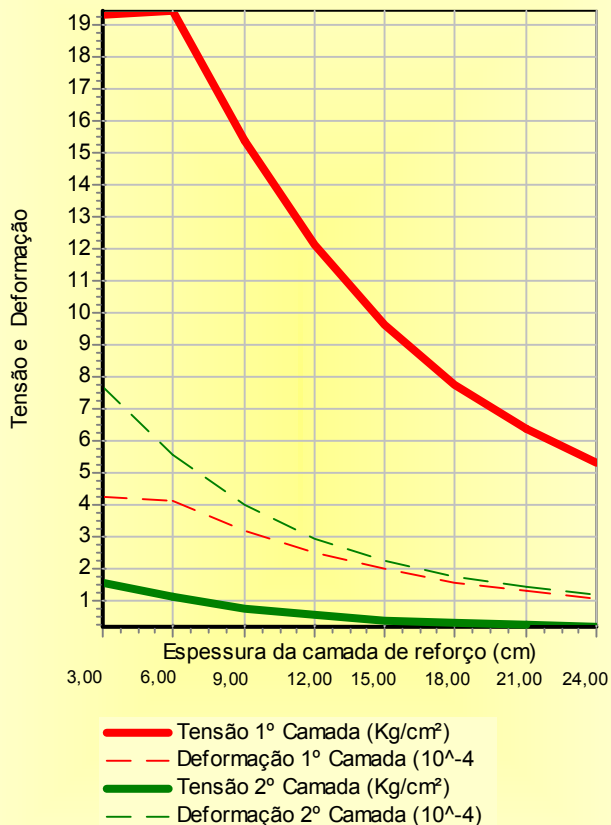
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	24,0	1847,335
3º	Sub-base	20,0	369,467
4º	Subleito	200,0	1477,868

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

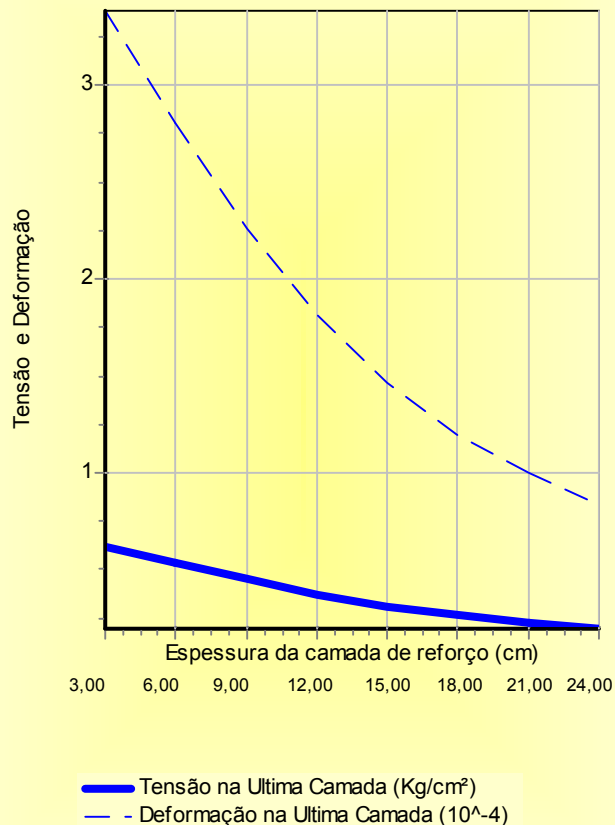
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-19,3328958	-0,0004251	-1,5743724	-0,0007664	0,6186898	0,0003382
5,999	-19,4301774	-0,0004095	-1,0918860	-0,0005564	0,5312684	0,0002809
8,999	-15,3809884	-0,0003209	-0,7500648	-0,0003994	0,4439145	0,0002258
11,999	-12,0857729	-0,0002493	-0,5293444	-0,0002942	0,3688291	0,0001809
14,999	-9,5951978	-0,0001960	-0,3860295	-0,0002237	0,3077820	0,0001459
17,998	-7,7360470	-0,0001568	-0,2905224	-0,0001752	0,2594770	0,0001194
20,998	-6,3450114	-0,0001278	-0,2247935	-0,0001408	0,2211600	0,0000992
23,998	-5,2837772	-0,0001058	-0,1780469	-0,0001155	0,1904654	0,0000835

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



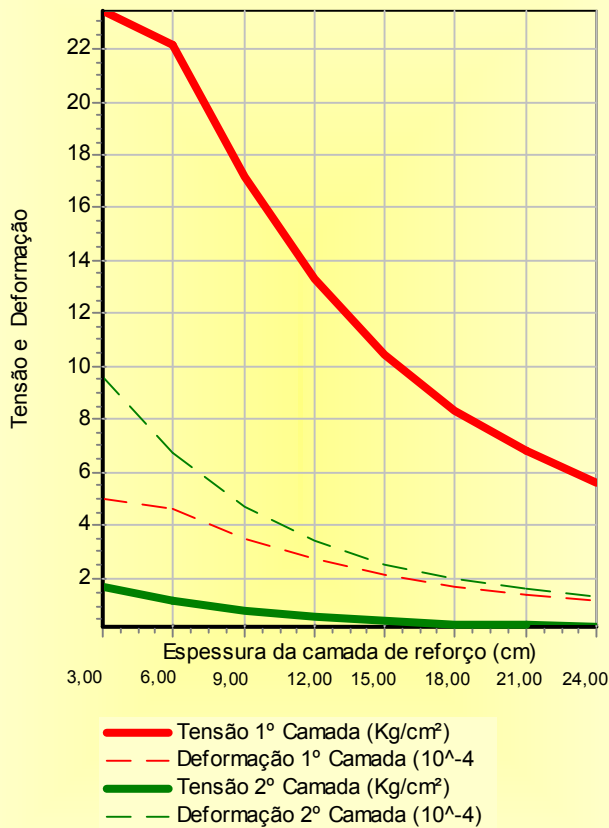
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	23,0	1550,385
3º	Sub-base	27,0	310,077
4º	Subleito	200,0	1550,385

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

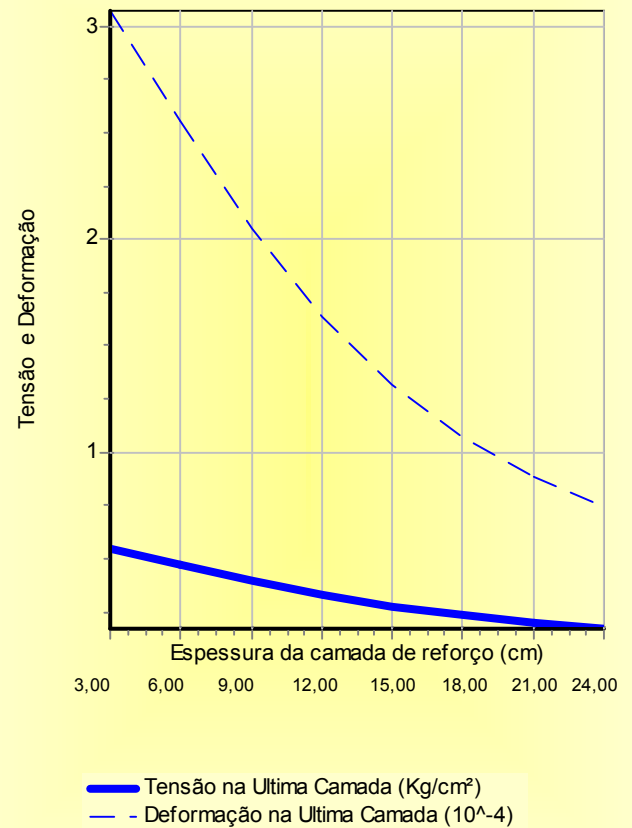
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-23,4402453	-0,0004962	-1,7087943	-0,0009571	0,5519742	0,0003073
5,999	-22,1624711	-0,0004582	-1,1424439	-0,0006714	0,4778474	0,0002558
8,999	-17,1857983	-0,0003523	-0,7598697	-0,0004689	0,4018634	0,0002055
11,999	-13,3148961	-0,0002699	-0,5213086	-0,0003384	0,3354166	0,0001638
14,999	-10,4573959	-0,0002101	-0,3706841	-0,0002535	0,2814886	0,0001317
17,998	-8,3588201	-0,0001668	-0,2725162	-0,0001962	0,2384834	0,0001074
20,998	-6,8073333	-0,0001351	-0,2062951	-0,0001562	0,2041613	0,0000889
23,998	-5,6348369	-0,0001113	-0,1600479	-0,0001272	0,1765117	0,0000745

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



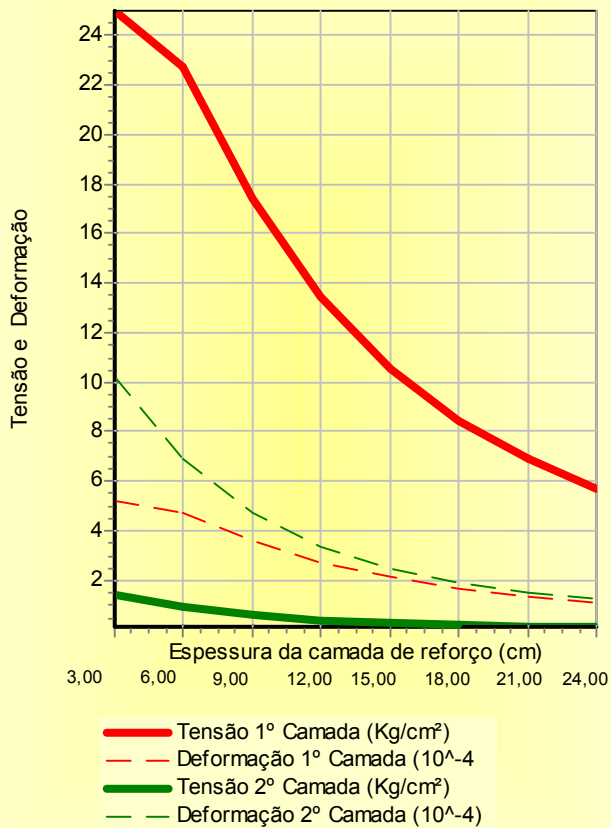
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	20,0	1461,930
3º	Sub-base	20,0	438,578
4º	Subleito	200,0	1169,544

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

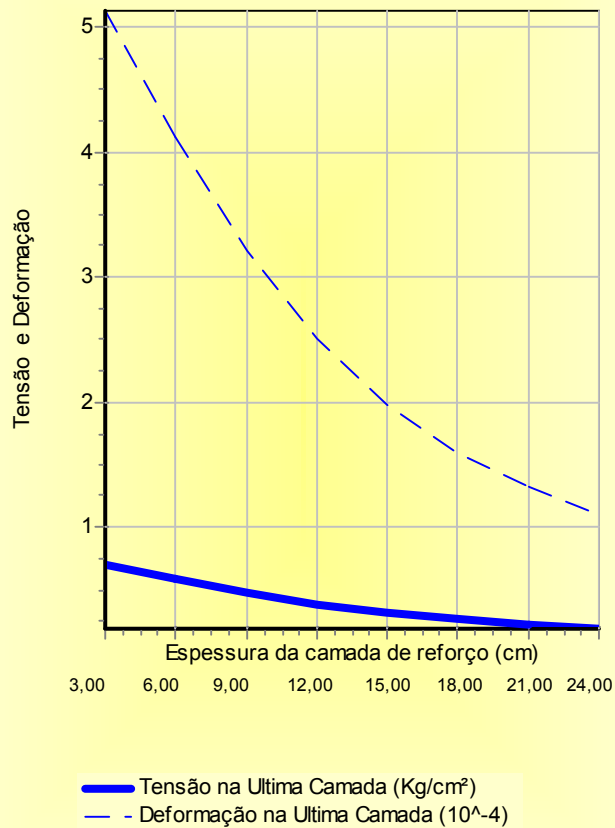
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-25,0072325	-0,0005243	-1,4363016	-0,0010224	0,7044650	0,0005128
5,999	-22,7801490	-0,0004699	-0,8929053	-0,0006873	0,5860031	0,0004117
8,999	-17,4224260	-0,0003568	-0,5666455	-0,0004681	0,4738303	0,0003201
11,999	-13,4234787	-0,0002719	-0,3771793	-0,0003335	0,3836952	0,0002503
14,999	-10,5255977	-0,0002113	-0,2632332	-0,0002479	0,3138123	0,0001983
17,998	-8,4153612	-0,0001678	-0,1912907	-0,0001912	0,2603973	0,0001601
20,998	-6,8609464	-0,0001360	-0,1438154	-0,0001518	0,2191026	0,0001316
23,998	-5,6876201	-0,0001122	-0,1112383	-0,0001234	0,1867490	0,0001099

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



Rodovia: BR-418/MG

Segmento: Ataléia - Carlos Chagas

Estaca/Km: 1266+4,00

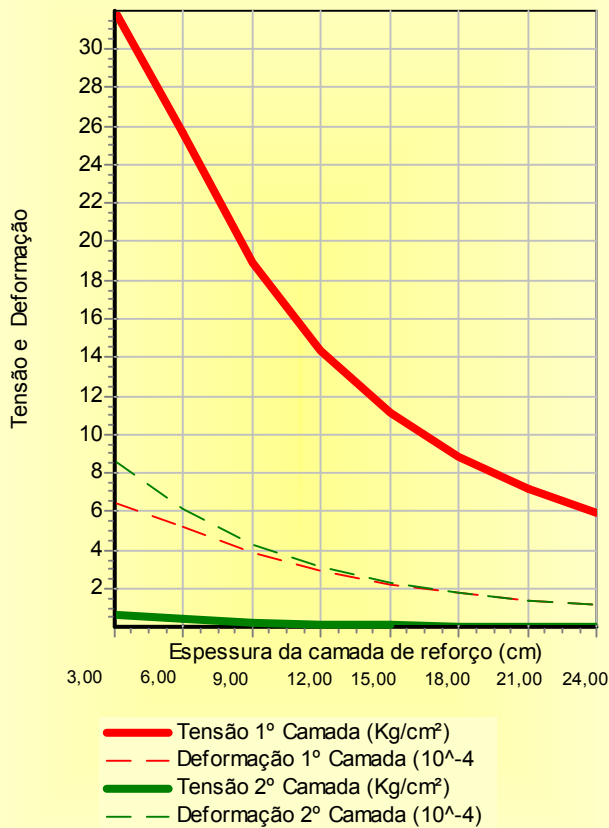
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	28,0	1052,134
3º	Sub-base	16,0	420,854
4º	Subleito	200,0	1052,134

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

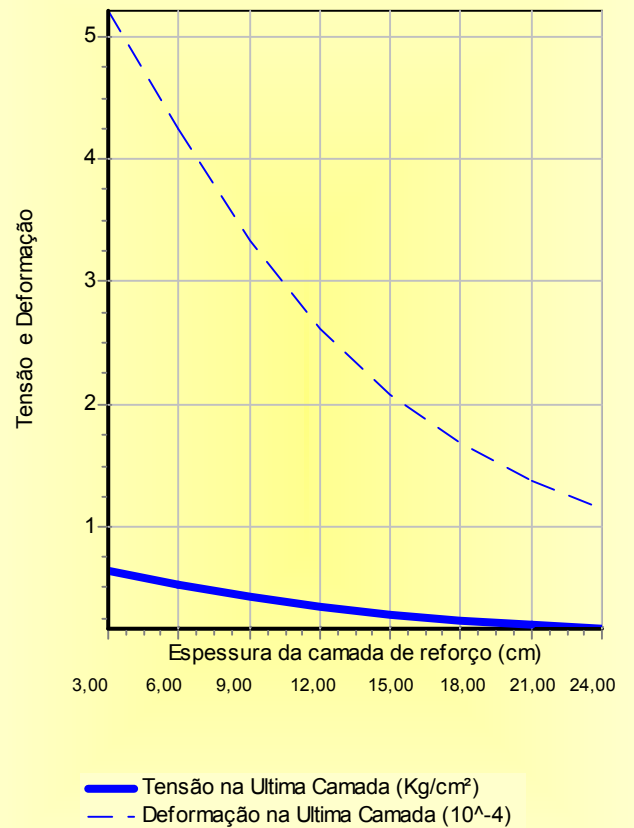
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-31,9779174	-0,0006447	-0,6530891	-0,0008645	0,6370911	0,0005206
5,999	-25,6867919	-0,0005227	-0,4110820	-0,0006133	0,5364610	0,0004248
8,999	-18,9561222	-0,0003843	-0,2502829	-0,0004295	0,4363358	0,0003335
11,999	-14,3725744	-0,0002885	-0,1548243	-0,0003100	0,3540472	0,0002619
14,999	-11,1694155	-0,0002223	-0,0982175	-0,0002319	0,2899243	0,0002082
17,998	-8,8790685	-0,0001755	-0,0636884	-0,0001792	0,2407267	0,0001685
20,998	-7,2096924	-0,0001418	-0,0419958	-0,0001424	0,2025885	0,0001386
23,998	-5,9585955	-0,0001166	-0,0278397	-0,0001156	0,1726449	0,0001158

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



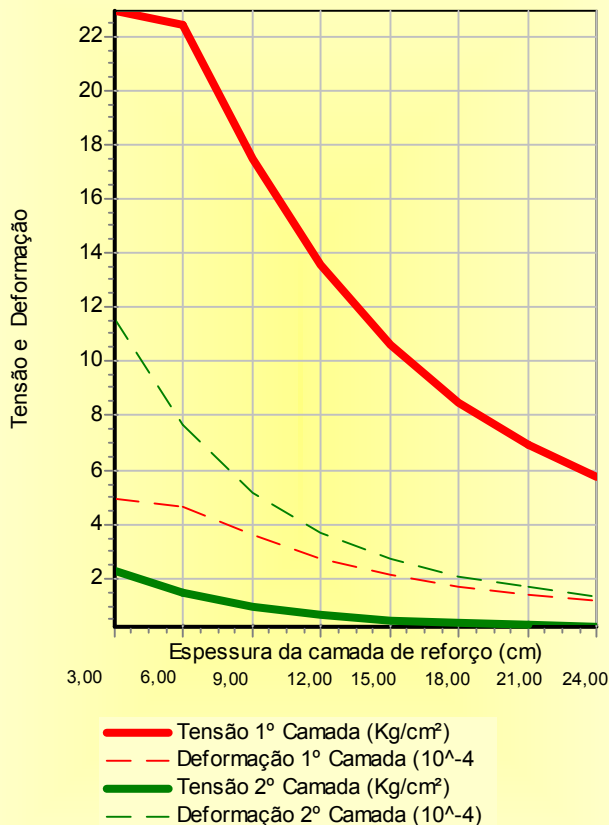
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	18,0	1662,602
3º	Sub-base	28,0	332,520
4º	Subleito	200,0	1330,081

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

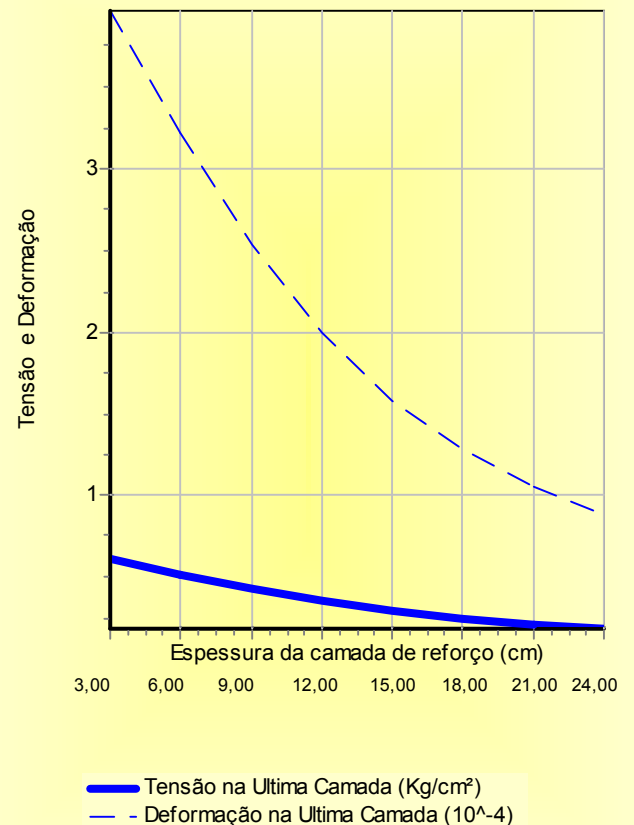
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-22,9706769	-0,0004893	-2,2938278	-0,0011620	0,6062599	0,0003974
5,999	-22,4718569	-0,0004639	-1,4393820	-0,0007674	0,5126615	0,0003224
8,999	-17,5020341	-0,0003574	-0,9289382	-0,0005167	0,4225441	0,0002536
11,999	-13,5524780	-0,0002736	-0,6292986	-0,0003654	0,3471146	0,0001990
14,999	-10,6342738	-0,0002127	-0,4470538	-0,0002702	0,2878199	0,0001583
17,998	-8,4953691	-0,0001687	-0,3302347	-0,0002075	0,2415588	0,0001281
20,998	-6,9168933	-0,0001366	-0,2521301	-0,0001643	0,2052594	0,0001053
23,998	-5,7256719	-0,0001125	-0,1977575	-0,0001333	0,1763183	0,0000878

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



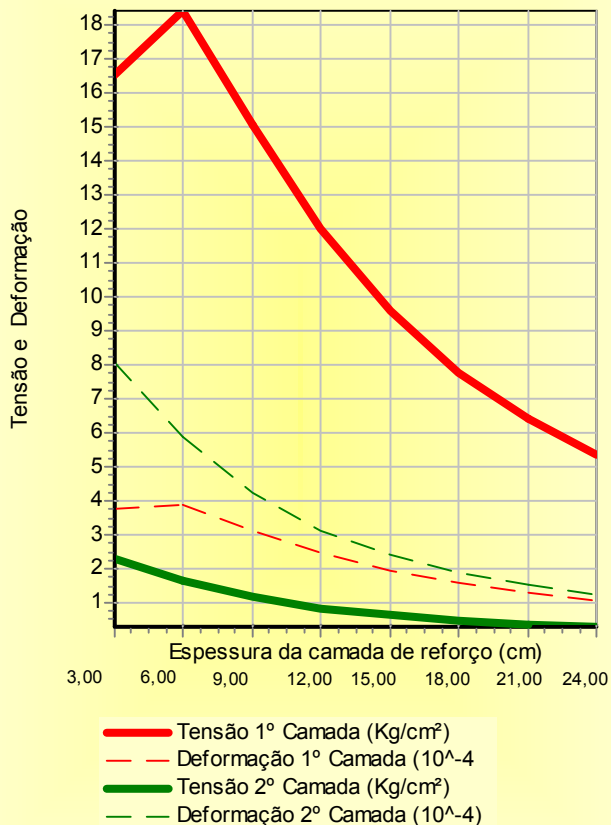
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	24,0	2102,170
3º	Sub-base	29,0	210,217
4º	Subleito	200,0	1681,736

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

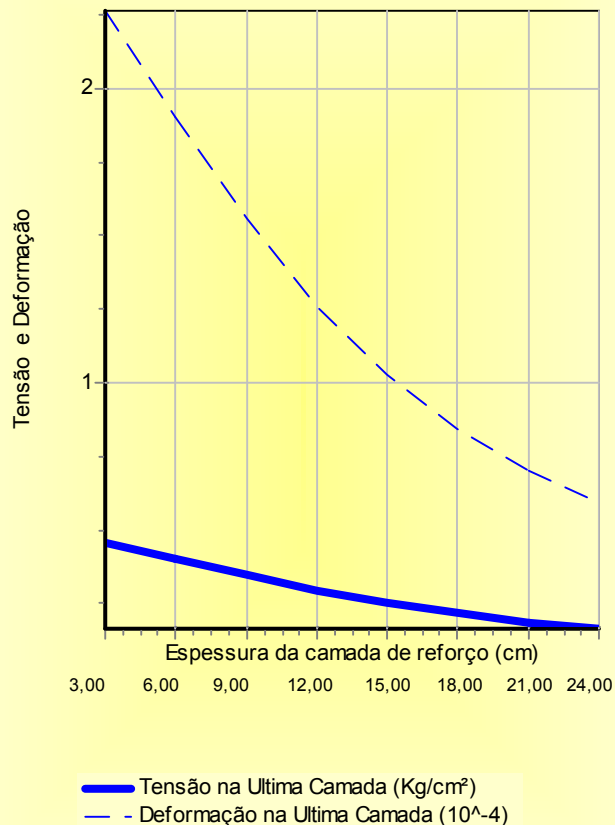
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-16,5385179	-0,0003763	-2,3158283	-0,0008056	0,4610414	0,0002268
5,999	-18,4163683	-0,0003908	-1,6573752	-0,0005897	0,4045463	0,0001908
8,999	-15,0692069	-0,0003147	-1,1714076	-0,0004261	0,3476630	0,0001558
11,999	-12,0235269	-0,0002476	-0,8453713	-0,0003148	0,2966115	0,0001263
14,999	-9,6209283	-0,0001959	-0,6274311	-0,0002397	0,2535049	0,0001028
17,998	-7,7842335	-0,0001572	-0,4789490	-0,0001878	0,2179744	0,0000845
20,998	-6,3956368	-0,0001283	-0,3749986	-0,0001508	0,1888369	0,0000703
23,998	-5,3293844	-0,0001063	-0,3001712	-0,0001237	0,1651167	0,0000593

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



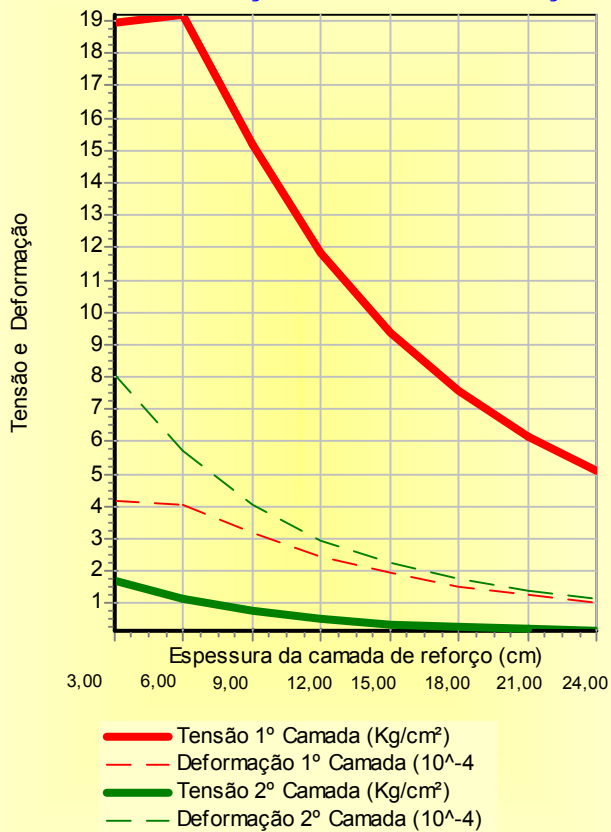
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	22,0	1923,626
3º	Sub-base	20,0	384,725
4º	Subleito	200,0	1923,626

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

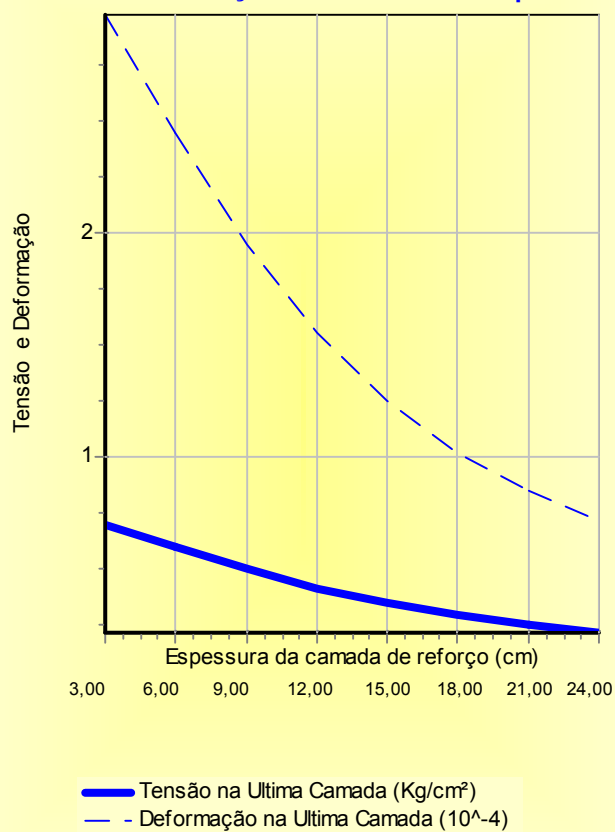
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-18,9438046	-0,0004187	-1,6899429	-0,0008069	0,7020323	0,0002970
5,999	-19,1833123	-0,0004052	-1,1292909	-0,0005737	0,6015034	0,0002442
8,999	-15,1529657	-0,0003170	-0,7535196	-0,0004063	0,5016674	0,0001948
11,999	-11,8644043	-0,0002456	-0,5197807	-0,0002968	0,4169392	0,0001553
14,999	-9,3885144	-0,0001926	-0,3716848	-0,0002245	0,3483448	0,0001249
17,998	-7,5482957	-0,0001538	-0,2747202	-0,0001753	0,2942737	0,0001021
20,998	-6,1766984	-0,0001252	-0,2089801	-0,0001405	0,2513340	0,0000847
23,998	-5,1336034	-0,0001035	-0,1629181	-0,0001151	0,2169769	0,0000713

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



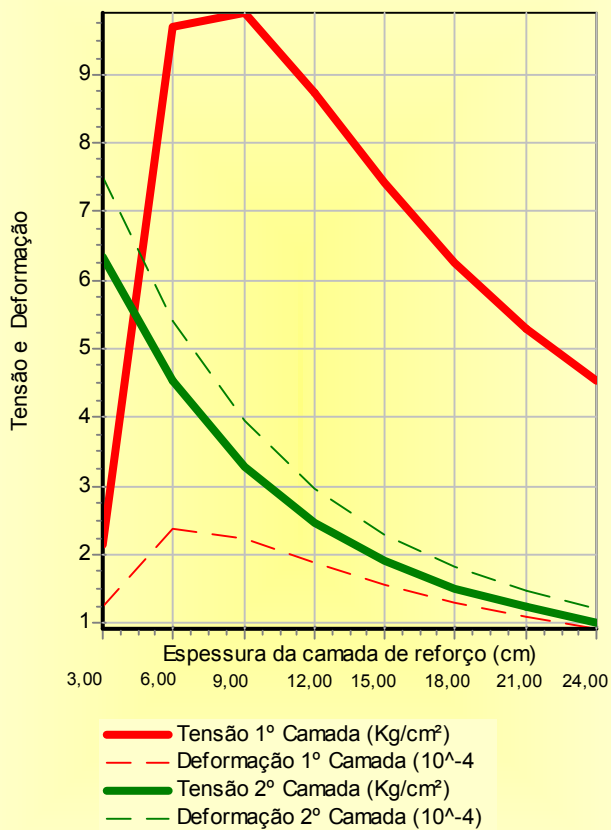
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	15,0	5226,938
3º	Sub-base	30,0	174,231
4º	Subleito	200,0	1045,388

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

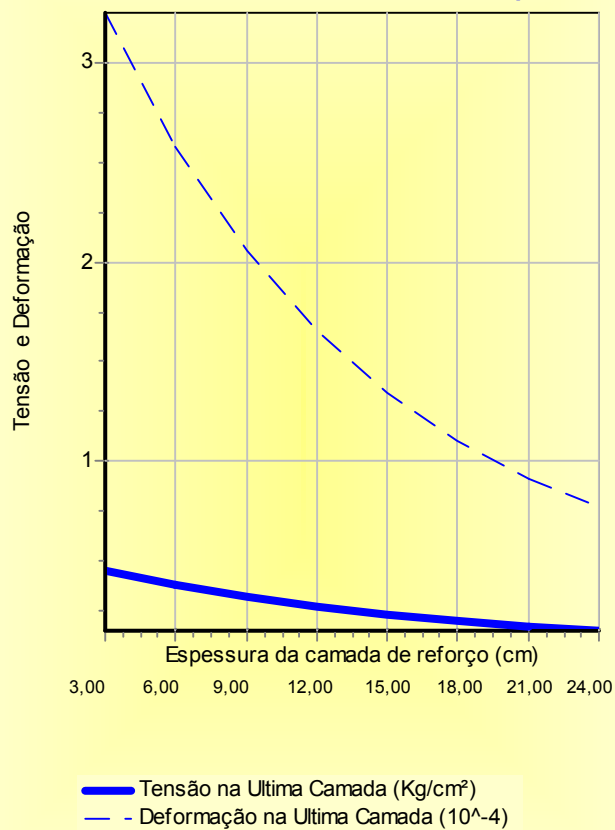
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-2,1553304	-0,0001244	-6,3251419	-0,0007516	0,4480060	0,0003256
5,999	-9,6775475	-0,0002369	-4,5213295	-0,0005410	0,3729920	0,0002586
8,999	-9,8889086	-0,0002232	-3,2898606	-0,0003938	0,3122307	0,0002060
11,999	-8,7184366	-0,0001898	-2,4714533	-0,0002954	0,2624809	0,0001652
14,999	-7,4059377	-0,0001575	-1,9135593	-0,0002286	0,2222417	0,0001338
17,998	-6,2456422	-0,0001307	-1,5199722	-0,0001817	0,1897634	0,0001096
20,998	-5,2945601	-0,0001094	-1,2362359	-0,0001478	0,1635440	0,0000910
23,998	-4,5221683	-0,0000924	-1,0247359	-0,0001225	0,1422590	0,0000766

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



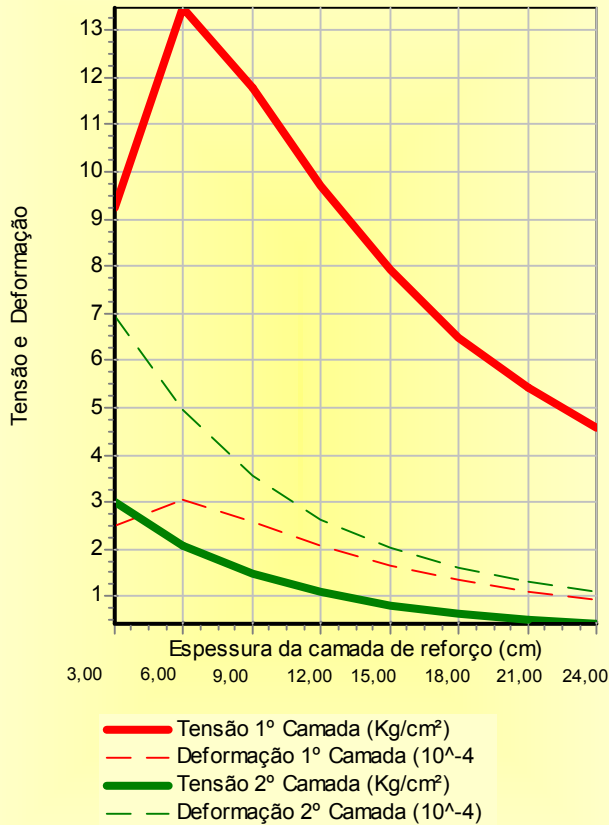
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	17,0	3380,449
3º	Sub-base	22,0	507,068
4º	Subleito	200,0	1690,224

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

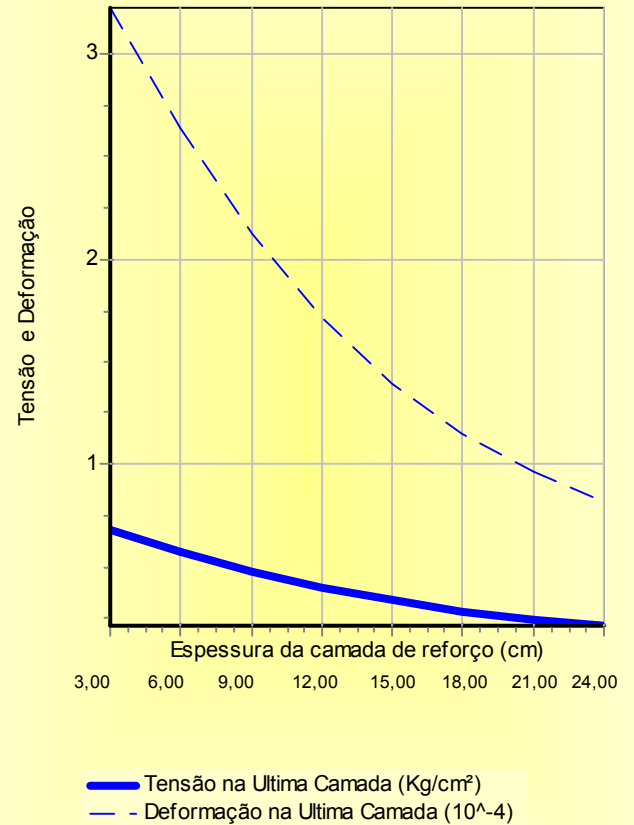
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-9,2347099	-0,0002509	-3,0205950	-0,0006931	0,6757871	0,0003229
5,999	-13,4679782	-0,0003043	-2,0917344	-0,0004946	0,5701143	0,0002641
8,999	-11,7603533	-0,0002574	-1,4774366	-0,0003558	0,4746290	0,0002124
11,999	-9,6812185	-0,0002079	-1,0842054	-0,0002647	0,3953030	0,0001714
14,999	-7,9071323	-0,0001675	-0,8236564	-0,0002037	0,3311900	0,0001394
17,998	-6,4981426	-0,0001363	-0,6457953	-0,0001614	0,2802359	0,0001150
20,998	-5,4081117	-0,0001124	-0,5192400	-0,0001309	0,2397052	0,0000962
23,998	-4,5550472	-0,0000940	-0,4264094	-0,0001084	0,2071042	0,0000815

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



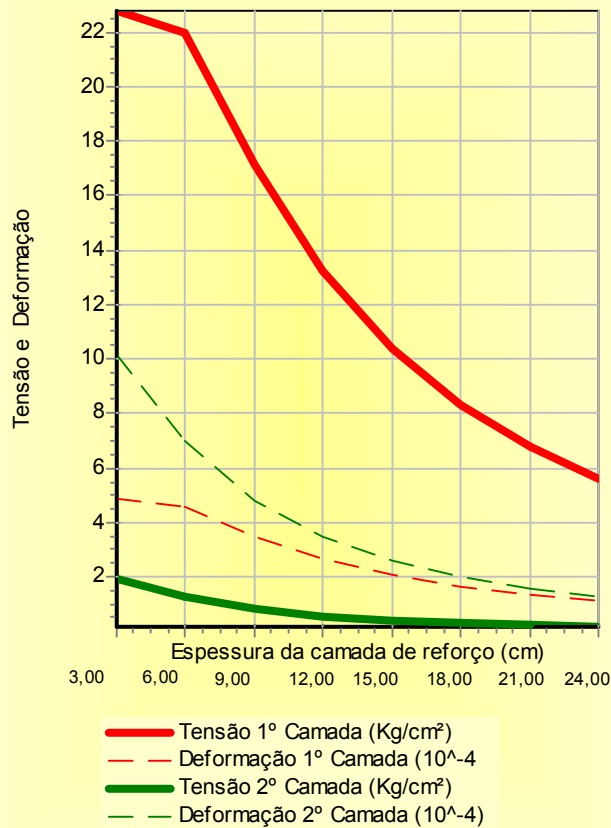
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	21,0	1623,059
3º	Sub-base	28,0	324,612
4º	Subleito	200,0	1623,059

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

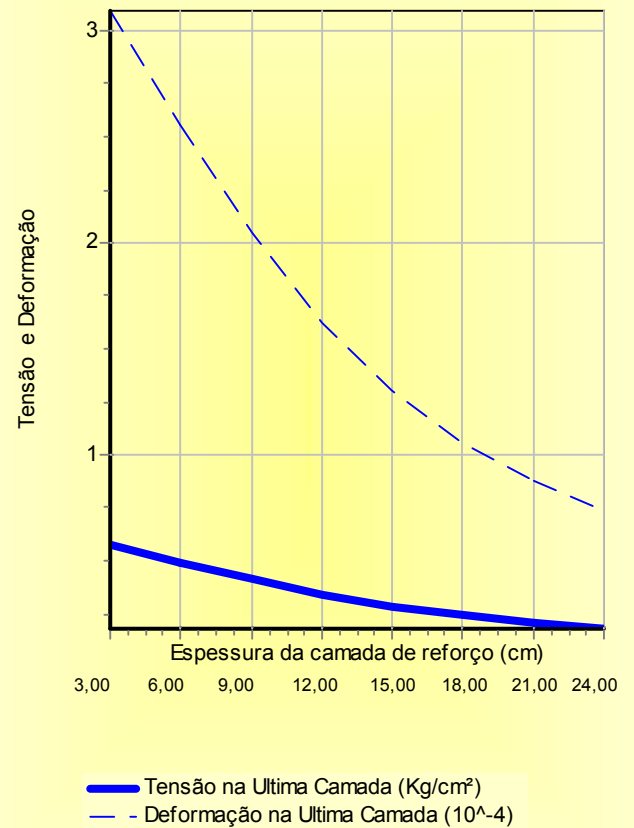
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-22,7807839	-0,0004852	-1,9142444	-0,0010132	0,5736236	0,0003096
5,999	-21,9678001	-0,0004548	-1,2505494	-0,0006963	0,4941454	0,0002559
8,999	-17,0939571	-0,0003505	-0,8213678	-0,0004803	0,4141597	0,0002046
11,999	-13,2485689	-0,0002687	-0,5602064	-0,0003442	0,3449532	0,0001626
14,999	-10,4021875	-0,0002091	-0,3973038	-0,0002567	0,2891127	0,0001305
17,998	-8,3113196	-0,0001659	-0,2918456	-0,0001982	0,2448618	0,0001063
20,998	-6,7661197	-0,0001343	-0,2209503	-0,0001575	0,2096187	0,0000879
23,998	-5,5989483	-0,0001106	-0,1715419	-0,0001281	0,1812590	0,0000736

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



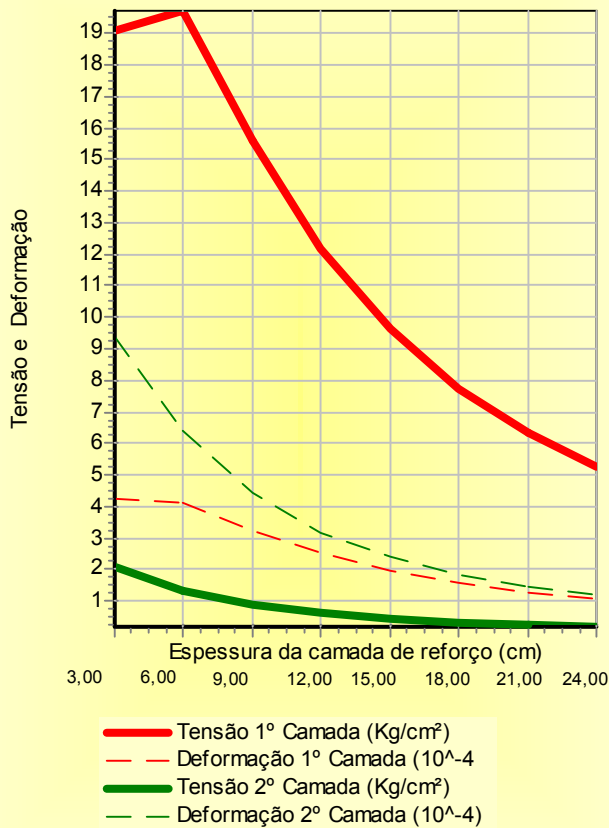
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	19,0	1959,921
3º	Sub-base	25,0	391,984
4º	Subleito	200,0	1959,921

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

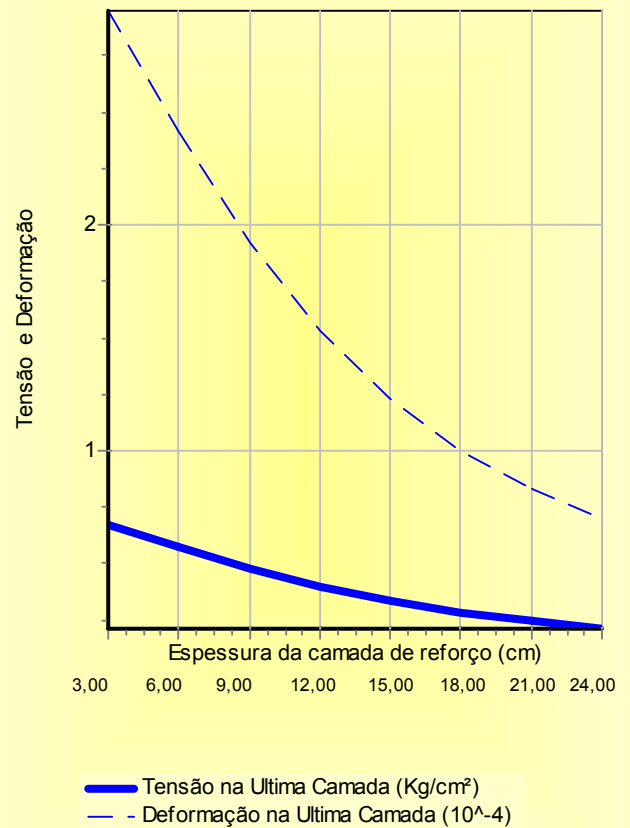
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-19,1085111	-0,0004218	-2,1106535	-0,0009370	0,6708992	0,0002951
5,999	-19,7157323	-0,0004147	-1,3626450	-0,0006414	0,5737627	0,0002417
8,999	-15,6105501	-0,0003247	-0,8943669	-0,0004433	0,4786220	0,0001923
11,999	-12,2029839	-0,0002510	-0,6113869	-0,0003192	0,3980563	0,0001529
14,999	-9,6338634	-0,0001964	-0,4359937	-0,0002392	0,3332803	0,0001228
17,998	-7,7280248	-0,0001565	-0,3222001	-0,0001855	0,2821436	0,0001002
20,998	-6,3109370	-0,0001271	-0,2454780	-0,0001480	0,2415277	0,0000830
23,998	-5,2360153	-0,0001049	-0,1917977	-0,0001208	0,2089866	0,0000698

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



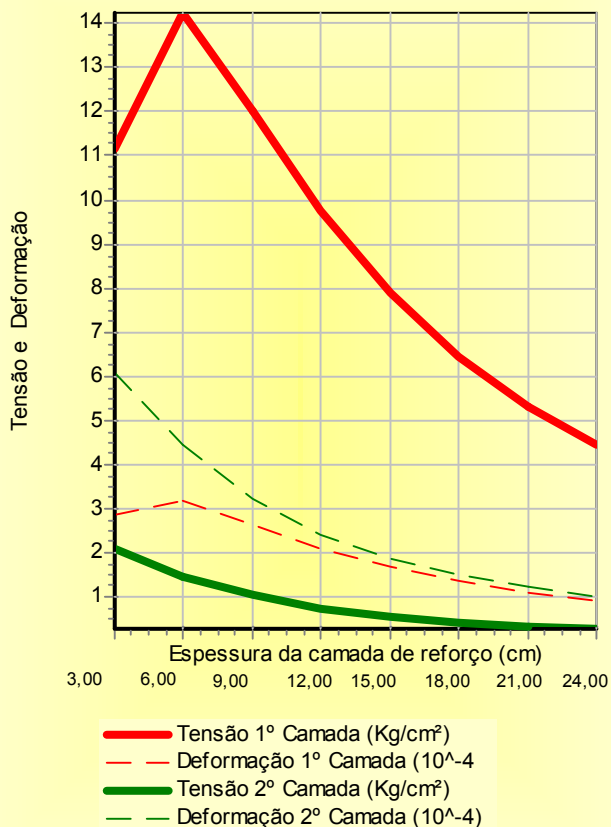
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	20,0	2960,797
3º	Sub-base	23,0	592,159
4º	Subleito	200,0	2368,638

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

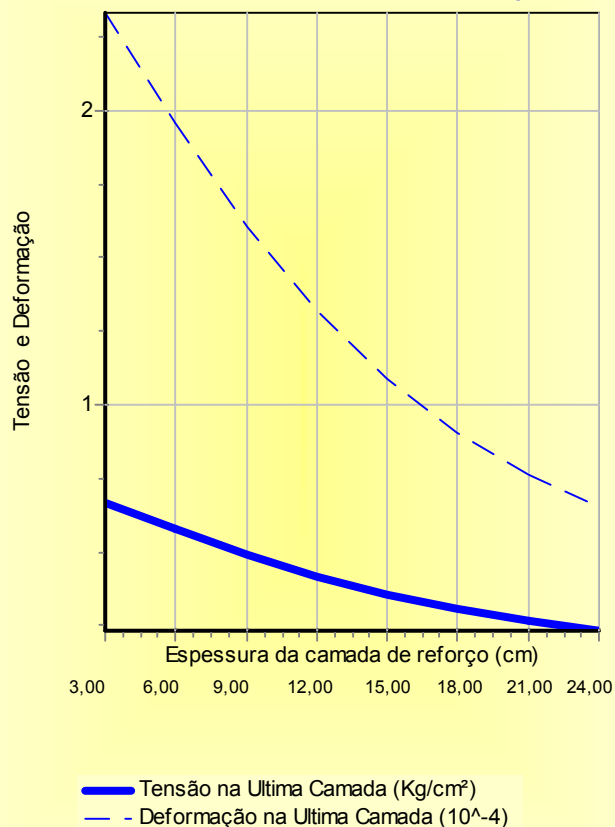
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-11,1689395	-0,0002850	-2,0786962	-0,0006065	0,6593189	0,0002337
5,999	-14,2413370	-0,0003181	-1,4581591	-0,0004434	0,5705475	0,0001961
8,999	-12,0278628	-0,0002627	-1,0282811	-0,0003234	0,4845336	0,0001608
11,999	-9,7488367	-0,0002098	-0,7468019	-0,0002425	0,4099984	0,0001317
14,999	-7,8868778	-0,0001678	-0,5607679	-0,0001873	0,3478517	0,0001082
17,998	-6,4370777	-0,0001358	-0,4334626	-0,0001487	0,2976188	0,0000901
20,998	-5,3286448	-0,0001116	-0,3435910	-0,0001209	0,2569125	0,0000758
23,998	-4,4688527	-0,0000930	-0,2781638	-0,0001002	0,2238636	0,0000647

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



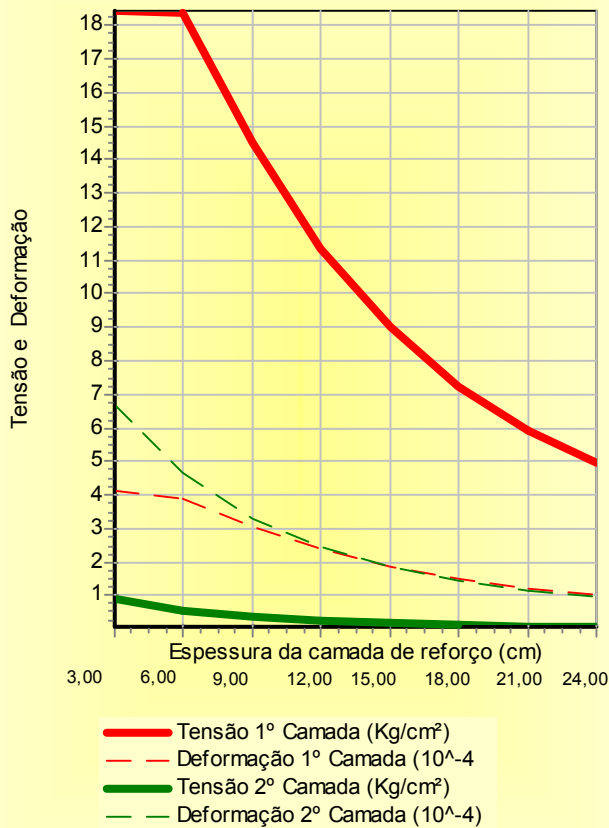
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	19,0	1956,803
3º	Sub-base	32,0	978,401
4º	Subleito	200,0	1956,803

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

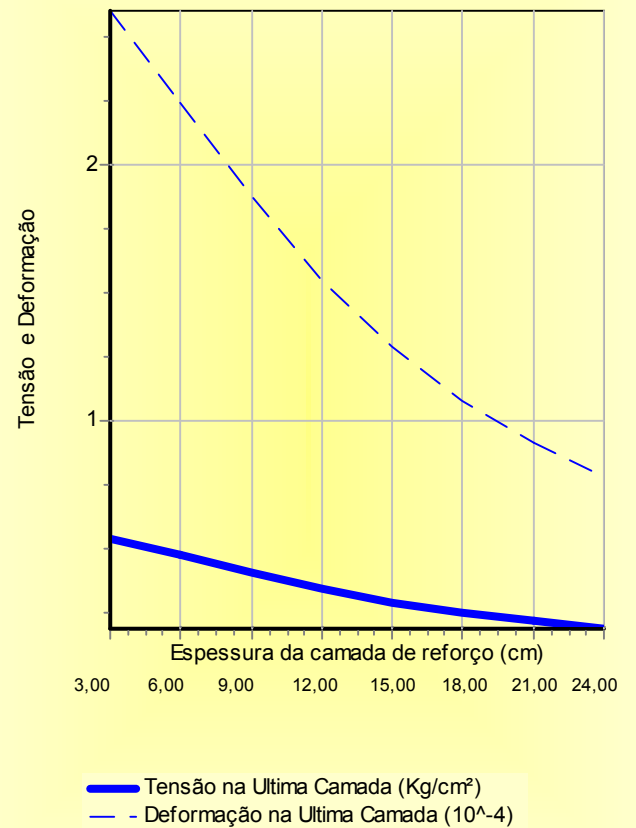
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-18,4286747	-0,0004101	-0,9036659	-0,0006712	0,5425980	0,0002597
5,999	-18,3908208	-0,0003914	-0,5703379	-0,0004681	0,4778278	0,0002242
8,999	-14,4678351	-0,0003056	-0,3657619	-0,0003304	0,4092872	0,0001873
11,999	-11,3352134	-0,0002370	-0,2445944	-0,0002425	0,3474078	0,0001549
14,999	-8,9876579	-0,0001864	-0,1705718	-0,0001848	0,2956580	0,0001287
17,998	-7,2418803	-0,0001491	-0,1231116	-0,0001453	0,2533953	0,0001078
20,998	-5,9382822	-0,0001216	-0,0914957	-0,0001172	0,2190195	0,0000913
23,998	-4,9444349	-0,0001007	-0,0696596	-0,0000966	0,1909686	0,0000782

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



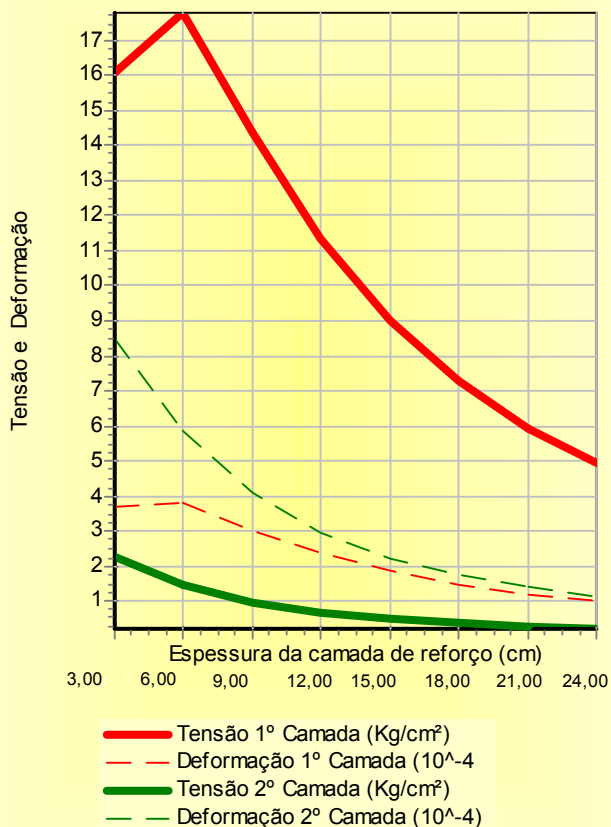
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	18,0	2308,351
3º	Sub-base	25,0	461,670
4º	Subleito	200,0	2308,351

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

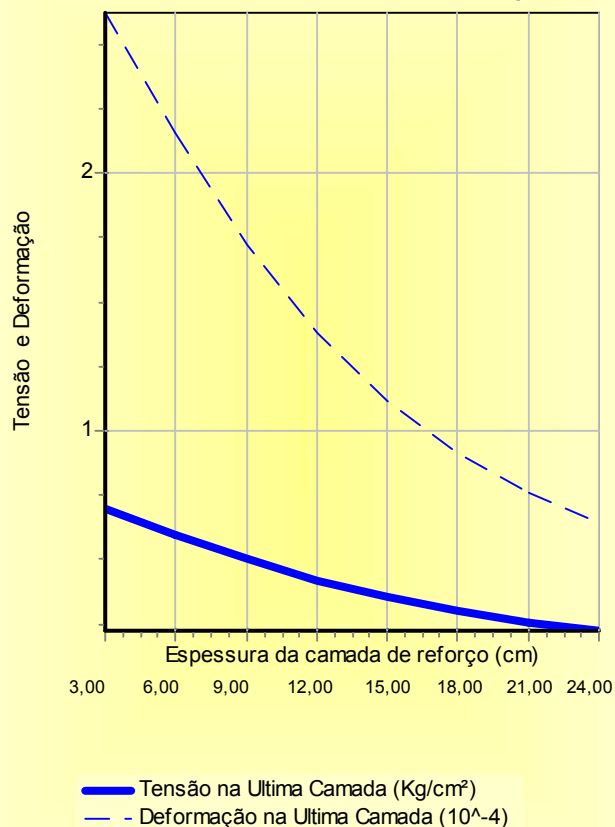
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-16,0396061	-0,0003688	-2,2678155	-0,0008499	0,6979250	0,0002622
5,999	-17,7762651	-0,0003802	-1,4762645	-0,0005860	0,5982049	0,0002154
8,999	-14,3633937	-0,0003029	-0,9803191	-0,0004086	0,5014069	0,0001725
11,999	-11,3436471	-0,0002365	-0,6781864	-0,0002965	0,4193760	0,0001382
14,999	-9,0146219	-0,0001862	-0,4892710	-0,0002236	0,3527603	0,0001117
17,998	-7,2608547	-0,0001490	-0,3654841	-0,0001744	0,2998722	0,0000916
20,998	-5,9484943	-0,0001214	-0,2811195	-0,0001398	0,2576479	0,0000763
23,998	-4,9474230	-0,0001004	-0,2215845	-0,0001145	0,2236530	0,0000644

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



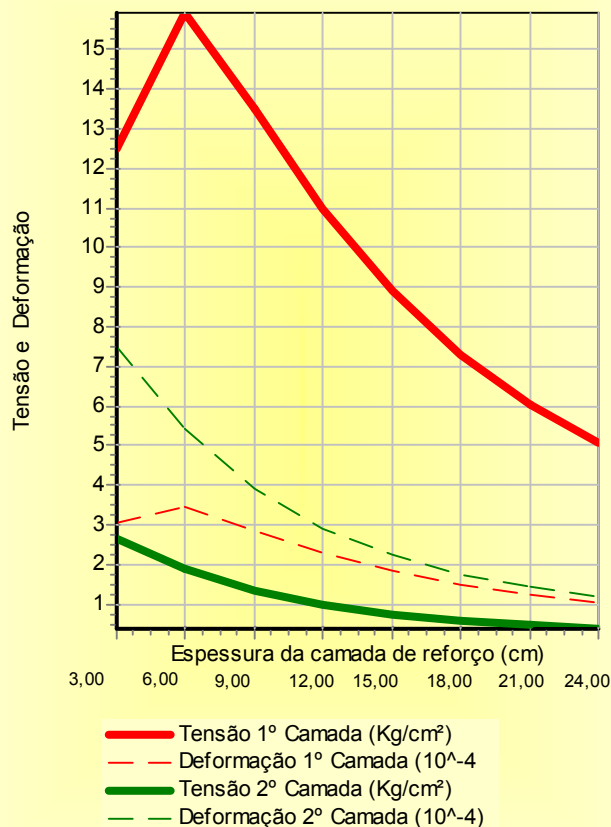
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	20,0	2645,556
3º	Sub-base	30,0	396,834
4º	Subleito	200,0	1322,778

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

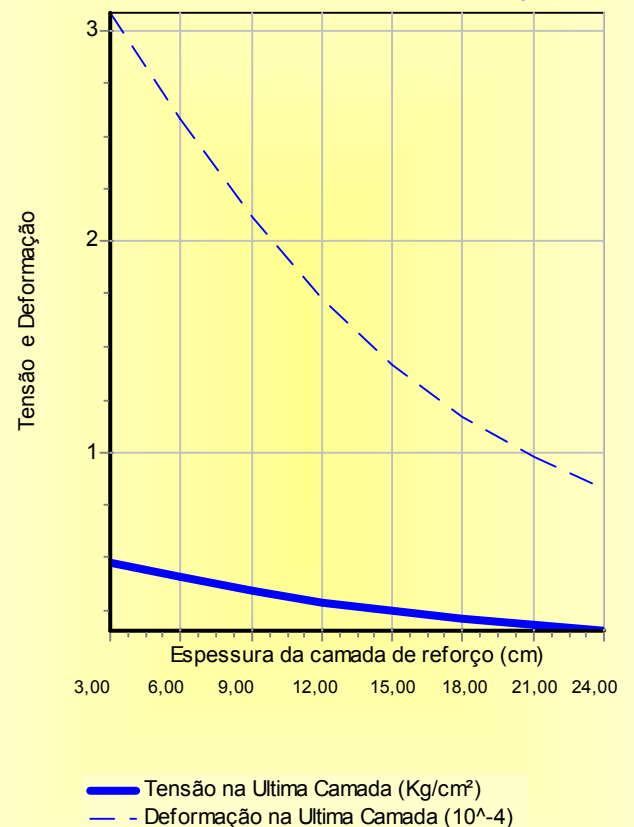
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-12,5107561	-0,0003072	-2,6326485	-0,0007512	0,4806504	0,0003082
5,999	-15,9231396	-0,0003470	-1,8655196	-0,0005428	0,4143991	0,0002586
8,999	-13,4970172	-0,0002873	-1,3294137	-0,0003916	0,3515795	0,0002122
11,999	-10,9721268	-0,0002296	-0,9748688	-0,0002907	0,2964626	0,0001728
14,999	-8,8944957	-0,0001837	-0,7385047	-0,0002227	0,2509626	0,0001415
17,998	-7,2699102	-0,0001487	-0,5757223	-0,0001756	0,2140056	0,0001171
20,998	-6,0234636	-0,0001222	-0,4600810	-0,0001419	0,1840963	0,0000980
23,998	-5,0549841	-0,0001018	-0,3754990	-0,0001170	0,1597130	0,0000829

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



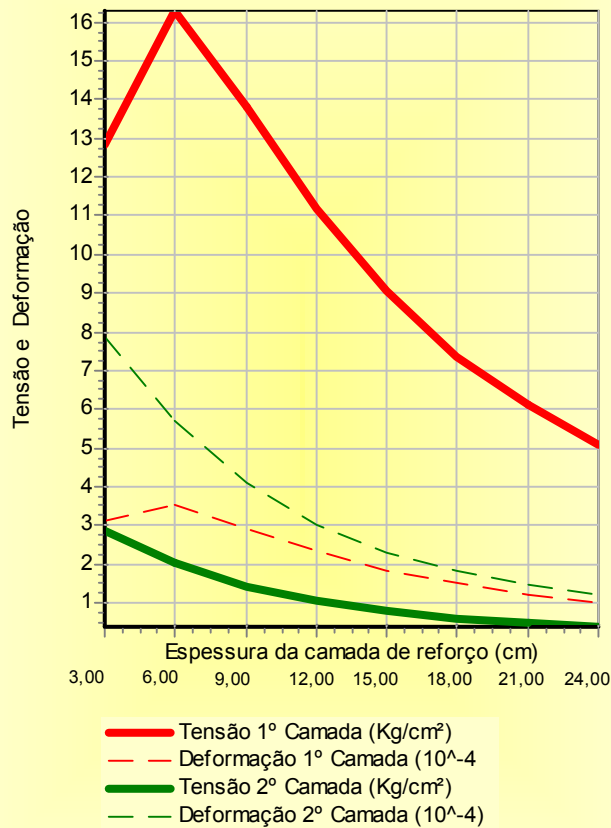
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	21,0	2588,813
3º	Sub-base	30,0	258,881
4º	Subleito	200,0	1553,285

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

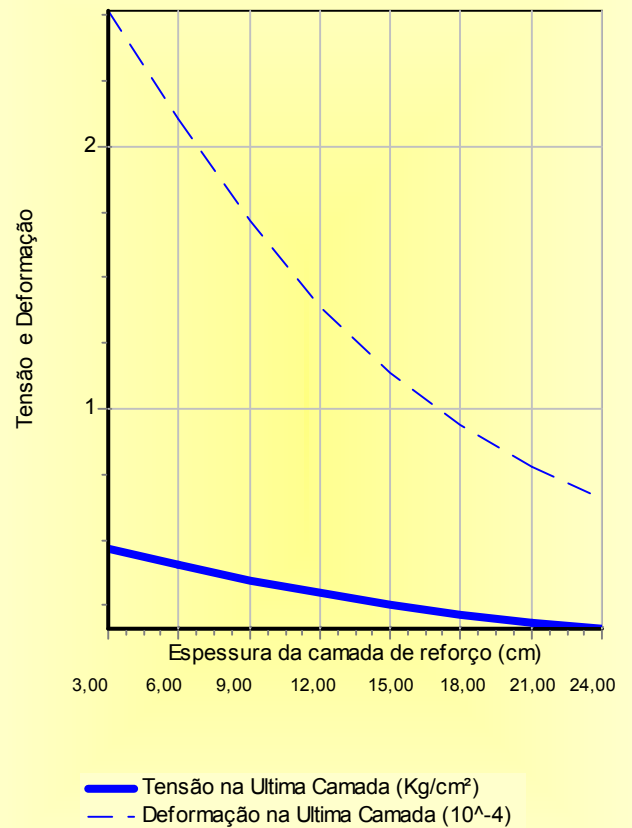
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-12,8153354	-0,0003122	-2,8540848	-0,0007871	0,4729296	0,0002522
5,999	-16,2903306	-0,0003532	-2,0282255	-0,0005704	0,4105852	0,0002109
8,999	-13,8005215	-0,0002923	-1,4413251	-0,0004112	0,3505990	0,0001720
11,999	-11,1991746	-0,0002333	-1,0503906	-0,0003044	0,2979033	0,0001396
14,999	-9,0571130	-0,0001863	-0,7896878	-0,0002324	0,2538261	0,0001139
17,998	-7,3842048	-0,0001505	-0,6108395	-0,0001826	0,2177872	0,0000939
20,998	-6,1030836	-0,0001235	-0,4844726	-0,0001471	0,1882455	0,0000782
23,998	-5,1100443	-0,0001027	-0,3926300	-0,0001210	0,1642393	0,0000661

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



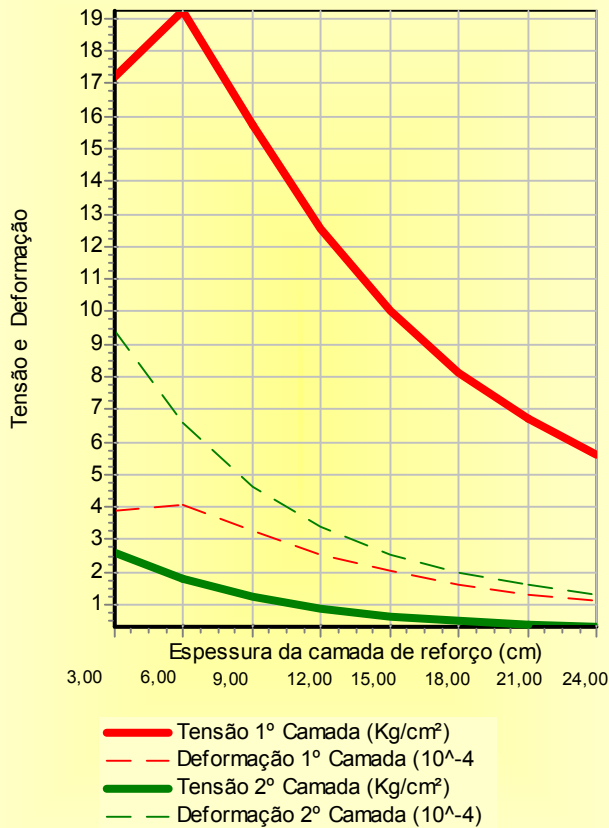
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	20,0	2074,116
3º	Sub-base	30,0	311,118
4º	Subleito	200,0	1037,058

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

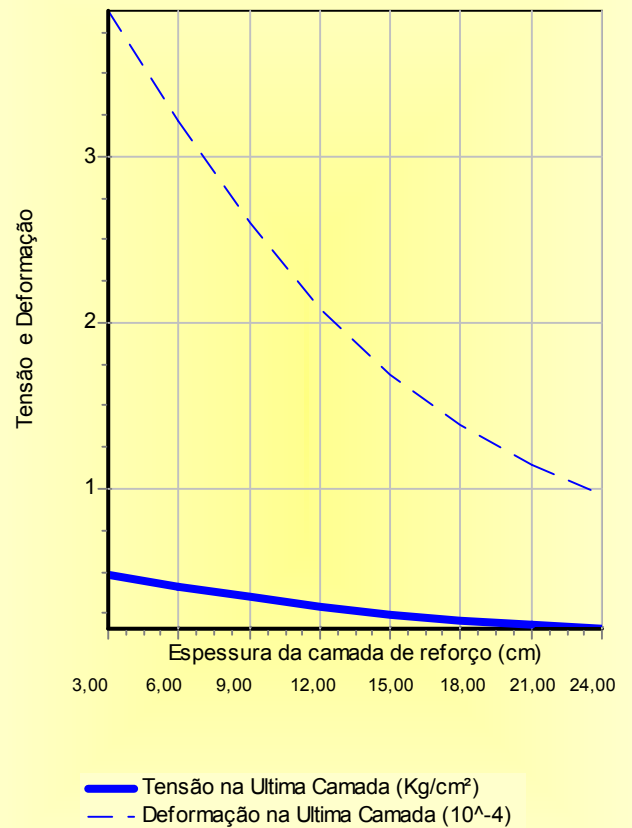
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-17,1882190	-0,0003880	-2,5848074	-0,0009420	0,4761189	0,0003887
5,999	-19,2325445	-0,0004055	-1,7751502	-0,0006612	0,4073727	0,0003225
8,999	-15,7257722	-0,0003259	-1,2299129	-0,0004649	0,3412332	0,0002601
11,999	-12,5366672	-0,0002560	-0,8812359	-0,0003383	0,2842808	0,0002085
14,999	-10,033230	-0,0002025	-0,6549958	-0,0002551	0,2379826	0,0001684
17,998	-8,1259536	-0,0001626	-0,5028124	-0,0001987	0,2010447	0,0001377
20,998	-6,6856814	-0,0001328	-0,3967540	-0,0001590	0,1715341	0,0001140
23,998	-5,5800345	-0,0001101	-0,3204431	-0,0001300	0,1477708	0,0000956

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



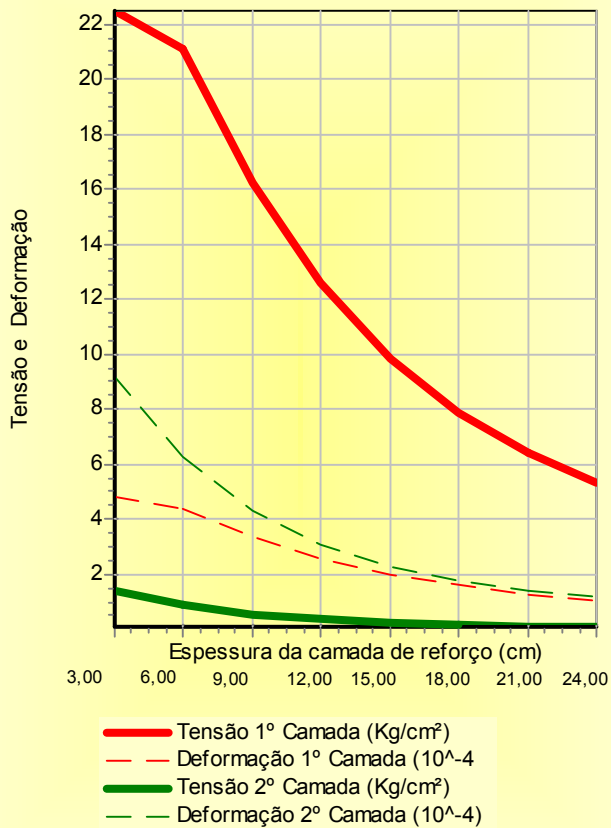
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	20,0	1639,142
3º	Sub-base	20,0	491,743
4º	Subleito	200,0	1639,142

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

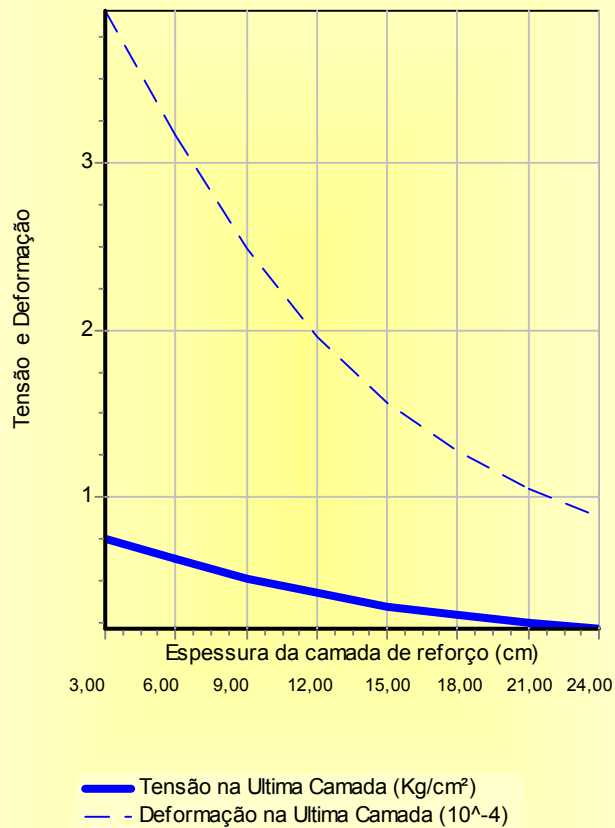
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-22,4990376	-0,0004806	-1,3992226	-0,0009159	0,7516255	0,0003914
5,999	-21,1261786	-0,0004402	-0,8707607	-0,0006247	0,6328572	0,0003171
8,999	-16,2724924	-0,0003368	-0,5497901	-0,0004302	0,5181597	0,0002492
11,999	-12,5759014	-0,0002578	-0,3622218	-0,0003090	0,4241119	0,0001965
14,999	-9,8756614	-0,0002008	-0,2493600	-0,0002311	0,3504600	0,0001570
17,998	-7,9014528	-0,0001596	-0,1781928	-0,0001790	0,2932833	0,0001277
20,998	-6,4443819	-0,0001295	-0,1314382	-0,0001426	0,2486666	0,0001056
23,998	-5,3430065	-0,0001068	-0,0995068	-0,0001163	0,2133582	0,0000886

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



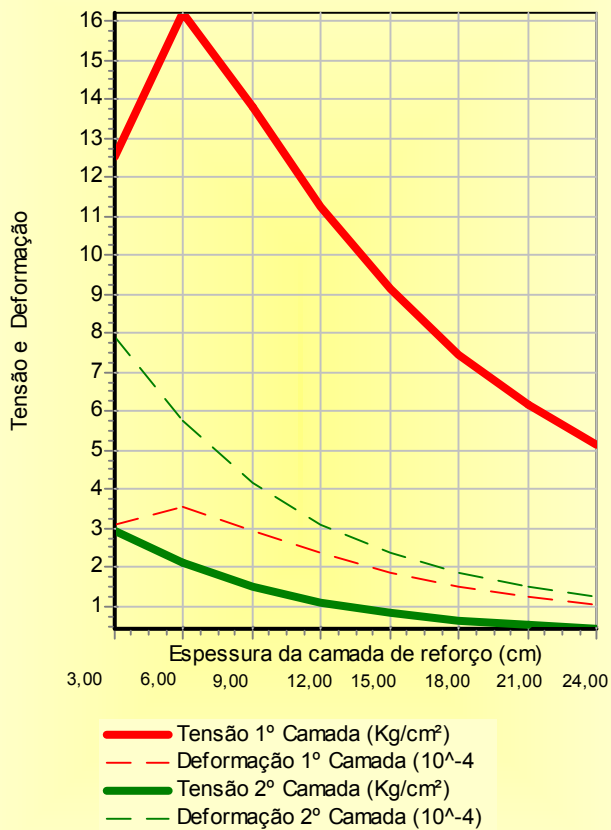
Características da estrutura			
Ordem das Camadas	Denominação	Espessuras (cm)	Resiliência (kgf/cm ²)
1º	Reforço Projetado	Variável	30000
2º	Base	21,0	2613,236
3º	Sub-base	35,0	261,323
4º	Subleito	200,0	1567,938

Verificação para carga relativa ao eixo padrão de 8,2 toneladas

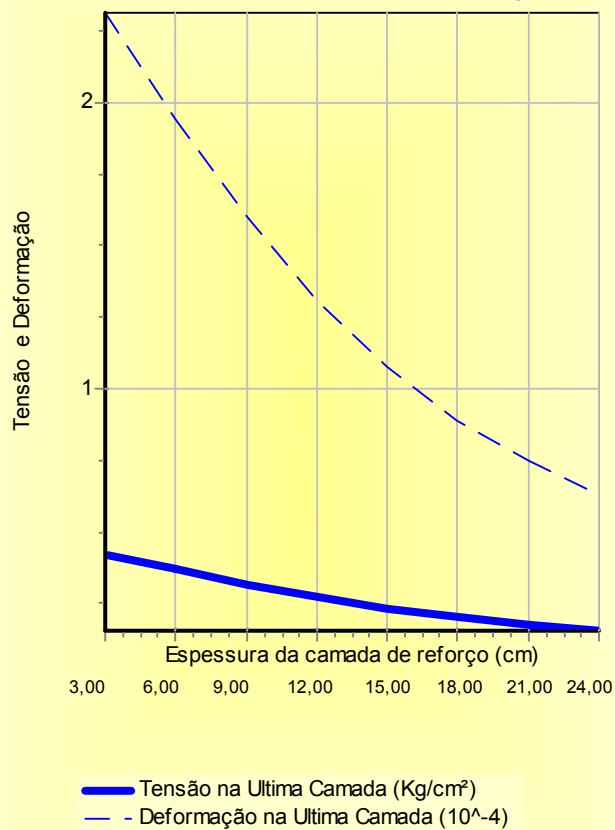
Verificação das condições de solicitação da estrutura

Reforço	Tensões e Deformações Horizontais				Tensões e Deformações Verticais	
	2ª Camada		3ª Camada		4ª Camada	
	H0	Tx1	Dx1	Tx2	Dx2	Tz3
3,000	-12,5063967	-0,0003067	-2,9476415	-0,0007913	0,4191576	0,0002312
5,999	-16,2145917	-0,0003518	-2,1065846	-0,0005745	0,3653225	0,0001939
8,999	-13,8218189	-0,0002926	-1,5044285	-0,0004147	0,3144204	0,0001597
11,999	-11,2534543	-0,0002341	-1,1002757	-0,0003072	0,2691411	0,0001306
14,999	-9,1177422	-0,0001872	-0,8291153	-0,0002346	0,2309241	0,0001073
17,998	-7,4410579	-0,0001514	-0,6422829	-0,0001843	0,1992461	0,0000889
20,998	-6,1530092	-0,0001242	-0,5098710	-0,0001484	0,1732050	0,0000745
23,998	-5,1527151	-0,0001033	-0,4134286	-0,0001220	0,1517773	0,0000631

Tensões e Deformações Horizontais de Tração



Tensões e Deformações Verticais de Compressão



ANEXO C

RELATÓRIOS DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE
CARGA CÁLCULADOS NESTA TESE.

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Shell

Eixo Simples Rodas Simples	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t	
	Carga (kgf)	1°	2°	3°	4°	5°	SHELL
1000	4,09E-05						0,0013
2000	5,59E-05						0,0078
3000	7,09E-05						0,0298
4000	9,01E-05						0,1165
5000	1,14E-04						0,4338
6000	1,43E-04						1,6237
7000	1,64E-04						3,4712

Eixo Simples Rodas Duplas	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t	
	Carga (kgf)	1°	2°	3°	4°	5°	SHELL
8200	1,32E-04						1,0000
2000	4,58E-05						0,0025
3000	5,54E-05						0,0074
4000	6,94E-05						0,0264
5000	8,30E-05						0,0728
6000	9,69E-05						0,1751
7000	1,12E-04						0,3989
8000	1,32E-04						1,0000
9000	1,39E-04						1,3836
10000	1,54E-04						2,4617
11000	1,68E-04						4,0007
12000	1,83E-04						6,4793
13000	1,97E-04						9,8864
14000	2,11E-04						14,3166
15000	2,23E-04						19,7994
16000	2,28E-04						22,7306
17000	2,30E-04						23,7938
18000	2,33E-04						25,2317
19000	2,38E-04						28,7397
20000	2,49E-04						37,3042
21000	2,58E-04						44,8333
22000	2,66E-04						53,3286

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Shell

Eixo Tandem Duplo Carga (kgf)	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t
	1°	2°	3°	4°	5°	SHELL
3000	4,83E-05	-3,25E-07	4,83E-05			0,0067
4000	5,35E-05	-3,84E-07	5,35E-05			0,0121
5000	5,84E-05	-4,85E-07	5,84E-05			0,0198
6000	6,22E-05	-5,81E-07	6,22E-05			0,0283
7000	6,48E-05	-6,70E-07	6,48E-05			0,0359
8000	6,70E-05	-7,66E-07	6,70E-05			0,0435
9000	7,14E-05	-8,62E-07	7,14E-05			0,0620
10000	7,69E-05	-9,55E-07	7,69E-05			0,0945
11000	8,49E-05	-1,04E-06	8,49E-05			0,1660
12000	9,21E-05	-1,15E-06	9,21E-05			0,2634
13000	1,00E-04	-1,25E-06	1,00E-04			0,4305
14000	1,08E-04	-1,33E-06	1,08E-04			0,6630
15000	1,17E-04	-1,43E-06	1,17E-04			1,0074
16000	1,25E-04	-1,53E-06	1,25E-04			1,4876
17000	1,33E-04	-1,64E-06	1,33E-04			2,1421
18000	1,40E-04	-1,72E-06	1,40E-04			2,8493
19000	1,47E-04	-1,80E-06	1,47E-04			3,7047
20000	1,54E-04	-1,92E-06	1,54E-04			4,8575
21000	1,61E-04	-2,00E-06	1,61E-04			6,1769
22000	1,69E-04	-2,10E-06	1,69E-04			8,2285
23000	1,76E-04	-2,19E-06	1,76E-04			10,2445
24000	1,83E-04	-2,31E-06	1,83E-04			12,9020
25000	1,90E-04	-2,39E-06	1,90E-04			15,8152
26000	1,97E-04	-2,48E-06	1,97E-04			19,3826
27000	2,05E-04	-2,58E-06	2,05E-04			24,5471
28000	2,12E-04	-2,67E-06	2,12E-04			29,4501
29000	2,18E-04	-2,75E-06	2,18E-04			35,1329
30000	2,26E-04	-2,89E-06	2,26E-04			42,5065
31000	2,28E-04	-2,96E-06	2,28E-04			45,1449
32000	2,30E-04	-3,06E-06	2,30E-04			46,8344
33000	2,31E-04	-3,16E-06	2,31E-04			48,4198
34000	2,32E-04	-3,21E-06	2,32E-04			49,0893
35000	2,33E-04	-3,31E-06	2,33E-04			50,6914
36000	2,34E-04	-3,42E-06	2,34E-04			52,1452
37000	2,35E-04	-3,47E-06	2,35E-04			52,8427
38000	2,40E-04	-3,58E-06	2,40E-04			59,4832
39000	2,45E-04	-3,69E-06	2,45E-04			67,8772
40000	2,51E-04	-3,80E-06	2,51E-04			77,2287

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Shell

Eixo TandemTriplo Carga (kgf)	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t
	1°	2°	3°	4°	5°	SHELL
4000	5,33E-05	-3,45E-07	5,34E-05	-3,45E-07	5,33E-05	0,0178
5000	5,46E-05	-3,58E-07	5,46E-05	-3,58E-07	5,46E-05	0,0203
6000	5,99E-05	-4,32E-07	6,00E-05	-4,32E-07	5,99E-05	0,0346
7000	6,47E-05	-5,11E-07	6,48E-05	-5,11E-07	6,47E-05	0,0536
8000	6,83E-05	-5,83E-07	6,84E-05	-5,83E-07	6,83E-05	0,0725
9000	7,10E-05	-6,42E-07	7,11E-05	-6,42E-07	7,10E-05	0,0905
10000	7,39E-05	-7,22E-07	7,41E-05	-7,22E-07	7,39E-05	0,1142
11000	7,61E-05	-7,88E-07	7,62E-05	-7,88E-07	7,61E-05	0,1340
12000	7,80E-05	-8,56E-07	7,82E-05	-8,56E-07	7,80E-05	0,1546
13000	7,98E-05	-9,28E-07	8,00E-05	-9,28E-07	7,98E-05	0,1755
14000	8,13E-05	-1,00E-06	8,16E-05	-1,00E-06	8,13E-05	0,1962
15000	8,24E-05	-1,06E-06	8,27E-05	-1,06E-06	8,24E-05	0,2115
16000	8,36E-05	-1,14E-06	8,39E-05	-1,14E-06	8,36E-05	0,2297
17000	8,45E-05	-1,20E-06	8,48E-05	-1,20E-06	8,45E-05	0,2437
18000	8,56E-05	-1,29E-06	8,59E-05	-1,29E-06	8,56E-05	0,2618
19000	8,63E-05	-1,35E-06	8,66E-05	-1,35E-06	8,63E-05	0,2745
20000	8,69E-05	-1,41E-06	8,73E-05	-1,41E-06	8,69E-05	0,2867
21000	9,04E-05	-1,47E-06	9,07E-05	-1,47E-06	9,04E-05	0,3576
22000	9,56E-05	-1,55E-06	9,59E-05	-1,55E-06	9,56E-05	0,4907
23000	1,02E-04	-1,61E-06	1,02E-04	-1,61E-06	1,02E-04	0,7086
24000	1,07E-04	-1,69E-06	1,08E-04	-1,69E-06	1,07E-04	0,9376
25000	1,14E-04	-1,77E-06	1,14E-04	-1,77E-06	1,14E-04	1,3146
26000	1,19E-04	-1,82E-06	1,19E-04	-1,82E-06	1,19E-04	1,6653
27000	1,25E-04	-1,90E-06	1,26E-04	-1,90E-06	1,25E-04	2,2537
28000	1,30E-04	-1,98E-06	1,31E-04	-1,98E-06	1,30E-04	2,8297
29000	1,35E-04	-2,05E-06	1,36E-04	-2,05E-06	1,35E-04	3,5214
30000	1,42E-04	-2,12E-06	1,42E-04	-2,12E-06	1,42E-04	4,5766
31000	1,47E-04	-2,20E-06	1,48E-04	-2,20E-06	1,47E-04	5,6463
32000	1,53E-04	-2,27E-06	1,54E-04	-2,27E-06	1,53E-04	7,1788
33000	1,58E-04	-2,34E-06	1,59E-04	-2,34E-06	1,58E-04	8,6377
34000	1,64E-04	-2,42E-06	1,64E-04	-2,42E-06	1,64E-04	10,3336
35000	1,70E-04	-2,48E-06	1,70E-04	-2,48E-06	1,70E-04	12,7838
36000	1,75E-04	-2,55E-06	1,76E-04	-2,55E-06	1,75E-04	15,1062
37000	1,81E-04	-2,60E-06	1,82E-04	-2,60E-06	1,81E-04	18,3949
38000	1,86E-04	-2,68E-06	1,87E-04	-2,68E-06	1,86E-04	21,5037
39000	1,91E-04	-2,75E-06	1,92E-04	-2,75E-06	1,91E-04	25,0343
40000	1,98E-04	-2,85E-06	1,99E-04	-2,85E-06	1,98E-04	30,6801

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Asphalt

Eixo Simples Rodas Simples	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t	
	Carga (kgf)	1°	2°	3°	4°	5°	ASPHALT
1000	1,12E-04						0,0212
2000	1,27E-04						0,0596
3000	1,48E-04						0,1301
4000	1,84E-04						0,2872
5000	2,34E-04						0,6159
6000	3,02E-04						1,3248
7000	3,43E-04						2,0590

Eixo Simples Rodas Duplas	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t	
	Carga (kgf)	1°	2°	3°	4°	5°	ASPHALT
1000	2,89E-04						1,0000
2000	1,25E-04						0,0310
3000	1,33E-04						0,0580
4000	1,60E-04						0,1213
5000	1,88E-04						0,2186
6000	2,16E-04						0,3639
7000	2,48E-04						0,5867
8000	2,89E-04						1,0000
9000	3,06E-04						1,2074
10000	3,36E-04						1,6867
11000	3,63E-04						2,2358
12000	3,95E-04						2,9576
13000	4,22E-04						3,7796
14000	4,51E-04						4,6855
15000	4,73E-04						5,6556
16000	4,73E-04						6,1273
17000	4,65E-04						6,2920
18000	4,56E-04						6,5100
19000	4,76E-04						7,0208
20000	5,02E-04						8,1682
21000	5,21E-04						9,0878

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Asphalt

Eixo Tandem Duplo	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t	
	Carga (kgf)	1°	2°	3°	4°	5°	ASPHALT
3000	1,53E-04	-8,04E-07	1,53E-04				0,0735
4000	1,61E-04	-9,78E-07	1,61E-04				0,1032
5000	1,62E-04	-1,24E-06	1,62E-04				0,1374
6000	1,61E-04	-1,50E-06	1,61E-04				0,1690
7000	1,58E-04	-1,76E-06	1,58E-04				0,1940
8000	1,54E-04	-2,05E-06	1,54E-04				0,2168
9000	1,59E-04	-2,33E-06	1,59E-04				0,2663
10000	1,69E-04	-2,58E-06	1,69E-04				0,3402
11000	1,88E-04	-2,82E-06	1,88E-04				0,4718
12000	2,02E-04	-3,10E-06	2,02E-04				0,6168
13000	2,20E-04	-3,39E-06	2,20E-04				0,8202
14000	2,40E-04	-3,60E-06	2,40E-04				1,0538
15000	2,58E-04	-3,87E-06	2,58E-04				1,3434
16000	2,76E-04	-4,15E-06	2,76E-04				1,6843
17000	2,95E-04	-4,42E-06	2,95E-04				2,0813
18000	3,10E-04	-4,65E-06	3,10E-04				2,4560
19000	3,25E-04	-4,87E-06	3,25E-04				2,8602
20000	3,38E-04	-5,19E-06	3,38E-04				3,3472
21000	3,52E-04	-5,42E-06	3,52E-04				3,8480
22000	3,71E-04	-5,70E-06	3,71E-04				4,5448
23000	3,85E-04	-5,92E-06	3,85E-04				5,1611
24000	3,98E-04	-6,27E-06	3,98E-04				5,9003
25000	4,13E-04	-6,50E-06	4,13E-04				6,6403
26000	4,28E-04	-6,74E-06	4,28E-04				7,4722
27000	4,46E-04	-7,03E-06	4,46E-04				8,5700
28000	4,60E-04	-7,25E-06	4,60E-04				9,5253
29000	4,75E-04	-7,48E-06	4,75E-04				10,5523
30000	4,87E-04	-7,86E-06	4,87E-04				11,7859
31000	4,88E-04	-8,07E-06	4,88E-04				12,2051
32000	4,84E-04	-8,39E-06	4,84E-04				12,4681
33000	4,79E-04	-8,71E-06	4,79E-04				12,7113
34000	4,76E-04	-8,88E-06	4,76E-04				12,8130
35000	4,71E-04	-9,21E-06	4,71E-04				13,0540
36000	4,68E-04	-9,56E-06	4,68E-04				13,2700
37000	4,75E-04	-9,73E-06	4,75E-04				13,3727
38000	4,89E-04	-1,01E-05	4,89E-04				14,3237
39000	5,02E-04	-1,04E-05	5,02E-04				15,4641
40000	5,16E-04	-1,08E-05	5,16E-04				16,6669

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Asphalt

Eixo TandemTriplo Carga (kgf)	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t
	1°	2°	3°	4°	5°	ASPHALT
4000	1,85E-04	-3,34E-07	1,86E-04	-3,34E-07	1,85E-04	0,1530
5000	1,88E-04	-3,58E-07	1,89E-04	-3,58E-07	1,88E-04	0,1653
6000	1,94E-04	-4,30E-07	1,95E-04	-4,30E-07	1,94E-04	0,2253
7000	1,97E-04	-5,22E-07	1,99E-04	-5,22E-07	1,97E-04	0,2901
8000	1,99E-04	-6,04E-07	2,00E-04	-6,04E-07	1,99E-04	0,3460
9000	1,99E-04	-6,75E-07	2,01E-04	-6,75E-07	1,99E-04	0,3934
10000	1,98E-04	-7,63E-07	2,00E-04	-7,63E-07	1,98E-04	0,4501
11000	1,97E-04	-8,41E-07	1,99E-04	-8,41E-07	1,97E-04	0,4940
12000	1,95E-04	-9,32E-07	1,97E-04	-9,32E-07	1,95E-04	0,5367
13000	1,93E-04	-1,04E-06	1,95E-04	-1,04E-06	1,93E-04	0,5776
14000	1,90E-04	-1,13E-06	1,93E-04	-1,13E-06	1,90E-04	0,6163
15000	1,88E-04	-1,21E-06	1,91E-04	-1,21E-06	1,88E-04	0,6437
16000	1,85E-04	-1,32E-06	1,88E-04	-1,32E-06	1,85E-04	0,6754
17000	1,82E-04	-1,40E-06	1,86E-04	-1,40E-06	1,82E-04	0,6990
18000	1,79E-04	-1,52E-06	1,83E-04	-1,52E-06	1,79E-04	0,7286
19000	1,76E-04	-1,64E-06	1,80E-04	-1,64E-06	1,76E-04	0,7489
20000	1,74E-04	-1,73E-06	1,78E-04	-1,73E-06	1,74E-04	0,7680
21000	1,81E-04	-1,80E-06	1,85E-04	-1,80E-06	1,81E-04	0,8731
22000	1,92E-04	-1,90E-06	1,96E-04	-1,90E-06	1,92E-04	1,0490
23000	2,06E-04	-1,96E-06	2,11E-04	-1,96E-06	2,06E-04	1,2984
24000	2,17E-04	-2,05E-06	2,22E-04	-2,05E-06	2,17E-04	1,5275
25000	2,32E-04	-2,16E-06	2,37E-04	-2,16E-06	2,32E-04	1,8585
26000	2,44E-04	-2,19E-06	2,49E-04	-2,19E-06	2,44E-04	2,1319
27000	2,59E-04	-2,28E-06	2,65E-04	-2,28E-06	2,59E-04	2,5411
28000	2,70E-04	-2,36E-06	2,76E-04	-2,36E-06	2,70E-04	2,8999
29000	2,81E-04	-2,45E-06	2,86E-04	-2,45E-06	2,81E-04	3,2923
30000	2,96E-04	-2,52E-06	3,02E-04	-2,52E-06	2,96E-04	3,8332
31000	3,07E-04	-2,62E-06	3,14E-04	-2,62E-06	3,07E-04	4,3301
32000	3,23E-04	-2,68E-06	3,30E-04	-2,68E-06	3,23E-04	4,9776
33000	3,34E-04	-2,77E-06	3,41E-04	-2,77E-06	3,34E-04	5,5417
34000	3,45E-04	-2,86E-06	3,52E-04	-2,86E-06	3,45E-04	6,1493
35000	3,61E-04	-2,92E-06	3,68E-04	-2,92E-06	3,61E-04	6,9575
36000	3,71E-04	-3,01E-06	3,79E-04	-3,01E-06	3,71E-04	7,6652
37000	3,88E-04	-3,05E-06	3,95E-04	-3,05E-06	3,88E-04	8,5934
38000	3,99E-04	-3,14E-06	4,06E-04	-3,14E-06	3,99E-04	9,4085
39000	4,09E-04	-3,22E-06	4,17E-04	-3,22E-06	4,09E-04	10,2762
40000	4,24E-04	-3,34E-06	4,33E-04	-3,34E-06	4,24E-04	11,5634

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Camada Cimentada

Eixo Simples Rodas Simples	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t	
	Carga (kgf)	1°	2°	3°	4°	5°	CAMADA CIMENTADA
1000	1,12E-04						0,0166
2000	1,27E-04						0,0498
3000	1,48E-04						0,1143
4000	1,84E-04						0,2653
5000	2,34E-04						0,5972
6000	3,02E-04						1,3487
7000	3,43E-04						2,1556

Eixo Simples Rodas Duplas	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t	
	Carga (kgf)	1°	2°	3°	4°	5°	CAMADA CIMENTADA
8200	2,89E-04						1,0000
2000	1,25E-04						0,0248
3000	1,33E-04						0,0484
4000	1,60E-04						0,1061
5000	1,88E-04						0,1985
6000	2,16E-04						0,3412
7000	2,48E-04						0,5671
8000	2,89E-04						1,0000
9000	3,06E-04						1,2219
10000	3,36E-04						1,7436
11000	3,63E-04						2,3530
12000	3,95E-04						3,1685
13000	4,22E-04						4,1126
14000	4,51E-04						5,1684
15000	4,73E-04						6,3134
16000	4,73E-04						6,8749
17000	4,65E-04						7,0716
18000	4,56E-04						7,3324
19000	4,76E-04						7,9458
20000	5,02E-04						9,3336
21000	5,21E-04						10,4551
22000	5,39E-04						11,6369

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Camada Cimentada

Eixo Tandem Duplo	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t	
	Carga (kgf)	1°	2°	3°	4°	5°	CAMADA CIMENTADA
3000	1,53E-04	-8,04E-07	1,53E-04				0,0595
4000	1,61E-04	-9,78E-07	1,61E-04				0,0855
5000	1,62E-04	-1,24E-06	1,62E-04				0,1159
6000	1,61E-04	-1,50E-06	1,61E-04				0,1445
7000	1,58E-04	-1,76E-06	1,58E-04				0,1673
8000	1,54E-04	-2,05E-06	1,54E-04				0,1883
9000	1,59E-04	-2,33E-06	1,59E-04				0,2343
10000	1,69E-04	-2,58E-06	1,69E-04				0,3040
11000	1,88E-04	-2,82E-06	1,88E-04				0,4304
12000	2,02E-04	-3,10E-06	2,02E-04				0,5724
13000	2,20E-04	-3,39E-06	2,20E-04				0,7750
14000	2,40E-04	-3,60E-06	2,40E-04				1,0117
15000	2,58E-04	-3,87E-06	2,58E-04				1,3099
16000	2,76E-04	-4,15E-06	2,76E-04				1,6661
17000	2,95E-04	-4,42E-06	2,95E-04				2,0866
18000	3,10E-04	-4,65E-06	3,10E-04				2,4883
19000	3,25E-04	-4,87E-06	3,25E-04				2,9259
20000	3,38E-04	-5,19E-06	3,38E-04				3,4584
21000	3,52E-04	-5,42E-06	3,52E-04				4,0113
22000	3,71E-04	-5,70E-06	3,71E-04				4,7880
23000	3,85E-04	-5,92E-06	3,85E-04				5,4814
24000	3,98E-04	-6,27E-06	3,98E-04				6,3199
25000	4,13E-04	-6,50E-06	4,13E-04				7,1661
26000	4,28E-04	-6,74E-06	4,28E-04				8,1246
27000	4,46E-04	-7,03E-06	4,46E-04				9,3997
28000	4,60E-04	-7,25E-06	4,60E-04				10,5178
29000	4,75E-04	-7,48E-06	4,75E-04				11,7278
30000	4,87E-04	-7,86E-06	4,87E-04				13,1912
31000	4,88E-04	-8,07E-06	4,88E-04				13,6907
32000	4,84E-04	-8,39E-06	4,84E-04				14,0047
33000	4,79E-04	-8,71E-06	4,79E-04				14,2954
34000	4,76E-04	-8,88E-06	4,76E-04				14,4171
35000	4,71E-04	-9,21E-06	4,71E-04				14,7057
36000	4,68E-04	-9,56E-06	4,68E-04				14,9645
37000	4,75E-04	-9,73E-06	4,75E-04				15,0878
38000	4,89E-04	-1,01E-05	4,89E-04				16,2313
39000	5,02E-04	-1,04E-05	5,02E-04				17,6091
40000	5,16E-04	-1,08E-05	5,16E-04				19,0692

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA CALCULADOS NESTA TESE
Modelo de Fadiga Camada Cimentada

Eixo TandemTriplo Carga (kgf)	Deformações nos pontos analisados em Linha					Equivalencia ao Eixo Simples de 8,2 t
	1°	2°	3°	4°	5°	CAMADA CIMENTADA
4000	1,85E-04	-3,34E-07	1,86E-04	-3,34E-07	1,85E-04	0,1266
5000	1,88E-04	-3,58E-07	1,89E-04	-3,58E-07	1,88E-04	0,1375
6000	1,94E-04	-4,30E-07	1,95E-04	-4,30E-07	1,94E-04	0,1911
7000	1,97E-04	-5,22E-07	1,99E-04	-5,22E-07	1,97E-04	0,2501
8000	1,99E-04	-6,04E-07	2,00E-04	-6,04E-07	1,99E-04	0,3016
9000	1,99E-04	-6,75E-07	2,01E-04	-6,75E-07	1,99E-04	0,3458
10000	1,98E-04	-7,63E-07	2,00E-04	-7,63E-07	1,98E-04	0,3990
11000	1,97E-04	-8,41E-07	1,99E-04	-8,41E-07	1,97E-04	0,4406
12000	1,95E-04	-9,32E-07	1,97E-04	-9,32E-07	1,95E-04	0,4812
13000	1,93E-04	-1,04E-06	1,95E-04	-1,04E-06	1,93E-04	0,5202
14000	1,90E-04	-1,13E-06	1,93E-04	-1,13E-06	1,90E-04	0,5573
15000	1,88E-04	-1,21E-06	1,91E-04	-1,21E-06	1,88E-04	0,5838
16000	1,85E-04	-1,32E-06	1,88E-04	-1,32E-06	1,85E-04	0,6144
17000	1,82E-04	-1,40E-06	1,86E-04	-1,40E-06	1,82E-04	0,6372
18000	1,79E-04	-1,52E-06	1,83E-04	-1,52E-06	1,79E-04	0,6660
19000	1,76E-04	-1,64E-06	1,80E-04	-1,64E-06	1,76E-04	0,6857
20000	1,74E-04	-1,73E-06	1,78E-04	-1,73E-06	1,74E-04	0,7043
21000	1,81E-04	-1,80E-06	1,85E-04	-1,80E-06	1,81E-04	0,8073
22000	1,92E-04	-1,90E-06	1,96E-04	-1,90E-06	1,92E-04	0,9813
23000	2,06E-04	-1,96E-06	2,11E-04	-1,96E-06	2,06E-04	1,2312
24000	2,17E-04	-2,05E-06	2,22E-04	-2,05E-06	2,17E-04	1,4634
25000	2,32E-04	-2,16E-06	2,37E-04	-2,16E-06	2,32E-04	1,8028
26000	2,44E-04	-2,19E-06	2,49E-04	-2,19E-06	2,44E-04	2,0861
27000	2,59E-04	-2,28E-06	2,65E-04	-2,28E-06	2,59E-04	2,5145
28000	2,70E-04	-2,36E-06	2,76E-04	-2,36E-06	2,70E-04	2,8937
29000	2,81E-04	-2,45E-06	2,86E-04	-2,45E-06	2,81E-04	3,3118
30000	2,96E-04	-2,52E-06	3,02E-04	-2,52E-06	2,96E-04	3,8933
31000	3,07E-04	-2,62E-06	3,14E-04	-2,62E-06	3,07E-04	4,4322
32000	3,23E-04	-2,68E-06	3,30E-04	-2,68E-06	3,23E-04	5,1402
33000	3,34E-04	-2,77E-06	3,41E-04	-2,77E-06	3,34E-04	5,7620
34000	3,45E-04	-2,86E-06	3,52E-04	-2,86E-06	3,45E-04	6,4360
35000	3,61E-04	-2,92E-06	3,68E-04	-2,92E-06	3,61E-04	7,3393
36000	3,71E-04	-3,01E-06	3,79E-04	-3,01E-06	3,71E-04	8,1357
37000	3,88E-04	-3,05E-06	3,95E-04	-3,05E-06	3,88E-04	9,1873
38000	3,99E-04	-3,14E-06	4,06E-04	-3,14E-06	3,99E-04	10,1168
39000	4,09E-04	-3,22E-06	4,17E-04	-3,22E-06	4,09E-04	11,1120
40000	4,24E-04	-3,34E-06	4,33E-04	-3,34E-06	4,24E-04	12,5980