

ESTUDO DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DE PAVIMENTO PARA O
DIMENSIONAMENTO DE RECAPEAMENTOS

CÉSAR AUGUSTO VIEIRA DE QUEIROZ

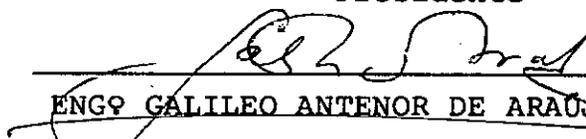
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

APROVADA POR:

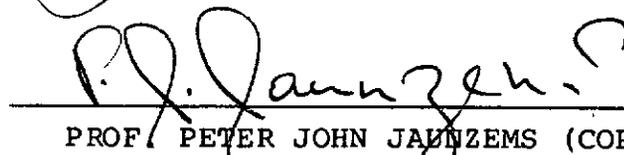


PROF. JACQUES DE MEDINA (COPPE - UFRJ)

Presidente



ENGº GALILEO ANTENOR DE ARAÚJO (DPNT - DNER)



PROF. PETER JOHN JANTZEMS (COPPE - UFRJ)



PROF. MARCIO MIRANDA SOARES (COPPE - UFRJ)

RIO DE JANEIRO

ESTADO DA GUANABARA - BRASIL

NOVEMBRO DE 1972

A minha esposa

A meus pais

AGRADECIMENTOS

Ao professor JACQUES DE MEDINA, digno responsável pela área de Mecânica dos Solos da COPPE, pela valiosa orientação.

Ao Engenheiro MURILLO BRETAS PEIXOTO, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, cujo incentivo tornou possível a realização deste trabalho.

Ao Professor MARCIO MIRANDA SOARES, pela eficiente ajuda prestada ao desenvolvimento deste estudo e, em particular, no cálculo automático das deflexões.

A todo o Corpo Docente da COPPE, pelo aprimoramento que tem dado aos Cursos de Pós-Graduação.

A todos os colegas e funcionários que, direta ou indiretamente, contribuíram na execução deste trabalho.

R E S U M O

Desenvolve-se um aperfeiçoamento do método de dimensionamento de recapeamento de pavimentos flexíveis, com a determinação, pela teoria da elasticidade, da expressão da deformação vertical da superfície do pavimento, considerado um sistema de duas camadas, e adotadas as correlações empíricas conhecidas entre características de tráfego e a deflexão tolerável.

A partir da solução de Huang de cálculo da deformação vertical num sistema de duas camadas elásticas fora da área de carregamento, no caso de roda simples, desenvolve o Autor a solução para a deflexão no centro de uma roda dupla e o correspondente programa automático em linguagem FORTRAN. Adota-se o critério do módulo de elasticidade efetivo correspondente ao pavimento antigo e subleito como um todo, determinado a partir de medição de deflexão com a viga de Benkelman. Descreve-se um trabalho de campo realizado para determinar as características da roda dupla de 9 000 libras utilizada na determinação com a viga de Benkelman: áreas de contato, pressão de inflação, etc.

O desenvolvimento teórico permite que se determine, praticamente, a espessura de recapeamento necessária, uma vez conhecido o módulo de elasticidade deste. Apresenta-se um gráfi-

co de cálculo.

Conclui-se com a comparação dos vários métodos de dimensionamento de recapeamento de pavimentos flexíveis.

ABSTRACT

A new feature concerning design of overlays for flexible pavements is presented. The development is based on the expression of surface deflection according to the theory of elasticity for a two-layered system, and with due consideration of empirical correlation between traffic characteristics and allowable deflection.

Starting from Huang's solution for the deflection in a two-layered system at an off-set from the loaded surface (single wheel), the Author obtains the deflection at center of twin wheels and develops an automatic program in FORTRAN computer language for it. The effective modulus of elasticity of the existing pavement and subgrade soil altogether is admittedly determined from deflection measurements with the Benkelman beam. It is described a field work performed in order to determine the characteristics of the 9000 lbs twin wheels - imprint area, tyre pressure, etc - which is the usual load for Benkelman beam determinations.

The theoretical development gives us means to determine the overlay thickness provided its modulus of elasticity is known. A graph for this sort of calculations is shown.

A comparison is made with existing methods of flexible pavement overlay design.

I N D I C E

Capítulos		Páginas
I	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
II	<u>MÉTODOS EXISTENTES PARA O DIMENSIONAMENTO DE RECAPEAMENTOS</u>	
	2.1 - INTRODUÇÃO.....	2
	2.2 - MÉTODO DO THE ASPHALT INSTITUTE.....	2
	2.3 - MÉTODO DA RTAC.....	4
	2.4 - MÉTODO DO ENGº CELESTINO RUIZ.....	6
	2.5 - COMENTÁRIOS SOBRE OS MÉTODOS APRESENTADOS	7
III	<u>APLICAÇÃO DA TEORIA DA ELASTICIDADE AO CÁLCULO DAS DEFLEXÕES DOS PAVIMENTOS</u>	
	3.1 - INTRODUÇÃO	9
	3.2 - DEFLEXÕES NA SUPERFÍCIE DE UM SEMI-ESPAÇO INFINITO.....	9
	3.3 - DEFLEXÕES NA SUPERFÍCIE DE UM SISTEMA ELÁSTICO DE DUAS CAMADAS.....	12
IV	<u>EXTENSÃO DO CÁLCULO DAS DEFLEXÕES AO DIMENSIONAMENTO DE RECAPEAMENTOS</u>	
	4.1 - INTRODUÇÃO	15

Capítulos	Páginas
4.2 - RELAÇÃO TRÁFEGO - DEFLEXÃO TOLERÁVEL.....	15
4.3 - RELAÇÃO ENTRE A ESPESSURA DO RECAPEAMENTO E A DEFLEXÃO FINAL.....	18
4.3.1 - Determinação Experimental das características da roda dupla de 9 000 libras.....	18
4.3.2 - O módulo efetivo do pavimento existente.....	21
4.3.3 - Considerações sobre o módulo de Poisson.....	24
4.3.4 - Considerações sobre o módulo de elasticidade do recapeamento.....	25
4.3.5 - Cálculo da espessura do recapea- mento.....	26
4.4 - PROGRAMA AUTOMÁTICO EM LINGUAGEM FORTRAN PARA O CÁLCULO DAS DEFLEXÕES.....	27
4.5 - GRÁFICO PARA O DIMENSIONAMENTO DE RECAPEA- MENTOS.....	34
V <u>COMPARAÇÕES COM OS MÉTODOS EXISTENTES</u>	38
VI <u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</u>	41
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	43

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Recapeamentos asfálticos são utilizados na restauração da suavidade das superfícies dos pavimentos e para reforçar estruturalmente pavimentos existentes. Quando o pavimento é capaz de suportar as cargas do tráfego, uma capa relativamente fina, de cerca de 2cm de espessura é suficiente (KINGHAM¹, 1970). Entretanto, quando há necessidade de reforço, espessuras maiores podem tornar-se necessárias.

Este trabalho descreve um estudo de deformações verticais de pavimentos que poderá ser utilizado no projeto estrutural de recapeamentos asfálticos capazes de reforçar pavimentos existentes, baseado na "deflexão" representativa de um trecho e nas aplicações da teoria da elasticidade aos sistemas de duas camadas. Deflexão, termo que significa ângulo em relação a uma direção de referência, é usado aqui, pois que a deformação vertical superficial mede-se com o chamado defletômetro.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS EXISTENTES PARA O DIMENSIONAMENTO DE RECAPEAMENTOS

2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo exporemos os fundamentos em que se baseiam os três métodos de dimensionamento de recapeamentos de pavimentos flexíveis que, ao nosso ver, são os mais difundidos no Brasil. Tais métodos são os seguintes:

- a) Método do "The Asphalt Institute"
- b) Método da "Roads and Transportation Association of Canada"
- c) Método do Eng^o Celestino Ruiz

2.2 - MÉTODO DO "THE ASPHALT INSTITUTE"

O método de dimensionamento de recapeamentos do Instituto do Asfalto baseia-se em uma das fórmulas matemáticas apresentadas por KIRK² no 12^o Congresso da "Permanent International Association of Road Congresses", realizado em Roma em 1964. A relação de Kirk, adotada, aplica-se a um sistema de duas camadas e escreve-se (KINGHAM¹):

$$d = \frac{1,5pa}{E_s} \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+0,8(t/a)^2}} \right) \frac{E_s}{E_p} + \frac{1}{\sqrt{1+0,8(t/a)^2} \sqrt[3]{(E_p/E_s)^2}} \right]$$

(Equação 2.1)

onde os símbolos representam:

d = deflexão de projeto do pavimento, em polegadas

p = pressão de contato, suposta 70 lb/pol²

a = raio de uma placa simples onde se aplica a pressão p . Este carregamento, com $a = 6,4$ polegadas, é suposto equivalente à roda dupla de 9 000 libras

t = espessura do recapeamento

E_p = módulo de elasticidade do recapeamento, suposto igual a 500 000 lb/pol²

E_s = módulo efetivo do complexo pavimento existente mais subleito, relacionado com a deflexão representativa (d_o) do pavimento existente pela equação de BOUSSINESQ³:

$$d_o = \frac{1,5pa}{E_s} \quad (2.2)$$

As curvas de dimensionamento do Instituto do Asfalto, apresentadas na figura IV-3 do Manual intitulado "Asphalt Overlays and Pavement Rehabilitation", foram determinadas usando uma técnica reiterativa em que diferentes valores da espessura t eram substituídos na fórmula (2.1) até ser obtida a deflexão de projeto.

Admitiu-se a hipótese da deflexão de projeto, ou deflexão tolerável, relacionar-se com o tráfego futuro previsto na rodovia restaurada de acordo com o gráfico apresentado por KINGHAM¹, e que pode ser expresso pela equação:

$$\log d = 2,07 - 0,24 \log NTP \quad (2.3)$$

Nesta equação, d é a deflexão de projeto e NTP é o "número de tráfego de projeto" (Design Traffic Number), definido como o número de aplicações diárias de cargas equivalentes ao eixo de 8,2 t (18 000 libras), previstas na pista de projeto durante o período de projeto. O valor adotado para este foi de 20 anos⁴.

As deflexões determinadas com a viga Benkelman em cada trecho do pavimento existente são utilizadas no cálculo da "deflexão representativa", definida como a média das deflexões medidas (ajustadas para uma temperatura de referência e valores críticos durante o ano) mais dois desvios padrões (KINGHAM¹).

2.3 - MÉTODO DA "ROADS AND TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA"

O método adotado por esta Associação Canadense (antiga Canadian Good Roads Association) admite que pavimentos flexíveis, com capacidade de suporte inadequada, podem ser reabilitados por meio de um recapeamento de espessura suficiente para reduzir as deflexões a um nível aceitável que assegurará capacidade de suporte adequada⁵.

As curvas de dimensionamento apresentadas pela RTAC⁵ fornecem a espessura adicional, expressa em polegadas de base granular, exigida para reduzir a deflexão representativa de um trecho de pavimento existente a valores de 0,020, 0,030, 0,040

e 0,050 polegadas. A espessura de base granular é convertida em espessura de concreto asfáltico considerando 1 polegada deste igual a 2 polegadas daquela.

As curvas de dimensionamento deste método foram determinadas através da equação (WILKINS e CAMPBELL)⁶

$$T = K \log \frac{P}{S} \quad (2.4)$$

onde os símbolos representam:

T = espessura do recapeamento, em termos de base granular

K = constante característica da base granular, considerada igual a 35

P = carga em uma placa de 12 polegadas de diâmetro capaz de produzir uma deflexão de 0,2 polegadas na superfície da camada de base granular

S = carga em uma placa de 12 polegadas de diâmetro capaz de produzir uma deflexão de 0,2 polegadas na superfície do pavimento existente

As cargas P e S são supostas relacionadas com as deflexões representativa e de projeto respectivamente pelas fórmulas (McLEOD⁷, 1956; WILKINS e CAMPBELL⁶, 1963):

$$P = \frac{0,287}{(d-0,009)^{1,075}} + 3,66 \quad (2.5)$$

$$S = \frac{0,287}{(d_0-0,009)^{1,075}} + 3,66 \quad (2.6)$$

onde:

d = deflexão de projeto ou deflexão tolerável em polegadas

d_o = deflexão representativa do pavimento existente em polegadas

A RTAC não apresenta uma relação matemática relacionando a deflexão de projeto ao tráfego previsto na estrada, como faz o Instituto do Asfalto (Equação 2.3), mas recomenda que pavimentos flexíveis, que suportarão durante 10 anos volumes diários médios iguais ou superiores a 1 000 veículos, tenham deflexão de projeto entre 0,030 e 0,050 polegadas, conforme discutido nas páginas 12 a 25 da Referência 5.

2.4 - MÉTODO DO ENGENHEIRO CELESTINO RUIZ

O método de dimensionamento de recapeamentos de pavimentos flexíveis, apresentado pelo engenheiro argentino Celestino Ruiz, baseia-se na hipótese empírica de que o decréscimo infinitesimal da deflexão produzido por uma espessura infinitesimal de reforço é proporcional à espessura deste e à deflexão do pavimento no instante de receber a camada de reforço, de acordo com a equação (RUIZ, 1964)⁸:

$$dD = - \frac{1}{R} D dh \quad (2.7)$$

onde:

dD = decréscimo infinitesimal da deflexão

dh = espessura infinitesimal de reforço

D = deflexão do pavimento sem o reforço dh

R = constante característica do material de reforço, chamada "aporte estrutural". Para o concreto asfáltico, por exemplo, é sugerido o valor médio R = 12cm

Integrando a equação (2.7) obtém-se:

$$\int_{D_0}^D \frac{dD}{D} = - \frac{1}{R} \int_0^H dh$$

$$\text{ou } H = R \ln \frac{D_0}{D}$$

Utilizando logaritmos decimais:

$$H = \frac{R}{0,434} \log \frac{D_0}{D} \quad (2.8)$$

onde:

H = espessura do recapeamento

D₀ = deflexão representativa do pavimento existente

D = deflexão de projeto

Assim como a RTAC⁵, o autor deste método não apresenta uma relação que permita calcular a deflexão de projeto em função do tráfego previsto no pavimento restaurado, recomendando apenas que as deflexões limites aceitáveis sejam da ordem de 0,050 a 0,070cm (RUIZ, 1964)⁸.

2.5 - COMENTÁRIOS SOBRE OS MÉTODOS APRESENTADOS

Dos três métodos discutidos sucintamente neste capítulo

observamos que apenas o primeiro apresenta um procedimento racional para o cálculo da espessura do recapeamento, baseando-se na fórmula aproximada apresentada por KIRK², e que teve origem na teoria de BURMISTER⁹ para um sistema de duas camadas. As equações de dimensionamento dos dois últimos métodos, embora tenham sido submetidas a verificações experimentais, são de origem empírica (WILKINS⁶ e CAMPBELL, 1963; RUIZ⁸, 1964).

Quanto às condições do carregamento, nem mesmo o método adotado pelo Instituto do Asfalto leva em consideração a geometria da roda dupla utilizada no ensaio de determinação das deflexões com a viga Benkelman, pois que a fórmula (2.1) utilizada só se aplica à deflexão produzida no centro de uma carga circular, levando o autor do método (KINGHAM)¹ a admitir uma carga circular única equivalente à roda dupla.

Na realidade, não temos conhecimento da existência de um método de projeto que leve em consideração a área e a pressão de contato de cada roda simples que constitui a roda dupla padrão de 9 000 libras. Nos capítulos seguintes será mostrada uma sequência em que se procurou levar em conta aquelas características.

CAPÍTULO 3

APLICAÇÃO DA TEORIA DA ELASTICIDADE AO CÁLCULO DAS DEFLEXÕES DOS PAVIMENTOS

3.1 - INTRODUÇÃO

Trabalhos apresentados por MONISMITH¹⁰, COFFMAN¹¹, DORMAN¹², KIRK¹³ e KALLAS¹⁴ na "Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements" mostraram que a teoria da elasticidade pode ser usada na previsão das deflexões dos pavimentos.

Em síntese, a aplicabilidade da teoria da elasticidade é baseada no fato de que, após um certo número de aplicações de cargas, as deflexões de um pavimento flexível são essencialmente elásticas, no sentido de que elas são quase completamente recuperáveis (WHIFFIN¹⁵ e LISTER, 1962; HUANG¹⁶, 1969).

Nos itens seguintes apresentaremos resultados conhecidos da teoria da elasticidade aplicada a um semi-espaço infinito e a um sistema elástico de duas camadas, com vistas à sua utilização no desenvolvimento do nosso estudo.

3.2 - DEFLEXÕES NA SUPERFÍCIE DE UM SEMI-ESPAÇO INFINITO

Admitidas as hipóteses de BOUSSINESQ³, a deflexão produzida na superfície de um sólido semi-infinito por uma carga uniformemente distribuída em um círculo de raio a , a uma dis-

tância r do centro do círculo (ponto 0 da fig. 3.1) é dada pela fórmula (TIMOSHENKO¹⁷ e GOODIER):

$$w_0 = \frac{4(1-\nu^2)qr}{\pi E} \left[\int_0^{\pi/2} \sqrt{1-(a^2/r^2)\text{sen}^2\theta} \, d\theta - (1-a^2/r^2) \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-(a^2/r^2)\text{sen}^2\theta}} \right] \quad (3.1)$$

onde:

w_0 = deflexão na superfície do semi-sólido uniforme

ν = coeficiente de Poisson

q = pressão de contato

E = módulo de elasticidade ou módulo Young

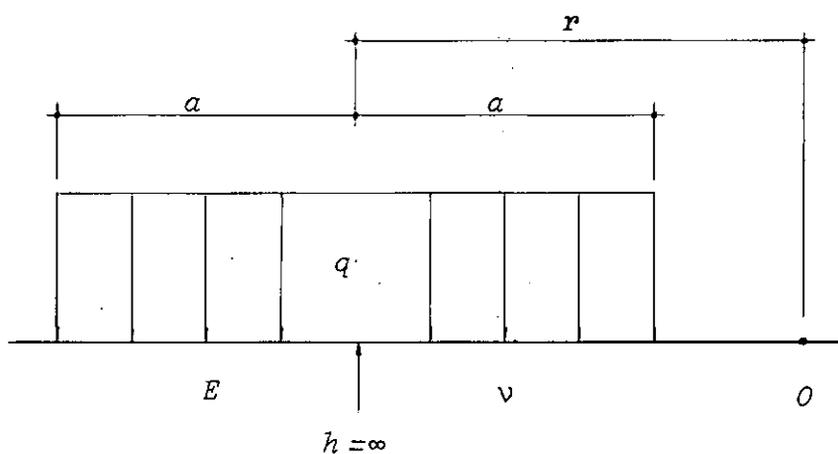


Figura 3.1 - Condições admitidas na Equação 3.1.

As integrais na equação (3.1) são conhecidas como integrais elípticas completas de 1a. e 2a. espécies e podem ser assim representadas:

(i) integral elíptica completa de 1a. espécie:

$$K(m) = \int_0^{\pi/2} (1-m \operatorname{sen}^2 \theta)^{-1/2} d\theta \quad (3.2)$$

(ii) integral elíptica completa de 2a. espécie:

$$E(m) = \int_0^{\pi/2} (1-m \operatorname{sen}^2 \theta)^{+1/2} d\theta \quad (3.3)$$

Nestas expressões $m = a^2/r^2$. Em termos de $K(m)$ e $E(m)$ a equação (3.1) se reduz a:

$$w_0 = \frac{4(1-v^2)qr}{\pi E} \{E(m) - (1-m) K(m)\} \quad (3.4)$$

As funções $E(m)$ e $K(m)$ estão tabeladas para diversos valores de m e são apresentadas, por exemplo, por ABRAMOWITZ¹⁸ e SEGUN.

3.3 - DEFLEXÕES NA SUPERFÍCIE DE UM SISTEMA ELÁSTICO DE DUAS CAMADAS

Considerando as condições de contorno e de continuidade da teoria de BURMISTER⁹, HUANG¹⁶ apresenta uma relação matemática que permite calcular a deflexão na superfície de um sistema de duas camadas, produzida por uma carga circular. Supõem-se - que as camadas se encontram em contato contínuo, havendo continuidade nas tensões verticais, tensões de cisalhamento, deflexões verticais e deflexões radiais. Não há tensões normais atuando na superfície fora da área carregada nem tensões de cisalhamento em qualquer ponto da superfície. O módulo de Poisson é suposto 0,5 para as duas camadas.

A deflexão do ponto 0 da figura 3.2 é dada pela fórmula (HUANG, 1967)¹⁹:

$$w = a/2 \int_0^{\infty} J_0(m\rho) J_1(m\alpha) \frac{V_0}{m} dm \quad (3.5)$$

onde:

$$\rho = r/h \quad (3.6)$$

$$\alpha = a/h \quad (3.7)$$

$$V_0 = \frac{q(1+4Nme^{-2m}-N^2e^{-4m})}{(G)_1\{1-2N(1+2m^2)e^{-2m}+N^2e^{-4m}\}} \quad (3.8)$$

$$N = \frac{(G)_1 - (G)_2}{(G)_1 + (G)_2}$$

$(G)_1$ = módulo de deformação cisalhante da camada 1

$(G)_2$ = módulo de deformação cisalhante da camada 2

Substituindo (3.6), (3.7) e (3.8) em (3.5) obtém-se:

$$w = \frac{qa}{2(G)_1} \int_0^{\infty} J_0(m r/h) J_1(m a/h) \left[\frac{1+4Nme^{-2m} - N^2e^{-4m}}{1-2N(1+2m^2)e^{-2m} + N^2e^{-4m}} \right] \frac{dm}{m}$$

(Equação 3.10)

O módulo $(G)_1$ pode ser expresso em função do módulo de elasticidade E_1 por (HARR, 1966)²⁰

$$(G)_1 = \frac{E_1}{2(1+\nu)} \quad (3.11)$$

Substituindo (3.11) em (3.10) e fazendo $\nu = 0,5$:

$$w = \frac{1,5qa}{E_1} \int_0^{\infty} J_0(m r/h) J_1(m a/h)$$

$$\left[\frac{1+4Nme^{-2m} - N^2e^{-4m}}{1-2N(1+2m^2)e^{-2m} + N^2e^{-4m}} \right] \frac{dm}{m} \quad (3.12)$$

onde:

w = deflexão na superfície do sistema de duas camadas

$$N = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2}$$

E_1 = módulo de elasticidade da camada 1

E_2 = módulo de elasticidade da camada 2

r = distância radial do centro da área carregada ao ponto de determinação da deflexão (Figura 3.2)

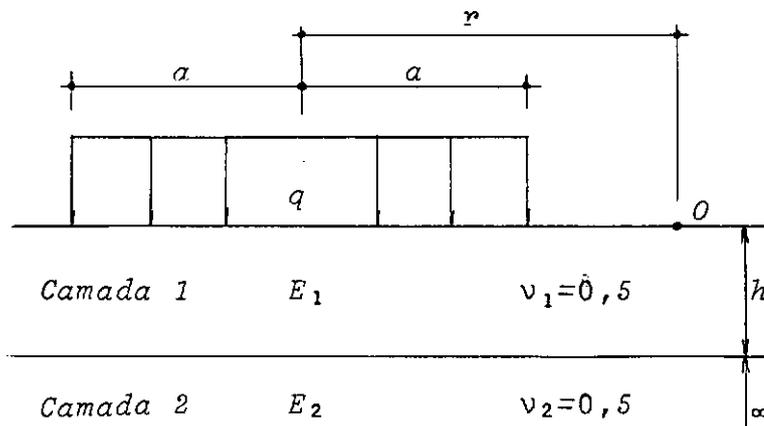
a = raio da área carregada

h = espessura da camada 1

J_0 = função de Bessel de 1ª. espécie, ordem 0

J_1 = função de Bessel de 1ª. espécie, ordem 1

m = um parâmetro



O cálculo da deflexão w será feito neste trabalho avaliando a integral imprópria da equação (3.12) por um método numérico programado para um computador IBM 360, que será exposto com detalhes no capítulo 4.

CAPÍTULO 4

EXTENSÃO DO CÁLCULO DAS DEFLEXÕES AO DIMENSIONAMENTO DE RECAPEAMENTOS

4.1 - INTRODUÇÃO

A evidência da correlação deflexão - comportamento nos pavimentos flexíveis surgiu nos ensaios da WASHO, AASHO e do RRL e foi uma das principais conclusões de um estudo extenso realizado pela Canadian Good Roads Association (KINGHAM¹; GGRA^{2 1}).

Para um dado material, quanto maior a deflexão do pavimento mais curta será a vida deste. A máxima deflexão tolerável, ou deflexão admissível, pode ser determinada em função do tráfego previsto na estrada, após o seu recapeamento. Conhecendo-se a deflexão representativa do pavimento existente, determinar-se-á, fazendo uso das aplicações da teoria da elasticidade, o valor da espessura adicional de concreto asfáltico que reduzirá as deflexões ao nível tolerável.

4.2 - RELAÇÃO TRÁFEGO - DEFLEXÃO TOLERÁVEL

A partir de dados sobre o tráfego de uma rodovia pode-se calcular o número de tráfego de projeto, conforme definido no item 2.2. A Referência 22, por exemplo, apresenta uma análise detalhada dos volumes de trânsito visando calcular o número de tráfego de projeto (NTP). Conhecido o NTP, torna-se necessário

calcular o valor correspondente da deflexão tolerável, que será utilizado nas fórmulas da teoria da elasticidade. Tal cálculo poderá ser feito de acordo com o critério exposto a seguir.

Resultou do famoso ensaio da AASHO²³, a seguinte relação que permite estimar de maneira satisfatória o número de aplicações de cargas que um pavimento pode suportar até o índice de serventia atual atingir o valor $p = 2,5$:

$$\log W_{2,5} = 9,40 + 1,32 \log L_1 - 3,25 \log d \quad (4.1)$$

onde:

$W_{2,5}$ = número de aplicações da carga de eixo L_1 suportadas pelo pavimento até o índice de serventia atual atingir o valor $p = 2,5$

L_1 = carga de eixo simples em 1000 libras

d = deflexão em milésimos de polegada medida sob uma carga de roda dupla igual a $L_1/2$

Adotando-se a carga por eixo de 18 000 libras, que foi uma das cargas - padrão utilizadas no ensaio da AASHO, temos $L_1 = 18$ e a equação (4.1) poderá ser escrita:

$$\log W_{2,5} = 11,06 - 3,25 \log d \quad (4.2)$$

Se adotarmos um período de projeto de 20 anos, $W_{2,5}$ será relacionado com o número de tráfego de projeto pela fórmula:

$$W_{2,5} = 20 \times 365 \times NTP \quad (4.3)$$

Substituindo (4.3) em (4.2) e efetuando:

$$\log NTP = 7,20 - 3,25 \log d \quad (4.4)$$

Resolvendo em relação a d , temos:

$$\log d = 2,22 - 0,308 \log NTP \quad (4.5)$$

Com auxílio da equação (4.5) pôde-se organizar a tabela 4.1 relacionando a deflexão admissível ao tráfego previsto na estrada após o recapeamento.

NTP	DEFLEXÃO DE PROJETO	
	CM	POL
2	0,343	0,135
5	0,254	0,100
10	0,206	0,081
20	0,168	0,066
50	0,127	0,050
100	0,102	0,040
200	0,081	0,032
500	0,064	0,025
1000	0,051	0,020

Tabela 4.1 - Relação entre o número de tráfego de projeto e a correspondente deflexão tolerável.

4.3 - RELAÇÃO ENTRE A ESPESSURA DO RECAPEAMENTO E AS DEFLEXÕES REPRESENTATIVA E TOLERÁVEL

4.3.1 - Determinação experimental das características da roda dupla de 9 000 libras

Para que a equação (3.12) possa ser utilizada no dimensionamento de recapeamentos, torna-se necessário determinar os valores experimentais de "r", "a" e "q" para a roda dupla usada no ensaio de medições das deflexões com a viga Benkelman. Com este objetivo, carregou-se um caminhão com 8,2t (18 000 libras) no eixo traseiro, equipado com pneus 9.00 x 20 relativamente novos, com câmara de ar inflada a 80 libras por polegada quadrada. A carga de 8,2t ficou uniformemente distribuída entre as rodas duplas. Obteve-se a área de contato dos pneus com o pavimento através do seguinte procedimento:

a) Levou-se o caminhão carregado para um trecho em nível de pavimento asfáltico de boa qualidade, escoraram-se as rodas dianteiras e levantou-se o eixo traseiro com auxílio de dois macacos simultaneamente um de cada lado.

b) Os quatro pneus das duas rodas duplas foram pintados na sua parte inferior com uma mistura de óleo lubrificante e tinta de escrever.

c) Foram colocadas na superfície do pavimento duas folhas de papel, uma sob cada roda dupla, de tamanho aproximado de 80cm x 60cm.

d) Os dois macacos foram arriados lenta e simultaneamente, de modo que as duas rodas duplas entrassem em contato com as folhas de papel ao mesmo tempo, e fossem recebendo acréscimos iguais de carga.

e) Uma vez recebida a carga total pelas duas rodas duplas, os macacos foram acionados novamente e as marcas das áreas de contato ficaram nitidamente impressas nas folhas de papel.

A experiência citada foi repetida diversas vezes e as características adotadas são a média aritmética dos resultados consistentes obtidos em três determinações. As áreas das marcas dos pneus foram calculadas com auxílio de um planímetro, obtendo-se o seguinte resultado:

$$S = 407,1\text{cm}^2$$

Conhecida a área de contato de cada roda simples, a pressão de contato, razão entre a carga total e a área em que se distribui, pode ser calculada pela expressão:

$$q = \frac{P}{4S} \quad (4.6)$$

$$q = \frac{8\,200}{4 \times 407,1} = 5,036 \text{ kg/cm}^2$$

ou

$$q = 71,6 \text{ lb/pol}^2$$

Observa-se que, sendo a pressão de inflação dos pneus igual a 80 lb/pol^2 , esta é ligeiramente superior à pressão de contato obtida.

Admitindo ser circular a área de contato entre cada roda e o pavimento, o raio de contato é dado pela expressão (YODER, 1959)²⁴:

$$a = \sqrt{P/q} \quad (4.7)$$

onde:

$P = 2050 \text{ kg} =$ carga na roda

$q = 5,036 \text{ kg/cm}^2 =$ pressão de contato

$a =$ raio de contato

Portanto: $a = 11,38 \text{ cm}$

O espaçamento entre os centros das duas rodas que formam a roda dupla foi obtido também das marcas dos pneus nas folhas de papel: $2r = 28,8 \text{ cm}$. A distância do centro da área carrega-

da ao ponto em que se coloca a ponta de prova da viga Benkelman \bar{e} , portanto, $r=14,4\text{cm}$, conforme Figura 4.1.

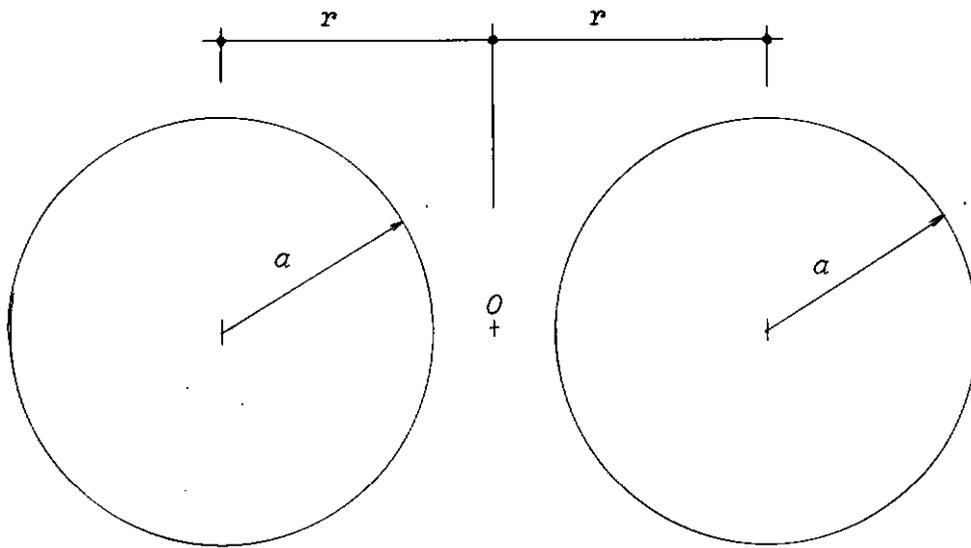


Figura 4.1 - A área de contato admitida entre o pavimento e a roda dupla padrão.

Em resumo, temos os seguintes valores a serem utilizados no dimensionamento de recapeamentos através da equação (3.12):

$$q = 5,036 \text{ kg/cm}^2$$

$$r = 14,4\text{cm}$$

$$a = 11,38\text{cm}$$

4.3.2 - O módulo efetivo do pavimento existente

Admitir-se-á que o conjunto formado pelo pavimento existente e o subleito tenha um módulo efetivo (ou equivalente) E_2

relacionado com a deflexão representativa pela teoria de Boussinesq (Equação 3.4), hipótese já feita por diversos pesquisadores (KINGHAM¹, 1970; SOUTHGATE^{2,5} e DEEN, 1969).

O valor de m da equação (3.4) pode ser obtido a partir dos valores experimentais $a = 11,38\text{cm}$ e $r = 14,40\text{cm}$:

$$m = \frac{a^2}{r^2}$$

$$m = 0,624$$

logo:

$$w_0 = \frac{4(1-\nu^2)qr}{\sqrt{E_2}} \left[E(0,624) - (1-0,624) K(0,624) \right] \quad (4.8)$$

Os valores numéricos das integrais elípticas completas da equação (4.8) podem ser obtidos, por exemplo, na Tabela 17.1 da Referência 18:

$$E(0,624) = 1,28526$$

$$K(0,624) = 1,97642$$

Substituindo estes valores na equação (4.8) e efetuando:

$$w_0 = 0,54213 \frac{4(1-\nu^2)qr}{\sqrt{E_2}} \quad (4.9)$$

Fazendo-se $q = 5,036\text{kg/cm}^2$, $r = 14,40\text{cm}$ e $\nu = 0,5$ (parâmetro discutido no item 4.3.3), obtêm-se:

$$w_0 = \frac{37,542}{E_2} \quad (4.10)$$

Observa-se que esta expressão poderia ter sido obtida com maior facilidade, porém com menor precisão, com auxílio dos gráficos apresentados por FOSTER²⁶ e AHLVIN. A equação (4.10) fornece a deflexão produzida por uma das rodas. A deflexão total no centro da roda dupla, pelo princípio da superposição e simetria do carregamento, é o dobro desse valor:

$$d_0 = 2 w_0$$

$$d_0 = \frac{75,084}{E_2} \quad (4.11)$$

onde d_0 é a deflexão na superfície do pavimento existente, ou a deflexão representativa deste.

Uma vez obtido o valor de d_0 através de determinações no campo, em cada trecho relativamente homogêneo do pavimento a ser recapeado, o módulo efetivo deste pode ser calculado pela equação (4.11) .:

$$E_2 = \frac{75,084}{d_0} \quad (4.12)$$

A tabela 4.2 foi elaborada através da equação (4.12).

DEFLEXÃO REPRESENTATIVA	MÓDULO EFETIVO
cm	kg/cm ²
0,050	1502
0,075	1001
0,100	751
0,125	601
0,150	501
0,175	429
0,200	375
0,225	334
0,250	300
0,275	273
0,300	250
0,325	231
0,350	215

Tabela 4.2 - Relação entre a deflexão representativa de um pavimento e o correspondente módulo efetivo.

4.3.3 - Considerações sobre o coeficiente de Poisson

O coeficiente ou módulo de Poisson, que é a razão entre a deformação normal à tensão aplicada e a deformação na dire-

ção da tensão aplicada, tem valores variando de 0 a 0,5 nos materiais elásticos. Para um material que não sofre variações de volume durante a deformação, o valor é 0,5.

Para um revestimento asfáltico, estudos de laboratório (JEUFFROY²⁷, 1967) mostraram um valor muito próximo de 0,5 para o módulo de Poisson: entre 7°C e 140°C este módulo variou de 0,485 a 0,495.

Neste trabalho será adotado, tanto para o pavimento existente quanto para o recapeamento, $\nu = 0,5$, que é o valor provável do módulo de Poisson para um pavimento flexível, após um certo período em que é submetido ao tráfego (YODER²⁷, 1962).

4.3.4 - Considerações sobre o módulo de elasticidade do recapeamento

Visando a utilização da teoria da elasticidade aplicada a um sistema de duas camadas, no dimensionamento de recapeamentos, resta ainda determinar o valor do módulo de elasticidade da primeira camada (recapeamento) a ser usado nos cálculos.

Não há geralmente acordo sobre o que são valores razoáveis dos módulos de elasticidade para as diversas camadas de um pavimento asfáltico (SHOOK e FINN, 1962)²⁹. Entretanto, através de ensaios de laboratório (KINGHAM, 1970)¹ realizados

em amostras cilíndricas de concreto asfáltico, a 70°F ($21,1^{\circ}\text{C}$) e com uma frequência de 1 ciclo por segundo, foi encontrado um valor típico $E_1 = 500\ 000\ \text{lb/pol}^2$ ($35150\ \text{kg/cm}^2$) para o módulo de elasticidade.

Neste trabalho será apresentado um gráfico para o dimensionamento de recapeamentos considerando $E_1 = 500\ 000\ \text{lb/pol}^2$.

O valor mais fidedigno do módulo de elasticidade a ser usado no projeto pode ser obtido através de um cálculo reiterativo conhecendo-se, em um trecho experimental, a deflexão representativa do pavimento existente, a espessura do recapeamento e a deflexão representativa do trecho depois de recapeado. Conhecer-se-iam, na equação (3.12), os valores de w , q , a , r , h e E_2 e arbitrando-se diferentes valores para E_1/E_2 , encontrar-se-ia o valor mais conveniente para E_1 .

4.3.5 - Cálculo da espessura do recapeamento

Admitida a hipótese feita no item 4.3.2, a fórmula (3.12) pode ser usada na determinação da espessura exigida para um recapeamento asfáltico. A deflexão do pavimento recapeado (ou a deflexão de projeto) será $d = 2w$ pelo princípio da superposição e simetria do carregamento em relação ao centro da roda da pla. O símbolo "h" torna-se a espessura do recapeamento de concreto asfáltico, " E_1 " o módulo de elasticidade deste e " E_2 " o módulo efetivo do pavimento existente. A deflexão d será, por-

tanto, expressa por:

$$d = 2w$$

ou

$$d = \frac{3qa}{E_1} \int_0^{\infty} (m r/h) J_1 (m a/h) \left[\frac{1+4Nme^{-2m} - N^2 e^{-4m}}{1-2N(1+2m^2)e^{-2m} + N^2 e^{-4m}} \right] \frac{dm}{m}$$

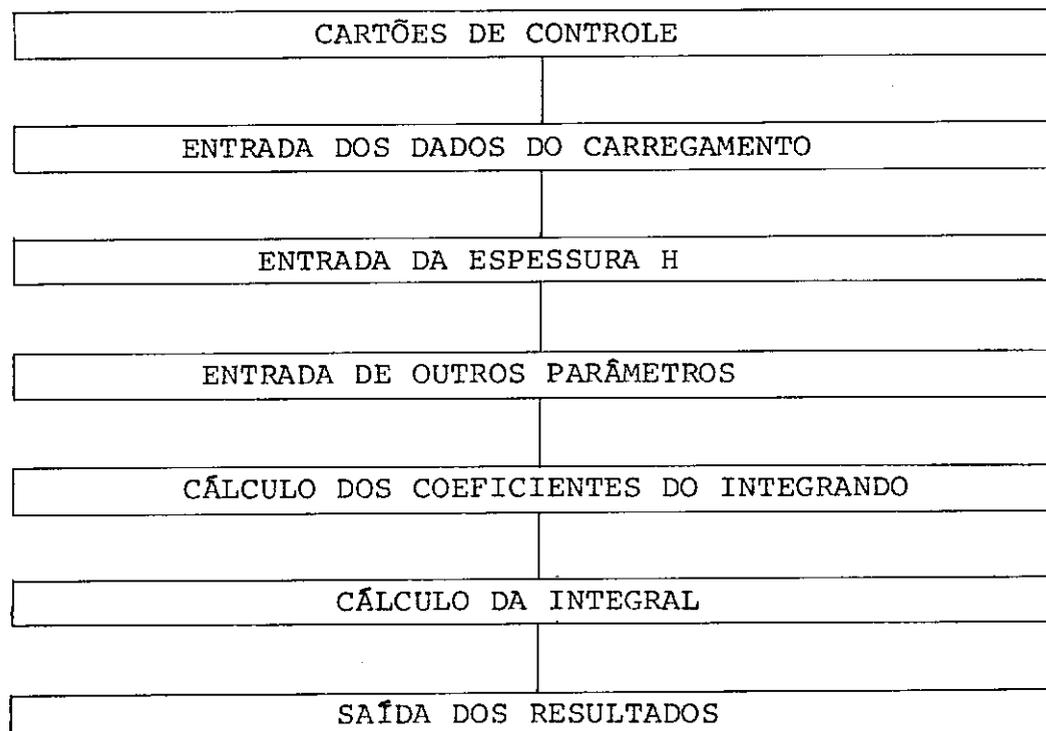
Equação 4.13

Conforme foi exposto detalhadamente nos itens anteriores, podem ser considerados conhecidos na equação (4.13) os valores de "d", "q", "a", "E₁", "E₂" e "r". A espessura do recapeamento exigida por um pavimento de módulo efetivo E₂ será, portanto, o valor de "h" que, substituído em (4.13), forneça o valor de "d" considerado admissível para a rodovia restaurada, determinado em função do tráfego previsto pela equação (4.5). Um programa automático em linguagem Fortran para o cálculo da integral imprópria da equação (4.13), utilizado na elaboração das curvas de dimensionamento da figura (4.2) é exposto no item seguinte.

4.4 - PROGRAMA AUTOMÁTICO EM LINGUAGEM FORTRAN PARA O CÁLCULO DAS DEFLEXÕES

A dificuldade prática que se apresenta na resolução da equação (4.13) é a avaliação numérica da integral imprópria que figura nela. Para o cálculo desta integral elaboramos um programa em Linguagem Fortran, para um computador IBM 360, que, em

síntese, consta das seguintes partes:



As principais variáveis utilizadas neste programa são as seguintes:

- R.....Distância radial do centro da área carregada ao ponto em que se deseja determinar a deflexão.
- A.....Raio da área carregada
- H.....Espessura do recapeamento
- NM.....Número de pontos em que será calculada a função integranda.

RE.....	Razão entre o módulo de elasticidade do recapeamento e o módulo efetivo do pavimento existente
NR.....	Número de diferentes valores de RE
XM.....	Parâmetro m da equação (4.13)
DX.....	Diferença entre dois valores consecutivos de m
FM1.....	Expressão $J_0(m r/h)$ da equação (4.13)
FM2.....	Expressão $J_1(m a/h)$ da equação (4.13)
UME.....	Expressão $1+4Nme^{-2m} - N^2e^{-4m}$ da equação (4.13)
DEN.....	Expressão $1-2N(1+2m^2)e^{-2m} + N^2e^{-4m}$ da equação (4.13)
GM.....	Valor da integral imprópria da equação (4.13)

A ordem de entrada das variáveis que definem os dados e seus respectivos formatos de leitura podem ser facilmente obtidos através da listagem do programa. As unidades das variáveis de entrada poderão ser expressas em um sistema de unidades qualquer. Para que o valor da integral seja dado com três algarismos significativos pode-se fazer $DX = 0,001$ e $NM = 5\ 000$. Neste caso, o tempo médio de computação para cada valor da integral é de 6,0 minutos.

Quanto à saída dos resultados, mandamos imprimir as características do carregamento e a relação entre o módulo de elasticidade do recapeamento e o módulo efetivo do antigo pavimento como se poderá comprovar pela listagem, cuja transcrição apre-

sentamos a seguir:

```

DIMENSION XM(5001),FM(5001),GM(5001)
READ(8,5)R,A,H,DX,NM,NR
* 5 FORMAT(4F10.5,2I5)
DO 300 NK=1,NR
READ(8,10)RE
10 FORMAT(F10.5)
XN=(RE-1.)/(RE+1.)
WRITE(5,16)
16 FORMAT(15X,82('*'),/15X,'NUMERO DO PROBLEMA',5X,'PARA
METRO N',5X,'
1PARAMETRO R',5X,'PARAMETRO A',5X,'PARAMETRO H',5X,'RA
ZÃO E1/E2',/)
WRITE(5,17)NK,XN,R,A,H,RE
17 FORMAT(15X,I9,14X,5(F11.5,5X),//)
C CALCULO DOS COEFICIENTES DO INTEGRANDO
ALF=R/H
BET=A/H
FM(I)=RE*A/2./H
XM(1)=0.
DO 40 I=2,NM
XM(I)=(I-1)*DX
IF(XM(I)-20.)25,20,20
20 FM3=1.
GO TO 30

```

```
25 EM2=EXP (-2.*XM(I))
    EM4=EXP (-4.*XM(I))
    UME=1.+4*XN*XM(I)*EM2-EM4*XN**2
    DEN=1.-2*XN*(1+2.*XM(I)**2)*EM2+EM4*XN**2
    FM3=UME/DEN
30 ALFA=XM(I)*ALF
    BETA=XM(I)*BET
    CALL BESJ(ALFA,0,BJ,1.0E-4,IER)
    FM1=BJ
    CALL BESJ(BETA,1,BJ,1.0E-4,IER)
    FM2=BJ
    FM(I)=FM1*FM2*FM3/XM(I)
40 CONTINUE
    CALL QSF(DX,FM,GM,NM)
    NTT=1
    DO 50 I=NTT,NM,500
        WRITE(5,45)I, XM(I), FM(I), GM(I)
45 FORMAT(I6,2X,F6.2,2X,2(F10.7,2X))
50 CONTINUE
    WRITE(5,55)GM(NM)
55 FORMAT(//,109('*'),/15X,'VALOR DA INTEGRAL',/22X,F10.
        4)
300 CONTINUE
    CALL EXIT
    END
```

Como pode ser observado na listagem, o programa calcula automaticamente o valor da função integranda da equação (4.13) para quaisquer valores da variável "m", com exceção do correspondente a $m=0$. Neste ponto apareceria uma divisão por zero e o computador daria mensagem de erro. Esta pequena dificuldade foi superada determinando-se o limite daquela função integranda quando "m" tende a zero, como exporemos a seguir.

Façamos, na equação (4.13):

$$f(m) = J_0(m r/h) \left[\frac{J_1(m a/h)}{m} \right] \left[\frac{1+4Nme^{-2m}-N^2e^{-4m}}{1-2N(1+2m^2)e^{-2m}+N^2e^{-4m}} \right]$$

(Equação 4.14)

$$f_1(m) = J_0(m r/h) \quad (4.15)$$

$$f_2(m) = \frac{J_1(m a/h)}{m} \quad (4.16)$$

$$f_3(m) = \frac{1+4Nme^{-2m}-N^2e^{-4m}}{1-2N(1+2m^2)e^{-2m}+N^2e^{-4m}} \quad (4.17)$$

O valor de $f(0)$ poderá ser calculado por:

$$f(0) = \lim_{m \rightarrow 0} f(m) \quad (4.18)$$

Então, aplicando propriedade elementar de limites:

$$f(0) = \lim_{m \rightarrow 0} f_1(m) \cdot \lim_{m \rightarrow 0} f_2(m) \cdot \lim_{m \rightarrow 0} f_3(m) \quad (4.19)$$

Calculemos separadamente os três limites indicados na equação (4.19):

$$(i) \lim_{m \rightarrow 0} f_1(m) = J_0(0) = 1 \quad (4.20)$$

$$(ii) \text{ Como } J_1(x) = (x/2) \left\{ 1 - \frac{1}{1!2!} (x/2)^2 + \frac{1}{2!3!} (x/2)^4 - \dots \right\}, \text{ te-}$$

mos:

$$f_2(m) = a/2h \left\{ 1 - \frac{1}{1!2!} (m a/2h)^2 + \frac{1}{2!3!} (m a/2h)^4 - \dots \right\}$$

Logo:

$$\lim_{m \rightarrow 0} f_2(m) = a/2h \quad (4.21)$$

$$(iii) \lim_{m \rightarrow 0} f_3(m) = \frac{1-N^2}{1-2N+N^2} = \frac{1+N}{1-N}$$

$$\text{Do item 3.3: } N = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2}$$

Logo:

$$\lim_{m \rightarrow 0} f_3(m) = \frac{E_1}{E_2} \quad (4.22)$$

Substituindo (4.20) a (4.22) em (4.19):

$$f(0) = a/2h \cdot E_1/E_2$$

Este resultado foi inserido no programa através da seguinte declaração:

$$FM(1) = RE \cdot A / 2 \cdot / H$$

Na tabela 4.3 mostramos os resultados obtidos para a integral considerando diversos valores da razão E_1/E_2 e da espessura "h" em centímetros.

4.5 - GRÁFICO PARA O DIMENSIONAMENTO DE RECAPEAMENTOS

Com os valores numéricos apresentados na tabela 4.3 organizamos um gráfico, constante da figura 4.2, que pode ser facilmente utilizado na determinação da espessura de recapeamentos.

Entra-se no gráfico com a deflexão representativa do pavimento existente, em centímetros (eixo horizontal), e desloca-se verticalmente até a curva correspondente à deflexão de projeto, determinada em função do tráfego previsto na rodovia (Equação 4.5). Em seguida, desloca-se horizontalmente até a escala verti

E_1/E_2	$h=5,0$	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	25,0
2,5	1,14	1,13	1,10	1,06	1,01	0,97	0,95	0,91
5,0	2,33	2,24	2,09	1,94	1,80	1,68	1,58	1,44
7,5	2,50	3,28	2,99	2,73	2,49	2,29	2,13	1,90
10	4,65	4,27	3,84	3,46	3,12	2,85	2,63	2,30
15	6,88	6,15	5,40	4,78	4,26	3,85	3,52	3,03
20	9,03	7,90	6,84	5,98	5,29	4,75	4,32	3,67
25	11,11	9,55	8,18	7,10	6,25	5,58	5,05	4,27
30	13,13	11,13	9,45	8,16	7,14	6,36	5,47	4,82
40	16,99	14,12	11,83	10,12	8,81	7,80	7,01	5,85
50	20,68	16,90	14,04	11,94	10,35	9,13	8,18	6,79
60	24,23	19,55	16,11	13,64	11,79	10,37	9,27	7,68
70	27,65	22,09	18,09	15,26	13,15	11,55	10,31	8,51
80	30,96	24,52	19,99	16,79	14,45	12,67	11,30	9,30
95	35,76	28,01	22,70	19,00	16,30	14,28	12,70	10,43
100	37,32	29,14	23,57	19,71	16,89	14,79	13,16	10,80
115	41,88	32,43	26,12	21,77	18,63	16,27	14,47	11,85
130	46,29	35,59	28,56	23,75	20,29	17,70	15,73	12,86
140	49,16	37,65	30,14	25,03	21,36	18,63	16,52	13,51
150	51,98	39,65	31,68	26,28	22,41	19,53	17,32	14,15
160	54,74	41,61	33,19	27,50	23,44	20,41	18,09	14,77

Tabela 4.3

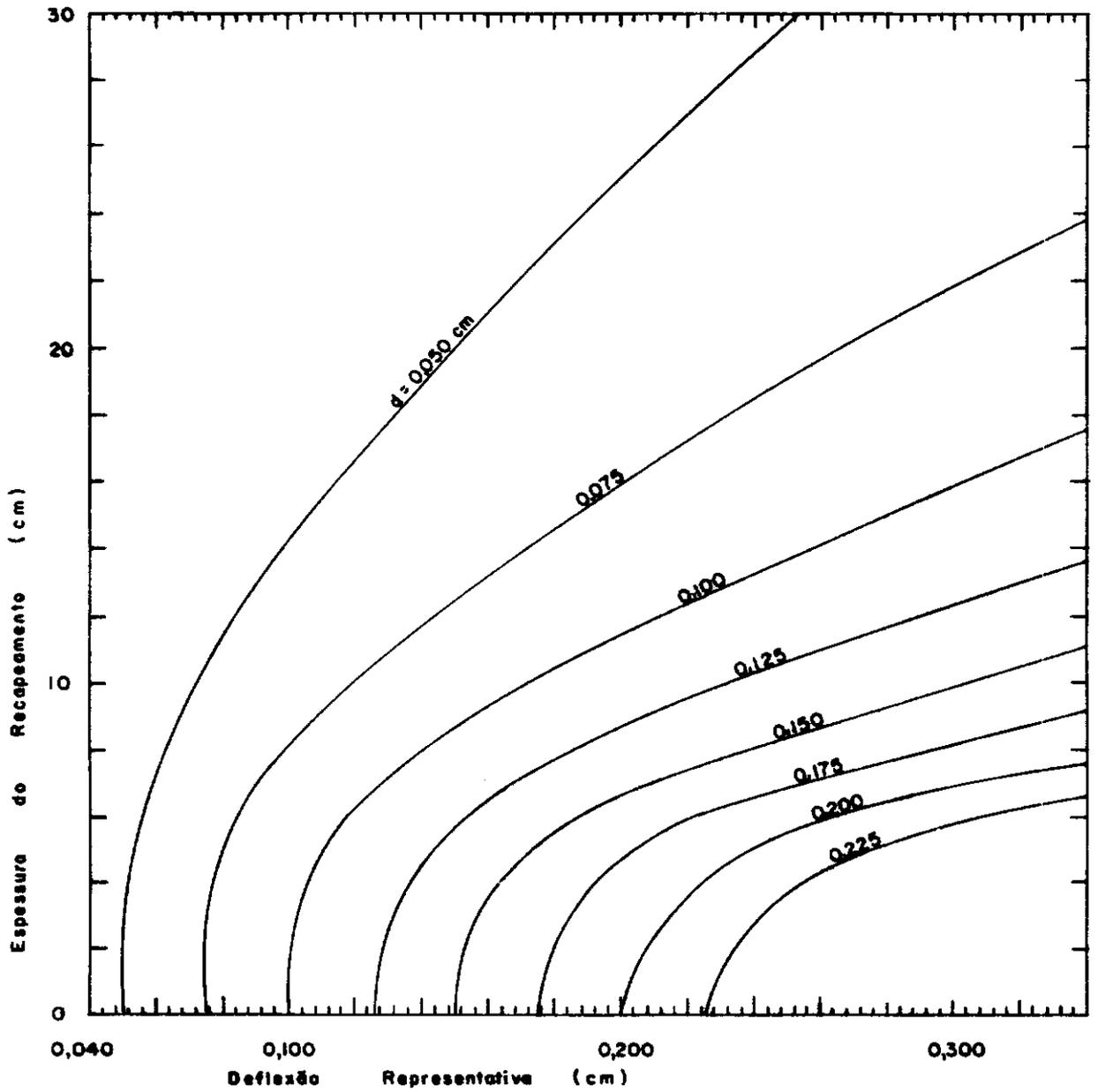


Figura 4.2 - Espessura de revestimento de concreto asfáltico exigida para reduzir a deflexão representativa do pavimento à deflexão de projeto.

cal e lê-se, em centímetros, a espessura exigida para o recapeamento.

Como exemplo, suponhamos que o Número de Tráfego de Projeto obtido para uma dada rodovia seja $NTP = 1000$. Da tabela 4.1 verificamos que a deflexão de projeto a ser utilizada é $d = 0,051\text{cm}$. Se a deflexão representativa do pavimento existente for $0,100\text{cm}$, encontraremos, na figura 4.2, uma espessura de 14cm para o recapeamento.

O gráfico da figura 4.2 foi obtido considerando-se o módulo de elasticidade do recapeamento igual a $500\,000$ libras por polegada quadrada (35150 kg/cm^2). O módulo efetivo do antigo pavimento foi calculado em função da deflexão representativa deste através da equação (4.12).

Conforme observamos no item 4.3.4, pode-se julgar conveniente a utilização de um valor diferente de $500\,000\text{ lb/pol}^2$ para o módulo de elasticidade do concreto asfáltico. Neste caso, os valores constantes da tabela 4.3 auxiliarão no dimensionamento.

CAPÍTULO 5

COMPARAÇÕES COM OS MÉTODOS EXISTENTES

Com o objetivo de compararmos as espessuras de recapeamentos obtidas pelo presente estudo com as espessuras dadas pelos três métodos de dimensionamento descritos no Capítulo 2, organizamos as Tabelas 5.1 e 5.2. Estas tabelas apresentam as espessuras do recapeamento em centímetros de concreto asfáltico calculadas, respectivamente, segundo a "Roads and Transportation Association of Canada", o Método em Estudo no presente trabalho, "The Asphalt Institute" e o método do Eng^o Celestino Ruiz.

A faixa de deflexões representativas apresentadas abrange uma ampla variação de pavimentos flexíveis existentes ($d_0 = 0,050\text{cm}$ a $d_0 = 0,200\text{cm}$).

Os dois valores da deflexão admissível, $d = 0,050\text{cm}$ e $d = 0,100\text{cm}$, escolhidos para a elaboração das Tabelas 5.1 e 5.2 respectivamente, justificam-se pelo fato de que eles correspondem a uma grande variação do Número de Tráfego de Projeto: desde $NTP = 1000$ a $NTP = 100$, aproximadamente, como pode ser verificado através da equação (4.4) ou na Tabela 4.1. Por outro lado, as deflexões admissíveis recomendadas por RUIZ⁸ estão compreendidas entre $0,050\text{cm}$ e $0,070\text{cm}$, portanto, pertencentes ao intervalo cujos extremos são representados pelas Tabelas 5.1 e 5.2.

d_0 (cm)	$d=0,050\text{cm}$			
	RTAC	ME	IA	RUIZ
0,050	00,0	00,0	00,0	00,0
0,075	12,7	10,6	07,1	04,8
0,100	19,0	14,4	10,4	08,2
0,125	22,0	17,4	13,0	11,0
0,150	25,0	20,2	15,2	13,2
0,175	27,0	22,6	16,8	15,0
0,200	29,0	25,0	18,5	16,0

Tabela 5.1

d_0 (cm)	$d=0,100\text{cm}$			
	RTAC	ME	IA	RUIZ
0,100	00,0	00,0	00,0	00,0
0,125	04,8	06,9	05,0	02,5
0,150	07,6	08,6	06,4	04,9
0,175	10,0	10,1	07,9	06,8
0,200	11,3	11,4	09,7	08,4

Tabela 5.2

As espessuras de recapeamento apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2 foram obtidas respectivamente por:

- a) Figura 13, pág. 35, da Referência 5.
- b) Figura 4.2 do presente trabalho
- c) Figura IV:3, pág. 51, da Referência 4.
- d) Figura 16, pág. 48, da Referência 30.

Observando a Tabela 5.1 verificamos que, para uma deflexão admissível igual a 0,050cm, os resultados obtidos por este estudo apresentam-se entre os da RTAC e os do "Asphalt Institute". Para a deflexão admissível de 0,100cm (Tabela 5.2), os valores obtidos são comparáveis aos da Roads and Transportation Association of Canada quando as deflexões representativas são superiores a 0,150cm.

Verifica-se que as espessuras fornecidas para o recapeamento, neste trabalho, assim como os recomendados pela RTAC e pelo "The Asphalt Institute", são bastante superiores às aquelas obtidas pelo método do Eng^o Celestino Ruiz.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Tendo em vista a boa aproximação entre os resultados obtidos pelo método exposto e os valores recomendados por duas organizações internacionalmente reconhecidas (Roads and Transportation Association of Canada e "The Asphalt Institute"), podemos aceitar a aplicação deste método a problemas práticos de dimensionamento de recapeamentos de pavimentos flexíveis.

É preciso lembrar, contudo, que todas as teorias tratam com materiais ideais e condições ideais que são apenas parcialmente satisfeitas na natureza. O domínio da validade e da aplicação da teoria deve ser estudado na base do comportamento e experiências reais (BURMISTER)⁹. Assim, antes que este novo método seja colocado em uso, é necessário que as deflexões previstas por ele sejam confrontadas com as deflexões obtidas experimentalmente nas rodovias, onde haja controle das deflexões iniciais e das deflexões depois de feito o recapeamento, conhecida rigorosamente a espessura deste.

Como sugestões para estudos futuros, podemos citar:

a) o cálculo de rodas equivalentes, baseado no critério de igualdade das deflexões superficiais, utilizando o programa automático apresentado para o cálculo das deflexões em um sis-

tema elástico de duas camadas.

b) o dimensionamento de recapeamentos através da teoria da visco-elasticidade, que dá melhor aproximação do que a teoria da elasticidade na previsão das deformações dos pavimentos (MONISMITH³¹ e SECOR; HUANG¹⁹).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KINGHAM, R.I. - A Pavement Deflection Study to Develop an Asphalt Overlay Design Method. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, 1970.
2. KIRK, J.M. - Calcul de L'Epaisseur des Assises de Route. Association Internationale Permanente des Congrès de la Route, XII Congrès Mondial, Roma, 1964.
3. BOUSSINESQ, J. - Application des Potentiels a L'Etude de L'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques. Gauthier - Villars, Paris, 1885.
4. ESTADOS UNIDOS. Asphalt Overlays and Pavement Rehabilitation. The Asphalt Institute, la Edição, Novembro de 1969.
5. CANADÁ. A Guide to the Structural Design of Flexible and Rigid Pavements in Canada. Roads and Transportation Association of Canada, Abril de 1971.
6. WILKINS, E.B. e CAMPBELL, G.D. - Flexible Pavement Design Based on Benkelman Beam Rebound Measurements. Proceedings of The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 32, 1963.

7. McLEOD, N.W. - Flexible Pavement Thickness Requirements, Proceedings of The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 25, 1956.
8. RUIZ, C.O.L. - Sobre o Cálculo de Espessura para Reforço de Pavimentos. Boletim do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Rio de Janeiro, Outubro de 1964 a Janeiro de 1965, Nº 20.
9. BURMISTER, D.M. - The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. Highway Research Board, Vol. 23, 1943.
10. MONISMITH, C.L., SEED, H.B., MITRY, F.C. e CHAN, C.K.- Prediction of Pavement Deflection from Laboratory Tests. Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings, 1967.
11. COFFMAN, B.S. - Pavement Deflections from Laboratory Tests and Layer Theory. Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings, 1967.
12. DORMAN, G.M. e EDWARDS, J.M. - Developments in the Application in Practice of a Fundamental Procedure for the Design of Flexible Pavements. Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1967.

13. KIRK, J.M. - Analysis of Deflection Data from the AASHO Road Test. Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1967.
14. KALLAS, B.F. e RILEY, J.C. - Mechanical Properties of Asphalt. Pavement Materials. Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1967.
15. WHIFFIN, A.C. e LISTER, N.W. - The Application of Elastic Theory to Flexible Pavements. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings, 1962.
16. HUANG, Y.H. - Computation of Equivalent Single - Wheel Loads Using Layered Theory. Highway Research Record n^o 291, National Research Board, 1969.
17. TIMOSHENKO, S. e GOODIER, J.N. - Theory of Elasticity. McGraw - Hill, New York, 1951.
18. ABRAMOWITZ, M. e SEGUN, I. - Handbook of Mathematical Functions. Dover Publications, Inc, New York, 1968.

19. HUANG, Y.H. - Stresses and Displacements in Viscoelastic Layered Systems Under Circular Loaded Areas. Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1967.
20. HARR, M.E. - Foundations of Theoretical Soil Mechanics. McGraw - Hill Book Company, 1966.
21. CANADÁ. Canadian Good Roads Association - Pavement Evaluation Studies in Canada. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings, 1962.
22. ESTADOS UNIDOS. Thickness Design - Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets. The Asphalt Institute, 1965.
23. FRANÇA. L'Essai AASHO - Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers Spécial E, 1966.
24. YODER, E.J. - Principles of Pavement Design. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1959.
25. SOUTHGATE, H.F. e DEEN, R.C. - Temperature Distribution Within Asphalt Pavements and its Relationship to Pavement Deflection. Highway Research Record nº 291, HRB, Washington DC, 1969.

26. FOSTER, C.R. e AHLVIN, R.G. - Stresses and Deflections Induced by a Uniform Circular Load. Proceedings, Highway Research Board, 1954.
27. JEUFFROY, G. - Conception et Construction des Chaussées. Editions Eyrolles, Paris, 1967.
28. YODER, E.J. - Flexible Pavement Deflections, Methods of Analyses and Interpretation. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 31, 1962.
29. SHOOK, F. I. e FINN, N.F. - Thickness Design Relationships for Asphalt Pavements. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings, 1962.
30. CARNEIRO, F.B.L. - Viga Benkelman, Instrumento Auxiliar do Engenheiro de Conservação. Setor de Aprimoramento e Publicações do DER-RJ, 1966.
31. MONISMITH, C.L. e SECOR, K.E. - Viscoelastic Behavior of Asphalt Concrete Pavements. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings, 1962.