



30ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO

24 a 29 de Novembro de 1996

Centro de Convenções

Salvador - Bahia - Brasil

ANAIS - VOLUME 2

PATROCÍNIO:



REALIZAÇÃO:



Associação Brasileira
de Pavimentação

- 1.15 - Avaliação da repetibilidade dos resultados de alguns ensaios de laboratório - Uma apresentação da ISO 5725.
Rodrigher, S.F., Peixoto, A.S.P. & Fabbri, G.T.P.

285

S.T. 1 / Módulo 3

- 1.16 - Estabilização de solos vermelhos tropicais com cais pozolânicas.
Amorim, L.V., Neves, G.A. & Ferreira, H.C. 300
- 1.17 - Estabilização e reforço de solos e camadas granulares com geogrelhas estruturais.
Andrade, M. H. F. 328
- 1.18 - Estabilização de solos arenosos com bentonita.
Carvalho, J.B.Q. & Anchieta, J. 350
- 1.19 - Plástico reforçado com fibras de vidro: Aplicação em pavimentação.
Castro, P. F. 359
- 1.20 - Análise paramétrica de estruturas de pavimento com camadas de solo estabilizado com cal e cinza volante.
Fogaça, B.C. & Ceratti, J.A.P. 389
- 1.21 - Notícia sobre o ácido fosfórico na estabilização de solos lateríticos.
Medina, J. & Guida, H.N. 413
- 1.22 - Cura acelerada de misturas solo-cal: Estudo de caso com dois solos de Viçosa-MG.
Mendonça, A.A., Santos, M.F., Lima, D.C., Bueno, B.S. & Fontes, M.P.F. 424
- 1.23 - Estudo da influência da adição de cinza da casca de arroz na perda de resistência com a demora na compactação em um solo estabilizado com cimento Portland.
Prieto, P.D.M., Xavier, A.C.O., Núñez, W.P. & Silveira, A.A. 433

VOLUME 2

S.T. 1 / Módulo 4

- 1.24 - Utilização do ensaio de adsorção de azul de metileno para previsão de algumas propriedades tecnológicas dos solos - Uma primeira aproximação.
Barroso, S.H.A. & Fabbri, G.T.P. 472
- 1.25 - Algumas considerações sobre a classificação MCT e seus índices.
Barroso, S.H.A. & Fabbri, G.T.P. 494
- 1.26 - Análise de temperatura de 105°C no ensaio de teor de umidade higroscópica utilizando o método da estufa.
Bezerra, U.T. 506
- 1.27 - Proposta de uma nova metodologia para ensaios de sedimentação.
Carvalho, J.C., Guimarães, R.C., Cardoso, F.B.F. & Pereira, J.H.F. 520
- 1.28 - Informatização dos ensaios de caracterização de solos visando melhoria de qualidade.
Campos, L.E.P., Fonseca, E.C., Baptista, H.M. & Valverde, M. 532
- 1.29 - Influência da sucção no módulo de resiliência de um solo típico do Rio Grande do Sul.
Ceratti, J.A.P., Gehling, W.Y.Y., Bica, A.V.D. & Rodrigues, M.R. 540

10 - Diretrizes para a identificação expedita de solos lateríticos para uso em obras viárias. <i>Godoy, H., Bernucci, L. B. & Nogami, J.S.</i>	556
11 - A técnica do SPTT para obtenção de parâmetros geotécnicos. <i>Presa, E. P.</i>	569

2ª SESSÃO TÉCNICA MECÂNICA DOS PAVIMENTOS

2 / Módulo 1

11 - Análise de sensibilidade dos métodos de dimensionamento de reforços de pavimentos asfálticos considerando a fresagem. <i>Bomfim, V., Pitta, D. M. & Suzuki, C. Y.</i>	592
12 - Estimativa das tensões e deformações nas camadas de um pavimento para estudo das deformações permanentes em laboratório. <i>Carvalho, C.A.B., Sória, M.H.A., Parreira, A.B. & Fernandes Junior, J.L.</i>	608
13 - Correlação entre deflexões características em pavimentos flexíveis medidos com a viga Benkelman e com o FWD - Falling Weight Deflectometer. <i>Duarte, J.C., Silva, P.D.E.A. & Fabrício, J.M.</i>	637
14 - Análise numérica do método de trincheira induzida de condutos enterrados em aterros rodoviários. <i>Machado, S.L., Bueno, B.S. & Vilar, O.M.</i>	647
15 - Comportamento das misturas asfálticas à deflexão: Módulo, um dilema não resolvido. <i>Momm, L. & Domingues, F. A. A.</i>	674
16 - A influência da sucção no módulo resiliente de um solo de comportamento laterítico - Resultados de laboratório e de campo com emprego do simulador de tráfego UFRGS - DAER/RS. <i>Núñez, W.P., Rodrigues, M.R., Ceratti, J., Gehling, W. Y. Y. & Oliveira, J.A.</i>	700
17 - Análise de módulos de elasticidade estimados a partir de dados coletados com o pressômetro pencil. <i>Rodrigues, J.K.G., Felex, J.B., Lucena, F.B. & Pontes Filho, G.</i>	721

2 / Módulo 2

18 - Avaliação estrutural simplificada de pavimentos através de retroanálise. <i>Albernaz, C.A.V., Caldas, J.E.F. & Oliveira, S.E.</i>	747
19 - Reanálise de coeficientes estruturais de misturas asfálticas recicladas com base nas equações da AASHTO-86. <i>Balbo, J.T.</i>	775
20 - Utilização de modelos elásticos lineares e não-lineares na retroanálise de propriedades de pavimentos. <i>Farias, M.M. & Monteiro, S.A.</i>	791
1 - Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos. <i>Fernandes Júnior, J.L. & Sória, M.H.A.</i>	810
2 - Emprego da deflectometria no controle da qualidade de serviços de pavimentação. <i>Koehler, L.F.S., Silva, L.M.M. & Fernandes, W.F.</i>	840

30ª Reunião Anual de Pavimentação
Salvador / Bahia
24 a 29 de novembro de 1996

**Estimativa das Tensões e Deformações nas Camadas de um Pavimento para
Estudo das Deformações Permanentes em Laboratório**

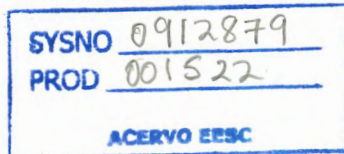
Carlos Alexandre Braz de Carvalho
Manoel Henrique Alba Sória
Alexandre Benetti Parreira
José Leomar Fernandes Junior

Estimativa das Tensões e Deformações nas Camadas de um Pavimento para Estudo das Deformações Permanentes em Laboratório

Carlos Alexandre Braz de Carvalho¹/Universidade Federal de Viçosa
Manoel Henrique Alba Sória²/Escola de Engenharia de São Carlos - USP
Alexandre Benetti Parreira³/Escola de Engenharia de São Carlos - USP
José Leomar Fernandes Junior⁴/Escola de Engenharia de São Carlos - USP

RESUMO

Apresenta-se, neste trabalho, um estudo comparativo para a estimativa das tensões e deformações nas camadas de um pavimento do tipo baixo custo do Estado de São Paulo, com o objetivo de investigar as características de deformabilidade permanente dos solos que o compõem, quando submetidos a carregamentos repetidos. Com base nas informações referentes ao tráfego de projeto do pavimento em estudo e às propriedades físicas e mecânicas de seus materiais constituintes, são apresentados os seguintes passos para a realização deste trabalho: definição dos elementos de entrada associados ao tráfego e aos materiais do pavimento para a utilização dos programas ELSYM5 e ILLI-PAVE; comparação das tensões, deslocamentos e deformações fornecidas pelos programas acima citados e as tensões a serem consideradas para o estudo da deformabilidade dos materiais em laboratório, utilizando-se o ensaio triaxial com tensão confinante constante e com tensão desvio axial cíclica.



¹ Professor Assistente. Departamento de Engenharia Civil - U.F.V. - Viçosa - MG. Doutorando em Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 - São Carlos, SP. Fax: 2749255

² Doutor em Transportes. Professor do Departamento de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos - USP

³ Doutor em Engenharia Civil: Geotecnia. Professor do Departamento de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

⁴ Doutor em Transportes. Professor do Departamento de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

1 Considerações Iniciais

Este trabalho faz parte de uma etapa de um projeto de pesquisa que vem sendo desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos - USP, para estudar as deformações permanentes de alguns tipos de solo de comportamento laterítico, utilizando-se o ensaio triaxial com tensão confinante constante e com tensão desvio axial cíclica.

A tarefa de se estimar as tensões e deformações nas camadas de um pavimento é relativamente simples, considerando-se os inúmeros programas de computador (ILLI-PAVE, FEPAVE, MICHPAVE, EPAVE, ELSYM5, entre outros) já desenvolvidos para este fim. Mas quando se trata da definição dos elementos de entrada para a utilização desses programas, muitas dúvidas surgem. Algumas delas oriundas da escolha do carregamento para representar as cargas dos diferentes tipos de veículos que solicitam o pavimento. Outras, decorrentes da definição dos parâmetros de deformabilidade e de resistência dos materiais empregados no pavimento. Diante dessas considerações, pretende-se neste trabalho, apresentar o procedimento que foi utilizado para a definição dos elementos de entrada, necessários à utilização dos programas ILLI-PAVE e ELSYM5, visando a estimativa das tensões nas camadas de um pavimento do tipo baixo custo no Estado de São Paulo.

NOGAMI e VILLIBOR (1995) consideraram pavimentos do tipo baixo custo aqueles caracterizados por possuírem:

- bases constituídas de materiais cujos custos de execução são substancialmente menores por m³ acabado, em relação às bases convencionais que vinham sendo usadas extensiva e rotineiramente pelo DER-SP, na década de 70, constituídas quase sempre de pedra britada ou de solo-cimento. Nesta época, o custo de uma base de solo arenoso fino laterítico (SAFL), considerado do tipo baixo custo, representava respectivamente cerca de 15% a 25% do custo das bases convencionais;
- revestimentos betuminosos de tipo tratamento superficial, com espessura de, no máximo, cerca de 3 cm e, frequentemente, da ordem de cerca de 1 cm;
- trânsito de tipo leve a, no máximo, médio, com VDM da ordem de 500 veículos, com cerca de 30% a 40% de caminhões e ônibus.

A Figura 1 ilustra a estrutura do pavimento que será considerada neste estudo, juntamente com o semi-eixo padrão simples de rodas duplas, disposto na sua superfície. O valor previsto de solicitações do eixo padrão simples de rodas duplas para a representação do tráfego misto da rodovia em estudo é igual a 10^5 . Este eixo padrão está ilustrado na Figura 2. A pressão de contato do pneu com o pavimento será considerada igual à pressão de enchimento dos pneus (80 psi), distribuída uniformemente numa área de geometria circular.

As Tabelas 1 e 2 contêm os resultados dos ensaios de caracterização para a identificação dos solos utilizados nas camadas do pavimento em estudo, pelas classificações: HRB ("Highway Research Board"), USCS ("Unified Soil Classification System") e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical); esta última conforme proposta por Nogami e Villibor (1980 e 1981). A Tabela 3 contém os resultados dos ensaios de compactação e CBR, nas energias normal e intermediária. A Tabela 4 contém os parâmetros de resistência dos solos 1 e 2 utilizados no pavimento em estudo, quais sejam: intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (ϕ), nas duas energias de compactação supra citadas.

2 Dados de Entrada para Utilização dos Programas ELSYM5 e ILLI-PAVE

ELSYM5 (Federal Highway Administration, 1985)

O programa de computador ELSYM5 ("Elastic Layered System Computer Program") foi desenvolvido por Stuart Kopperman, George Tiller e Mington Tseng na Universidade da Califórnia, em Berkeley, para a estimativa das tensões, deformações e deslocamentos, em três dimensões, na estrutura de um pavimento. Para o seu desenvolvimento as seguintes considerações foram feitas: cada camada é composta de um material isotrópico, homogêneo, de peso desprezível e de comportamento elástico-linear. A superfície do pavimento pode ser carregada com uma ou mais cargas, as quais são consideradas idênticas, atuando vertical e uniformemente sobre uma área circular. Os dados de entrada requeridos pelo ELSYM5 estão divididos em três categorias:

a. Dados da camada

Cada pavimento analisado pode possuir uma ou até cinco camadas elásticas e as três propriedades requeridas para cada camada são:

- espessura em polegadas,

- coeficiente de Poisson,
- módulo de elasticidade.

b. Dados da carga

As cargas são definidas escolhendo-se dois dos três seguintes itens: força em libra (lb), pressão uniformemente distribuída na superfície do pavimento em lb/pol² ou o raio da área de contato entre o pneu e o pavimento, em polegadas. O terceiro item é determinado automaticamente pelo programa. A localização da carga é definida por um sistema de coordenadas X e Y, ao longo da superfície do pavimento. Os valores de X e Y podem ser positivos ou negativos. Podem-se utilizar até dez cargas para estudo das tensões, deformações e deslocamentos nas camadas que compõem a estrutura da estrada.

c. Dados de coordenadas para avaliação das tensões, deformações e deslocamentos

Essas informações são fornecidas ao programa através de um sistema de coordenadas X, Y e Z que permitem analisar tri-dimensionalmente as tensões, deformações e deslocamentos, num dado ponto da estrutura do pavimento. Todas as combinações de X, Y e Z são avaliadas pelo programa. O máximo de posições X e Y permitido é 10 e o máximo de profundidades Z que se pode utilizar é também 10. Portanto, 100 (10X10) posições são possíveis de serem efetuadas, tendo em vista as finalidades acima citadas.

ILLI-PAVE

De acordo com GOMEZ-ACHECAR e THOMPSON (1986), no programa ILLI-PAVE o pavimento é considerado um sólido de revolução axissimétrico. Este programa incorpora modelos para o cálculo do módulo resiliente a partir do estado de tensão e ainda um critério de ruptura. As tensões são redistribuídas ao fim de cada iteração de modo que elas não excedam a resistência dos materiais definida segundo a teoria de ruptura de Mohr-Coulomb.

Uma característica importante do programa ILLI-PAVE refere-se aos recursos de que dispõe, que possibilitam que os materiais que compõem o pavimento tenham comportamento, tanto elástico linear quanto elástico não linear.

Segundo FERNANDES JR.(1994), o programa ILLI-PAVE foi desenvolvido inicialmente por WILSON⁵ e depois modificado por DUNCAN, MONISMITH e WILSON (1968) e por pesquisadores do Grupo de Transportes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign. Uma cópia deste programa foi cedida pelo Prof. Marshall R. Thompson da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign ao Centro de Informática da Universidade de São Paulo em São Carlos (CISC).

A malha de elementos finitos utilizada pelo programa ILLI-PAVE é delimitada por um afastamento horizontal correspondente a 12 vezes o raio do carregamento e, também, por uma profundidade vertical igual 50 vezes este raio. A Figura 3 esquematiza uma malha hipotética de elementos finitos axissimétrica contendo estas considerações e ainda a representação de uma carga de roda simples distribuída uniformemente sobre uma área circular, através de uma pressão de contato p .

Os dados de tráfego necessários para utilização do programa ILLI-PAVE são:

- carga de uma roda simples expressa em função da pressão de contato p , em psi,
- raio, em polegadas, da superfície de contato considerada como sendo de geometria circular.

Os dados de entrada para utilização do programa, relativos às camadas do pavimento e aos seus materiais constituintes, são:

- espessura da camada (polegadas),
- coeficiente de Poisson,
- densidade da camada (lb/ft^3),
- intercepto coesivo (psi) e ângulo de atrito interno do solo em graus,
- coeficiente de empuxo em repouso (K_0),
- módulo de elasticidade (psi)
- estrutura padrão ("standard structure"): 1: raio compreendido entre 2 e 6 polegadas; 2: raio compreendido entre 4 e 8 polegadas; 3: raio compreendido entre 6 e 12 polegadas; 4: raio compreendido entre 10 e 18 polegadas.

⁵WILSON, E. L. *A Digital Computer Program for the Finite Element Analysis of Solids With Non-Linear Material Properties*. Department of Engineering - University of California at Berkeley - Berkeley, CA - 1965

O fornecimento do módulo de elasticidade dos materiais ao programa é feito através da variável $PROPi$, em que i representa a camada do pavimento em estudo, conforme segue:

materiais granulares: o módulo resiliente é calculado em função da tensão confinante σ_3 ou em função do primeiro invariante de tensão θ ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), juntamente com os coeficientes $KONEi$ e Xi . Esses coeficientes podem ser obtidos experimentalmente através de ensaios triaxiais cíclicos. Ao programa são fornecidos somente os coeficientes acima citados e o valor de $PROPi$. Se $PROPi$ for igual a 1, o módulo resiliente será estimado em função da tensão confinante σ_3 e dos coeficientes $KONEi$ e Xi . Se $PROPi$ for igual a 5, o módulo resiliente será estimado em função de θ e dos coeficientes $KONEi$ e Xi .

- **Materiais de granulometria fina:** o módulo resiliente é calculado em função da tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) e dos coeficientes $KONEi$, $KTWOi$, $KTHREEi$ e $KFOURI$. Esses coeficientes podem também ser obtidos experimentalmente, através de ensaios triaxiais cíclicos. Ao programa são fornecidos somente os valores dos coeficientes acima citados e o valor da variável $PROPi$. Neste caso, $PROPi$ é igual a 2.

- **misturas betuminosas e camadas cimentadas:** o módulo de resiliência é considerado constante e o valor de $PROPi$, para este caso, é igual a 3.

Além desses dados, são necessários ainda outros informes para a utilização do programa, quais sejam:

- **para materiais granulares:**

$MAXSR_i$: relação $\sigma_{1i}/\sigma_{3i} < \sigma_{1i}/\sigma_{3i}$ máxima prevista, conforme ilustra o item 3.2;

$MINSIG_i$: tensão de compressão horizontal mínima prevista. Valor recomendado: 0,01 psi;

$EFAIL_i$: módulo de deformação previsto para o material, após a ruptura.

- **Para materiais de granulometria fina:**

TAUSUB_i: resistência ao cisalhamento máxima do material;

DSLL_i: limite fixado para a tensão desvio abaixo do qual o módulo resiliente é assumido constante;

DSUL_i: limite fixado para a tensão desvio acima do qual o módulo resiliente é assumido constante (DSUL_i < TAUSUB_i);

EFAIL_i: idem para material granular;

i: índice representativo da camada do pavimento em estudo.

3 Estimativa das Tensões nas Camadas do Pavimento

As etapas que serão utilizadas para a estimativa das tensões nas camadas do pavimento são as seguintes:

- definição dos elementos de entrada associados ao tráfego para a utilização dos dois programas ELSYM5 e ILLI-PAVE;
- definição dos elementos de entrada associados aos materiais do pavimento para a utilização dos programas acima citados;
- comparação das tensões, deslocamentos e deformações fornecidas pelos programas anteriormente citados;
- tensões a serem consideradas para o estudo da deformabilidade dos materiais no laboratório.

3.1 Definição dos Elementos de Entrada Associados ao Tráfego para a Utilização dos Programas ILLI-PAVE e ELSYM5

- **Carga do tráfego e pressão de contato**

No programa ILLI-PAVE não se pode utilizar mais de uma superfície de carregamento para estudo das tensões e deformações no pavimento. Portanto, as cargas que atuam nas duas rodas do semi-eixo padrão (ver Figura 1) serão substituídas por uma carga de roda simples equivalente (CRSE). Recorrendo-se ao estudo de equivalência de carga, pelo princípio de igual deformação vertical específica no topo do subleito, chegou-se a uma CRSE de 7000

libras ou 3175 kgf, para uma pressão de enchimento dos pneus de 80 psi ou 5,63 kgf/cm². A deformação vertical específica encontrada no topo do subleito, numa posição horizontal equidistante dos centros das duas rodas do semi-eixo padrão, para a estrutura do pavimento ilustrada na Figura 1, tanto para o carregamento do semi-eixo padrão simples de rodas duplas, quanto para a CRSE, foi igual a $0,38 \cdot 10^{-3}$. Este estudo de equivalência de carga foi feito através da utilização do programa ELSYM5. Mas o programa ILLI-PAVE foi também utilizado para a estimativa inicial dos módulos resilientes dos materiais que compõem a estrutura do pavimento em estudo, com uma suposta CRSE de 6800 libras e com uma pressão de contato de 80 psi. Os módulos resilientes médios obtidos para os materiais, por um procedimento semelhante ao apresentado no item 3.2, foram: camada de base 85.000 psi; camada de reforço 55.000 e camada do subleito 5000 psi. O módulo resiliente do revestimento betuminoso foi assumido constante e igual a 350.000 psi. Os valores dos coeficientes de Poisson empregados neste estudo de equivalência de carga são os mesmos que estão também apresentados no item 3.2.

3.2 Definição dos Elementos de Entrada Associados aos Materiais para a Utilização dos Programas ILLI-PAVE e ELSYM5

• Módulo resiliente do revestimento betuminoso do tipo tratamento superficial triplo (TST)

O módulo resiliente do TST foi estimado em 350.000 psi, tendo em vista os resultados dos módulos resilientes de misturas betuminosas apresentados no trabalho de QUEIROZ e VISSER (1978), conforme ilustra a Tabela 5.

• Módulos resilientes das camadas de solo do pavimento

A estimativa dos módulos resilientes das camadas de solo do pavimento foi feita através da utilização dos modelos de módulos resilientes propostos por BERNUCCI (1995). A justificativa para a escolha desses modelos assenta-se na semelhança que existe entre os solos investigados por esta autora e os solos objetos do presente estudo; além do que, há compatibilidade entre as energias de compactação envolvidas nos dois estudos.

camada de base:

$$M_R = 382,3 \times \theta^{0,20} \quad (1)$$

onde:

M_R = módulo resiliente em MPa,

θ = soma das tensões principais em kPa.

Este modelo foi obtido para um corpo de prova compactado a 95% da energia modificada, **após secagem ao ar até que a umidade atingisse cerca de 80% da umidade ótima de compactação**. Este procedimento procura simular o estado dos solos lateríticos em bases de pavimentos de baixo custo, sujeitos à perda de umidade após a compactação. O solo representado pela Equação 1 é semelhante ao solo em estudo, segundo as classificações HRB, USCS e MCT. Para estas classificações, o solo estudado situa-se nas classes A-2-4, SC e LA', respectivamente. A Equação 1 foi utilizada no programa ILLI-PAVE e para afastamentos horizontais de 1,68; 5,03; 8,38 e 11,73 cm, gerados para uma CRSE de 7000 libras e pressão de contato de 80 psi, o módulo resiliente médio encontrado para a camada de base foi de, aproximadamente, 88.000 psi. Este valor foi utilizado no programa ELSYM5 para um estudo comparativo das tensões e deformações fornecidas pelos dois programas acima citados.

camada de reforço

$$M_R = 76,7 \times \theta^{0,35} \quad (2)$$

onde:

M_R = módulo resiliente em MPa,

θ = soma das tensões principais em kPa.

Este modelo foi obtido para um corpo de prova compactado a 97% da energia modificada **sem secagem ao ar**, ou seja, logo após a compactação. O solo representado pela Equação 2 é também semelhante ao solo em estudo, segundo as classificações HRB, USCS e MCT. Para estas classificações, o solo estudado situa-se nas classes A-2-4, SC e LA', respectivamente. A Equação 2 foi utilizada no programa ILLI-PAVE e para afastamentos horizontais de 1,68; 5,03; 8,38; 11,73 e 16,76 cm, gerados para uma CRSE de 7000 libras e pressão de contato de 80 psi, o módulo resiliente médio da camada de reforço foi de, aproximadamente, 60.000 psi. Este valor foi utilizado no programa ELSYM5 para um estudo comparativo das tensões e deformações fornecidas pelos dois programas anteriormente citados.

camada do subleito

$$R = 233,5\theta^{0,08}$$

(3)

onde:

M_R = módulo resiliente em MPa,

θ = soma das tensões principais em kPa

Este modelo foi obtido para um corpo de prova compactado a 100% da energia normal. O outro motivo é que o solo representado pela Equação 3 é semelhante ao solo em estudo, segundo as classificações USCS e MCT. Para estas classificações, o solo estudado situa-se nas classes SC e LA', respectivamente. A Equação 3 foi utilizada no programa ILLI-PAVE e para afastamentos horizontais de 1,68; 5,03; 8,38; 11,73 e 16,76 cm, gerados para uma CRSE de 7000 libras e pressão de contato de 80 psi, o módulo resiliente médio da camada do subleito foi de, aproximadamente, 5000 psi. Este valor foi utilizado no programa ELSYM5 para um estudo comparativo das tensões e deformações fornecidas pelos programas supra citados.

• coeficiente de Poisson

Os valores dos coeficientes de Poisson fixados para as camadas do pavimento foram: revestimento betuminoso (TST): 0,35 e para as demais camadas, incluindo a do subleito, 0,40. Esses valores foram fixados com base nos valores apresentados por UDDIN, MEYER e HUDSON (1985), conforme ilustra a Tabela 6.

• taxa de tensão máxima (σ_1/σ_3)

Na ruptura, a taxa de tensão principal σ_1/σ_3 , para materiais não coesivos, pode ser dada pela equação:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \operatorname{tg}^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4)$$

onde:

ϕ = ângulo de atrito interno do solo em graus.

De acordo com JIN, LEE e KOVACS (1994), para solos granulares, um intervalo de valores de ϕ geralmente aceito é de 30° a 45°. Para esse intervalo de valores, utilizando-se a

Equação 4, as relações de tensão principal variam de 3 a 5,8. Para a utilização do programa ILLI-PAVE a relação máxima de tensão ($\sigma_1/\sigma_{3 \text{ máx.}}$) foi estimada em 5,8, ou seja, o limite superior do intervalo acima citado. No programa ILLI-PAVE, esta relação ($\sigma_1/\sigma_{3 \text{ máx.}}$) é representada pela variável MAXSRi.

• Parâmetros c e ϕ da envoltória de ruptura de Mohr Coulomb

Os valores c e ϕ obtidos para os solos 1 e 2 que compõem as camadas do pavimento em estudo estão contidos nas Tabelas 3 e 4. Para as camadas de base e do reforço (solo 1) foram selecionados os valores de c e ϕ na energia intermediária (Tabela 4). Para o subleito (solo 2) foram assumidos os valores de c e ϕ na energia normal (Tabela 3).

camada do pavimento	intercepto coesivo (c) (psi)	ângulo de atrito (ϕ) (graus)
base	9,9	42,8
reforço	9,9	42,8
subleito	14,1	28,2

A Tabela 7 contém os resultados das tensões normais verticais e horizontais e, a Tabela 8, os resultados dos deslocamentos verticais e deformações específicas verticais fornecidos pelos programas ILLI-PAVE e ELSYM5, correspondentes à estrutura e ao carregamento representados na Figura 4. As Figuras 5 e 6 ilustram, graficamente, os resultados contidos nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

A Tabela 9 resume as tensões normais vertical e horizontal, em diversos pontos das camadas do pavimento, referentes à estrutura e carregamento ilustrados na Figura 4. Estas tensões foram obtidas da Figura 5 nas mesmas profundidades indicadas na Tabela 10, para fins comparativos.

A Figura 7 ilustra a estrutura e carregamento utilizados para o emprego do programa ELSYM5, para o cálculo das tensões em vários pontos das camadas do pavimento, considerando-se três diferentes posições do eixo X.

A Tabela 10 contém os resultados das tensões normais horizontal e vertical correspondentes ao carregamento ilustrado pela Figura 7.

3.3 Comparação das Tensões, Deslocamentos e Deformações Fornecidas pelos Programas ILLI-PAVE e ELSYM5

Analisando-se o gráfico da Figura 5 ou os dados contidos na Tabela 7, observa-se que a variação das tensões normais verticais fornecidas pelos programas ILLI-PAVE e ELSYM5, em função da profundidade do pavimento, foi bastante semelhante, exceto para o intervalo de profundidades compreendido entre 13 a 30 cm. Neste intervalo, o programa ILLI-PAVE gerou tensões normais verticais superiores ao programa ELSYM5, da ordem de 100 kPa. Para profundidades inferiores a 13 cm, as tensões normais verticais fornecidas pelos dois programas foram muito semelhantes. Para profundidades do pavimento acima de 30 cm, os valores das tensões normais verticais foram bem próximos uns dos outros, com um desvio médio em torno de 30 kPa. Com relação às tensões normais horizontais, a variação entre elas foi bem mais significativa. Para profundidades do pavimento acima de 15 cm até 41 cm, o programa ELSYM5 gerou tensões normais horizontais de tração, enquanto que o programa ILLI-PAVE forneceu tensões normais horizontais de compressão. Entretanto, para profundidades do pavimento abaixo de 5 cm e acima de 40 cm, as tensões normais horizontais obtidas através dos programas ILLI-PAVE e ELSYM5 foram muito semelhantes.

Analisando-se o gráfico da Figura 6 ou os dados contidos na Tabela 8, observa-se que os deslocamentos verticais fornecidos pelo programa ELSYM5 foram bem superiores aos produzidos pelo programa ILLI-PAVE e, à medida que a profundidade do pavimento aumenta, o desvio entre eles também cresce, mas de uma forma não significativa. Com relação às deformações verticais específicas, produzidas pelos dois programas supra citados, a variação entre elas, em função da profundidade do pavimento, foi bem diferente uma da outra, exceto para profundidades do pavimento acima de 25 cm. Acima desta profundidade, a variação entre elas foi bastante semelhante, e os valores observados razoavelmente próximos uns dos outros.

Comparando-se ainda os resultados das tensões normais verticais contidos nas Tabelas 9 e 10 ou na Figura 8, fornecidos pelos programas ILLI-PAVE e ELSYM5, observa-se uma variação bastante uniforme entre essas tensões, em função da profundidade do pavimento. Mas as tensões normais verticais geradas pelo programa ILLI-PAVE, na maioria dos casos, foram superiores às tensões normais verticais produzidas pelo programa ELSYM5. É importante lembrar que a Figura 8 elucida a variação das tensões normais verticais e

horizontais, para uma mesma estrutura de pavimento com carregamentos diferentes, isto é, uma estrutura de pavimento com carregamento de um semi-eixo padrão (Figura 4) e, outra, com CRSE (Figura 7). Observa-se também, na Figura 8, que a tendência das tensões normais horizontais geradas pelos programas ILLI-PAVE e ELSYM5, para profundidades do pavimento acima de 12,5 cm, foi bastante semelhante, mas os seus valores bem diferentes uns dos outros. As tensões normais horizontais fornecidas pelo programa ILLI-PAVE foram todas de compressão. Já o programa ELSYM5 produziu tensões normais de tração, para profundidades do pavimento acima de, aproximadamente, 17,5 cm. Outra característica importante que se observa ainda na Figura 8, é que a CRSE de 7000 libras foi bastante representativa do carregamento referente ao do semi-eixo padrão simples de rodas duplas.

3.4 Tensões a Serem Consideradas para o Estudo da Deformabilidade Permanente dos Materiais no Laboratório (Conclusões)

Tendo em vista que os resultados das tensões fornecidos pelos programas **ILLI-PAVE** e **ELSYM5**, principalmente aqueles relacionados com as tensões normais verticais (ver Tabela 7 ou Figura 5) foram bem semelhantes, é evidente que para fins de estimativa das tensões no pavimento, com o objetivo de estudar a deformabilidade dos materiais no laboratório, poder-se-ia utilizar ambos os programas acima citados. Entretanto, sob o ponto de vista das tensões normais horizontais, o programa **ILLI-PAVE** atribuiu às camadas do pavimento tensões horizontais de compressão, enquanto que o programa **ELSYM5** atribuiu à estas mesmas camadas, na maioria das vezes, tensões horizontais de tração. Mas os materiais que compõem as camadas do pavimento em estudo são de características granulares e, portanto, praticamente não resistem a esforços de tração. De acordo com CHOU (1977), os materiais granulares, quando confinados, podem suportar alguma tensão de tração que é absorvida pelo atrito intergranular, devido à tensão compressiva vertical que age sobre eles. Assim sendo, tendo em vista também as considerações apresentadas no item anterior, optou-se pelos resultados das tensões normais fornecidos pelo programa **ILLI-PAVE** contidos na Figura 5. Essas tensões estão registradas na Tabela 11 e foram extraídas da Figura 5 nas seguintes profundidades: camada de base: profundidades de 10 a 22,50 cm; camada de reforço: profundidades de 22,50 a 37,5 cm e camada do subleito: profundidades maiores ou iguais a 37,50 cm.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNUCCI, Liedi L.B. (1995). *Considerações sobre o Dimensionamento de Pavimentos Utilizando Solos Lateríticos para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*. São Paulo, 237 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CHOU, Yu T. (1977). *Analysis of permanent deformations of flexible airport pavements*. Federal Aviation Administration, Washington, DC, 20591. 116 p.
- DER-SP-Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (1991). *Manual de Normas de Pavimentação*. São Paulo, DER-SP. 198 p.
- DUNCAN, J.M.; MONISMITH, C.L.; WILSON, E.L. (1968). Finite element analyses of pavements. *Highway Research Record*, Washington, DC, n. 228, p. 18-33.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1985). *ELSYMS - Interactive Microcomputer System - user's manual*. Virginia, FHWA-RD-85, p. 1-33, september.
- FERNANDO, JR.; José L. (1994). *Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos*. São Carlos, 331 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GOMEZ-ACHECAR, M.; THOMPSON, Marshall R. (1986). ILLI-PAVE-based response algorithms for full-depth asphalt concrete flexible pavements. *Transportation Research Record*, Washington, DC, n. 1095, p. 11-18.
- JIN, Myung S.; LEE, K.W.; KOVACS, William D. (1994). Seasonal variation of resilient modulus of subgrade soils. *Journal of Transportation Engineering*, vol.120, n. 4, p. 603 - 616, july/august.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1980). Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitação do método tradicional, apresentação de uma nova sistemática. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 15, Belo Horizonte/MG, ABPV.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. Rio de Janeiro, *Simpósio Brasileiro sobre Solos Tropicais em Engenharia* - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1ª Seção, p. 30-41.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo, Editora Vilibor. 213 p.

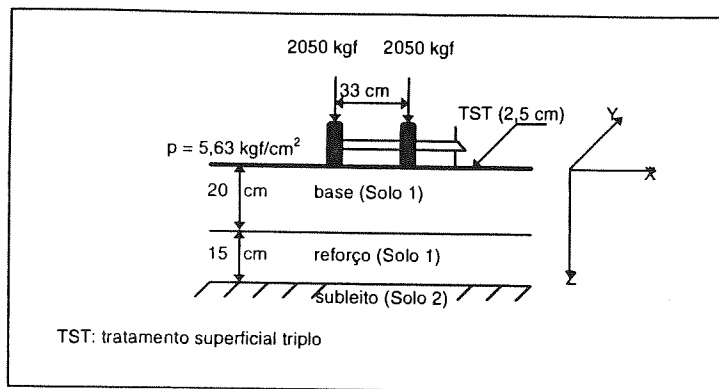


FIGURA 1: Estrutura do Pavimento com o Semi-eixo Padrão Simples de Rodas Duplas Utilizados para Estudo das Tensões e Deformações nas Camadas do Pavimento

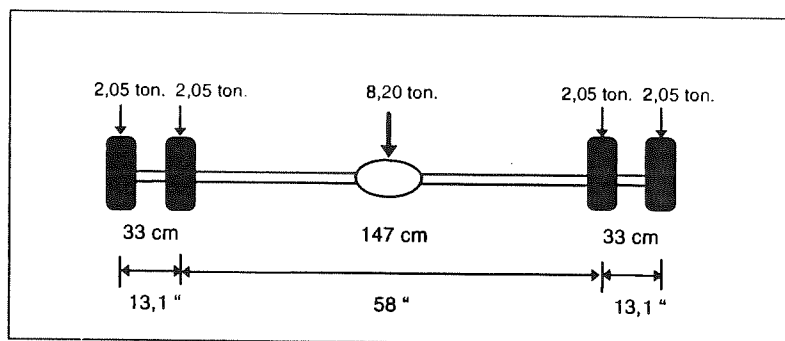


FIGURA 2: Configuração do Eixo Padrão Simples de Rodas Duplas de 8,2 Toneladas (UDDIN, MEYER e HUDSON, 1985)

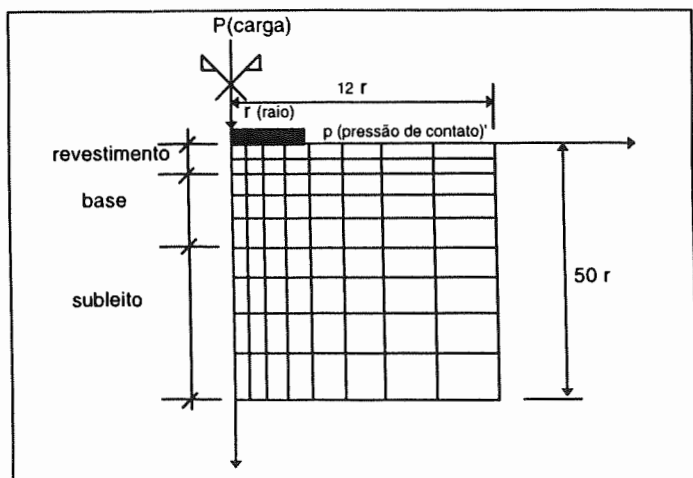


FIGURA 3: Malha Hipotética de Elementos Finitos Utilizada pelo Programa ILLI-PAVE para Análise de Estruturas de Pavimentos

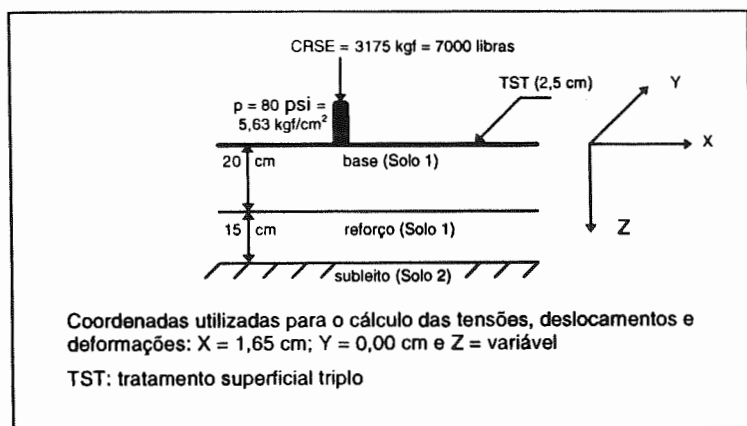


FIGURA 4: Estrutura e Carregamento Utilizados para o Estudo Comparativo das Tensões, Deslocamentos e Deformações Fornecidas pelos Programas ILLI-PAVE e ELSYM5

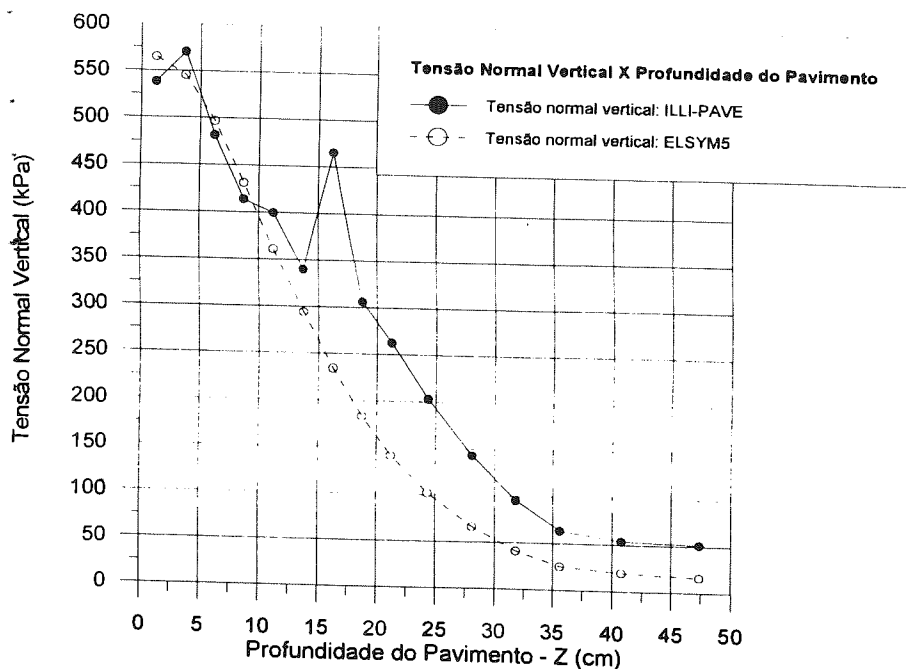
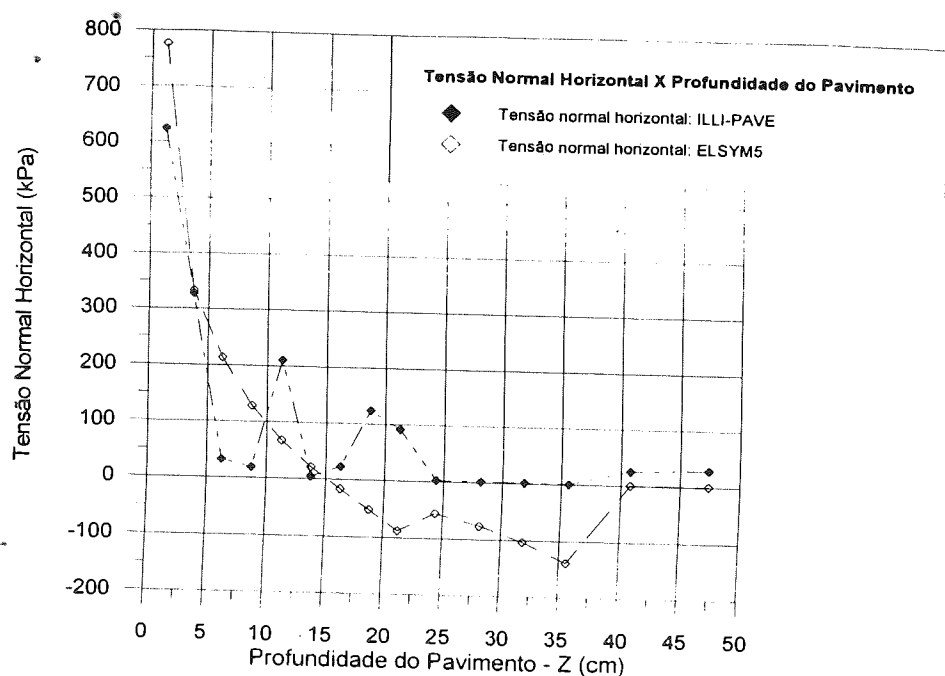


FIGURA 5: Tensões Normais Conforme Esquema de Carregamento Contido na Figura 4 (A Tabela 7 Contém os Valores Dessas Tensões Normais)

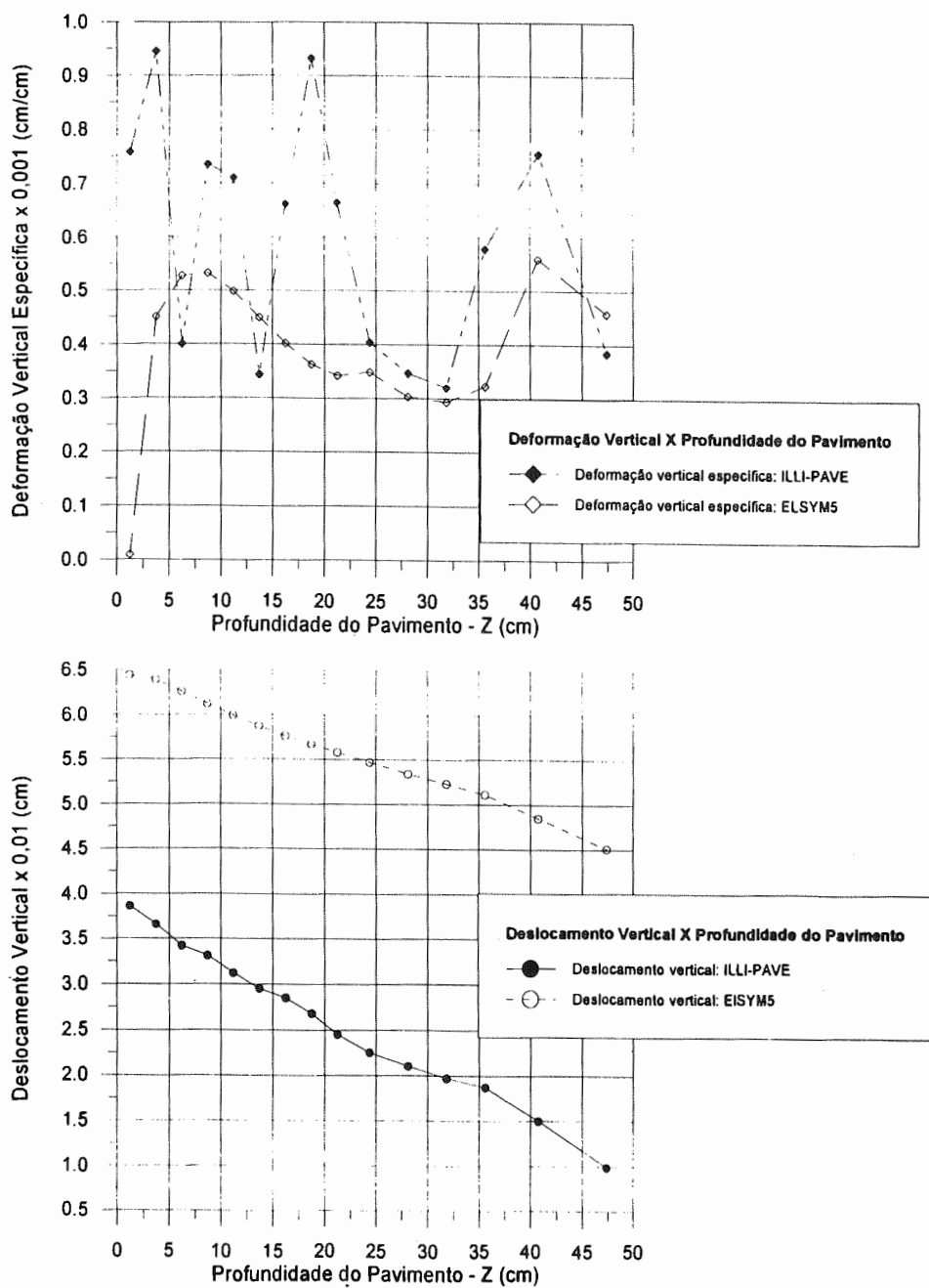


FIGURA 6: Deslocamentos Verticais e Deformações Específicas Verticais Conforme Esquema de Carregamento Contido na Figura 4 (a Tabela 8 Contém os Valores desses Deslocamentos e Deformações)

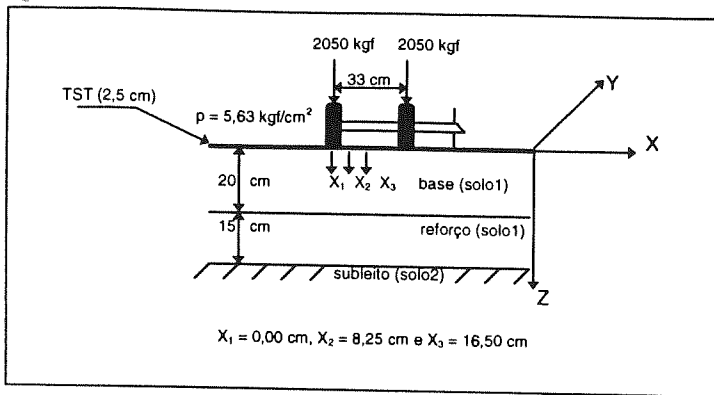


FIGURA 7: Estrutura e Carregamento Utilizados para a Utilização do Programa ELSYM5 para Cálculo das Tensões em Vários Pontos das Camadas do Pavimento, Considerando-se Três Posições do Eixo X

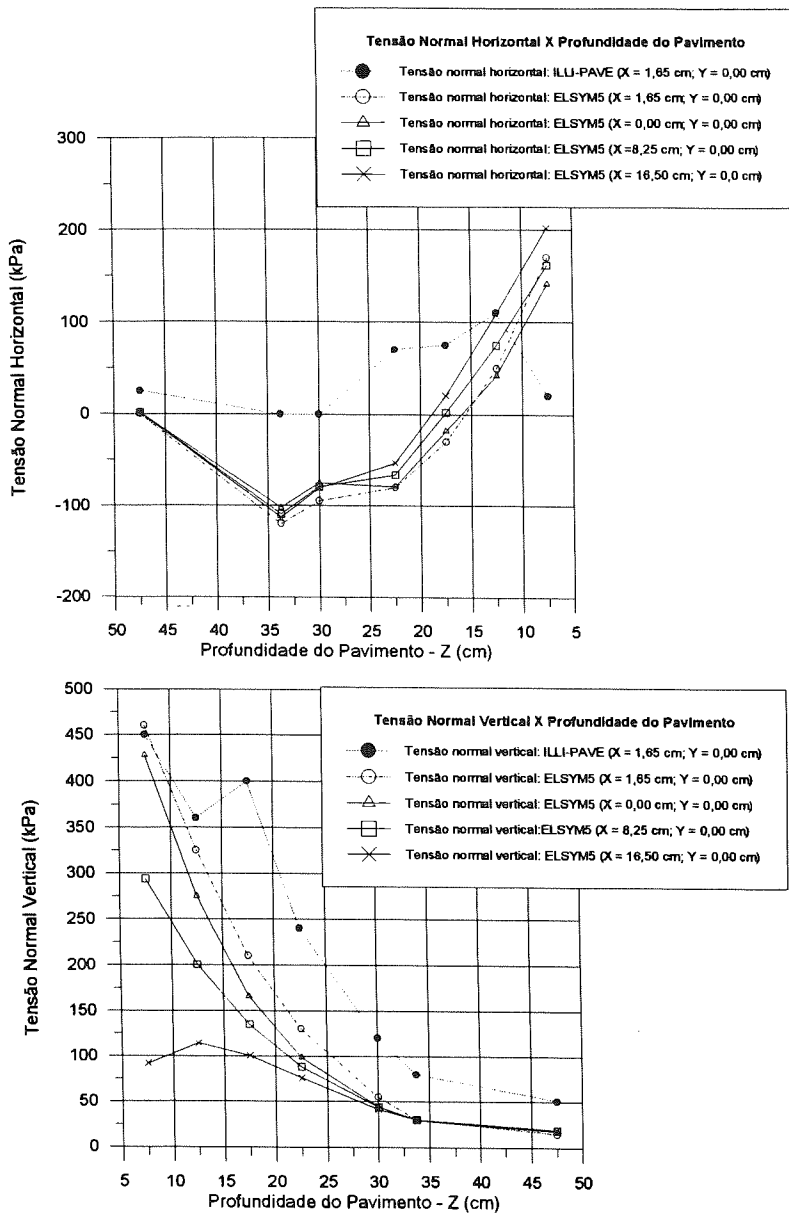


TABELA 1: Resultados dos Ensaios: Granulometria, Limites de Liquidez e Plasticidade, Peso Específico dos Sólidos e Classificação dos Solos Pelos Métodos HRB e USCS

Ensaio/Classificação dos Solos		Solo 1	Solo 2
Limite de Liquidez Método do ensaio: M 4-61 *		28	36
Limite de Plasticidade: Método do ensaio: M 5-61 *		18	25
Índice de Plasticidade		10	11
Massa específica dos sólidos (g/cm³) Método do ensaio: M 3-61 *		2,681	2,689
Granulometria Método do ensaio: M 6-61*		Porcentagem que passa em peso	Porcentagem que passa em peso
Peneira			
Número	Abertura (mm)		
4	4,76		
10	2,00	99,97	100
16	1,19	99,02	99,73
30	0,59	94,62	97,71
40	0,42	88,00	93,00
50	0,297	79,56	88,09
100	0,149	46,94	66,11
200	0,074	29,00	45,00
Classificação dos Solos	HRB	A-2-4 (0)	A-6 (2)
	USCS	SC	SC

* DER-SP (1991)

TABELA 2: Classificação dos Solos 1 e 2 pelo Método MCT

Material	Parâmetros da Classificação MCT	Classificação MCT
Solo 1	$c' = 1,27$; $Pi' = 97 \%$; $d' = 114$; $e' = 1,04$	LA'
Solo 2	$c' = 1,90$; $Pi' = 0,0 \%$; $d' = 118$; $e' = 0,55$	LG'

TABELA 3: Resultados dos Ensaio de Compactação e CBR e Parâmetros da Envoltória de Ruptura de Mohr Coulomb dos Solos 1 e 2 na Energia Normal

Material	Energia Normal					
	h_{ot} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	h_{CBRmax} (%)	CBR_{max} (%)	c (kPa)	ϕ (graus)
Solo 1	11,10	1,970	9,80	48	41,73	38,67
Solo 2	17,00	1,710	15,50	27	98,97	28,18

TABELA 4: Resultados dos Ensaio de Compactação e CBR e Parâmetros da Envoltória de Ruptura de Mohr Coulomb dos Solos 1 e 2 na Energia Intermediária

Material	Energia Intermediária					
	h_{ot} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	h_{CBRmax} (%)	CBR_{max} (%)	c (kPa)	ϕ (graus)
Solo 1	10,10	2,020	9,25	75	70,25	42,77
Solo 2	16,40	1,785	15,70	42	131,41	31,86

Nota: h_{ot} = teor ótimo de umidade; γ_{dmax} = massa específica aparente seca máxima; h_{CBRmax} = teor de umidade correspondente ao CBR máximo; c = intercepto coesivo e ϕ = ângulo de atrito

TABELA 5: Módulos de Resiliência Médios em kgf/cm² para Dois Tipos de Revestimentos Betuminosos em Duas Temperaturas (QUEIROZ e VISSER, 1978)

Tipo de Revestimento	Módulo de Resiliência (kgf/cm ²)	
	Temperatura do Ensaio	
	20°C	30°C
Concreto asfáltico	58623	25352
Tratamento superficial duplo	50577	25305

TABELA 6: Valores Recomendados de Coeficiente de Poisson para Diferentes Materiais do Pavimento (UDDIN, MEYER e HUDSON, 1985)

Concreto de cimento Portland	0,15 - 0,20	0,15
Concreto asfáltico	0,25 - 0,35	0,35
Base estabilizada com cimento	0,20 - 0,30	0,30
Base estabilizada com asfalto	0,25 - 0,35	0,35
Base granular	0,20 - 0,50	0,40
Subleito granular	0,30 - 0,50	0,40
Subleitos argilosos ou siltosos	0,40 - 0,50	0,45
Subleito tratado com cal		0,40

TABELA 7: Tensões Normais Fornecidas pelos Programas ILLI-PAVE e ELSYM5 Referentes à Figura 4

Profundidade do Pavimento (cm)	Tensões Normais - ILLI-PAVE (kPa)		Tensões Normais - ELSYM5 (kPa)	
	X = 1,65 cm	Y = 0,00 cm	X = 1,65 cm	Y = 0,00 cm
	σ_x (horizontal)	σ_z (vertical)	σ_x (horizontal)	σ_z (vertical)
1,25	625,18	537,97	776,37	564,70
3,75	327,00	570,32	332,77	545,22
6,25	31,08	481,72	213,01	496,41
8,75	18,14	413,50	127,36	431,15
11,25	210,27	399,44	66,43	360,97
13,75	4,04	239,66	20,72	293,95
16,25	22,36	465,54	-16,95	234,04
18,75	123,77	305,90	-51,84	182,91
21,25	90,72	262,31	-88,05	141,21
24,38	2,32	203,23	-56,18	102,18
28,13	1,62	142,76	-76,79	66,59
31,87	1,00	95,64	-103,16	40,90
35,62	0,29	63,78	-138,68	25,31
40,80	25,11	53,80	0,19	19,83
40,40	28,76	51,54	0,36	16,38

* o sinal (-) significa tração

***TABELA 8: Deslocamentos Verticais e Deformações Verticais Específicas**

Fornecidos pelos Programas ILLI-PAVE e ELSYM5 Referentes à

Figura 4

Profundidade do Pavimento (Z) (cm)	Deslocamento Vertical (U _z) (ILLI-PAVE) (cm)	Deslocamento Vertical (U _z) (ELSYM5) (cm)	Deformação Vertical Específica (ε _z) (ILLI-PAVE) (cm/cm)	Deformação Vertical Específica (ε _z) (ELSYM5) (cm/cm)
	X = 1,65 cm Y = 0,00 cm	X = 1,65 cm Y = 0,00 cm	X = 1,65 cm Y = 0,00 cm	X = 1,65 cm Y = 0,00 cm
1.25	3,86 10 ⁻²	6,44 10 ⁻²	0,758 10 ⁻³	0.009 10 ⁻³
3.75	3,66 10 ⁻²	6,39 10 ⁻²	0,945 10 ⁻³	0,450 10 ⁻³
6.25	3,42 10 ⁻²	6,26 10 ⁻²	0,400 10 ⁻³	0,527 10 ⁻³
8.75	3,31 10 ⁻²	6,12 10 ⁻²	0,735 10 ⁻³	0,532 10 ⁻³
11.25	3,12 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	0,710 10 ⁻³	0,498 10 ⁻³
13.75	2,95 10 ⁻²	5,87 10 ⁻²	0,343 10 ⁻³	0,449 10 ⁻³
16.25	2,85 10 ⁻²	5,76 10 ⁻²	0,662 10 ⁻³	0,401 10 ⁻³
18.75	2,68 10 ⁻²	5,67 10 ⁻²	0,932 10 ⁻³	0,363 10 ⁻³
21.25	2,45 10 ⁻²	5,58 10 ⁻²	0,665 10 ⁻³	0,342 10 ⁻³
24.38	2,25 10 ⁻²	5,47 10 ⁻²	0,404 10 ⁻³	0,349 10 ⁻³
28.13	2,10 10 ⁻²	5,34 10 ⁻²	0,347 10 ⁻³	0,303 10 ⁻³
31.87	1,97 10 ⁻²	5,23 10 ⁻²	0,320 10 ⁻³	0,293 10 ⁻³
35.62	1,87 10 ⁻²	5,11 10 ⁻²	0,579 10 ⁻³	0,323 10 ⁻³
40.80	1,50 10 ⁻²	4,85 10 ⁻²	0,756 10 ⁻³	0,560 10 ⁻³
47.40	0,99 10 ⁻²	4,51 10 ⁻²	0,385 10 ⁻³	0,458 10 ⁻³

TABELA 9: Tensões Normais Verticais e Horizontais, em Diferentes Pontos das Camadas do Pavimento, Extraídas da Figura 5

Profundidade do Pavimento (cm)	Tensões Normais Verticais (kPa) (X = 1,65 cm; Y = 0,00 cm)		Tensões Normais Horizontais (kPa) (X=1,65 cm; Y = 0,00 cm)	
	ILLI-PAVE	ELSYM5	ILLI-PAVE	ELSYM5
7,5	450	460	20	170
12,5	360	325	110	50
17,5	400	210	75	-30
22,50	240	130	70	-80
30,00	120	55	0	-95
33,75	80	30	0	-120
47,50	51	15	25	0

o sinal (-) significa tensão normal de tração

TABELA 10: Tensões Normais Horizontais e Verticais Fornecidas pelo Programa ELSYM5 Referentes à Figura 7

Profundidade (cm)	Tensões Normais (kPa) X=0,00 cm; Y=0,00 cm		Tensões Normais (kPa) X=8,25 cm; Y=0,00 cm		Tensões Normais (kPa) X=16,50 cm; Y=0,00 cm	
	σ_x	σ_z	σ_x	σ_z	σ_x	σ_z
	(horizontal)	(vertical)	(horizontal)	(vertical)	(horizontal)	(vertical)
7,5	141,42	427,78	161,53	293,74	202,32	91,70
12,5	42,19	275,11	74,82	200,56	108,37	114,06
17,5	-18,16	165,96	2,01	134,88	20,46	100,56
22,5	-79,18	98,45	-66,33	88,11	-53,52	75,88
30,0	-75,18	44,77	-79,18	43,78	-80,94	41,57
33,75	-102,04	29,65	-109,35	30,19	-113,01	29,85
47,50	1,93	17,84	1,73	18,72	1,48	19,09

o sinal (-) significa tensão normal de tração

TABELA 11: Intervalos de Amplitudes de Tensões Normais para Estudo, em Laboratório, da Deformação Permanente de Alguns Solos de Comportamento Laterítico Utilizados em Pavimentos do Tipo Baixo Custo do Estado de São Paulo

Camada do Pavimento	Intervalo de Tensão Normal	
	Tensão Horizontal (kPa)	Tensão Vertical (kPa)
base	100 - 50	400 - 250
reforço	50 - 20	250 - 50
subleito	≤ 20	≤ 50