

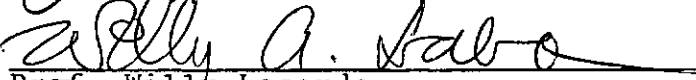
EFEITO DA TEMPERATURA NA DEFORMABILIDADE  
DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

JOÃO PREVITERA FILHO

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

Aprovada por:

  
Prof. Jacques de Medina - Presidente

  
Prof. Willy Lacerda

  
Prof. Marcio Miranda Soares

RIO DE JANEIRO  
ESTADO DA GUANABARA-BRASIL  
MAIO DE 1974

ã minha mãe,

que tanto tem feito por mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jacques de Medina pela orientação efetiva que recebemos durante toda a elaboração desta tese;

À Dra. Marlene Maia Pinto do Serviço de Meteorologia, pela ajuda inestimável que nos prestou nas incursões no campo da Meteorologia;

Ao Serviço de Meteorologia do Ministério da Agricultura, por nos permitir o acesso a seus arquivos e biblioteca, onde colhemos informações valiosas para este trabalho;

Aos Professores da Área de Mecânica dos Solos em geral, pelos conhecimentos adquiridos, condição essencial para a realização desta tese e em especial ao Prof. Patrick Pichavant, que nos ajudou na manipulação do programa FEPAVE;

A todos os colegas e funcionários da COPPE que de uma forma direta ou indireta nos auxiliaram nesta tarefa.

R E S U M O

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência da temperatura no comportamento dos pavimentos asfálticos e compreende as seguintes etapas:

Primeira, determina-se o perfil de temperatura no revestimento a partir de suas propriedades térmicas e fatores climáticos, utilizando a teoria de Barber;

Segunda, define-se as propriedades resilientes dos diversos materiais componentes do pavimento;

Terceira, calcula-se as deflexões resilientes (recuperáveis) sob a ação da carga de veículos.

Por último, analisa-se os resultados encontrados.

A B S T R A C T

This work presents a study about the temperature influence on the behaviour of the asphalt pavements and contains the following steps:

First, we determine the temperature profile in the surface by using its thermal properties and climatic factors, according to Barber's theory.

Second, we define the resilient properties of the several pavement materials.

Third, we calculate the resilient deflections (recoverable) under the loading action of vehicles.

Finally, an analysis of the results is made.

INDICE

	pg.
<u>CAPITULO I</u>	
<u>Introdução</u>	1
<u>CAPITULO II</u>	
<u>Estimativa do Perfil de Temperatura     no Pavimento</u>	6
2.1 - Revisão dos métodos existentes	6
2.2 - Análise dos métodos	7
2.3 - Método de Barber	8
2.4 - Informações adicionais	11
2.5 - Aplicação do método	12
2.6 - Programa automático para o cál- culo dos perfis	17
<u>CAPITULO III</u>	
<u>Características Mecânicas dos Mate-     riais do Pavimento</u>	19
3.1 - Introdução	19
3.2 - Solos de granulação fina	20
3.3 - Materiais granulares	22
3.4 - Concreto asfáltico	23
<u>CAPITULO IV</u>	
<u>Cálculo das Deflexões com Auxílio do     Programa FEPAVE</u>	25
4.1 - Dados de entrada para o programa	25

	pg.
4.1.1 - dados referentes ao revestimento	25
4.1.2 - dados referentes à base, sub-base e sub-leito	29
4.1.3 - dados do carregamento	31
4.1.4 - geometria da malha	32
4.2 - Saída do Programa	35
<u>CAPITULO V</u>	
<u>Conclusões</u>	40
5.1 - Análise dos Resultados	40
5.2 - Comentários adicionais	42
<u>APÊNDICE I</u>	
<u>Radiação Solar (ref. 15)</u>	44
<u>APÊNDICE II</u>	
<u>Determinação das horas 1 e 2</u>	48
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	53

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

É fato notório a influência da temperatura no comportamento dos pavimentos que utilizam o concreto asfáltico como material de revestimento.

Pela sua própria composição, pedra britada, asfalto e "filler", o concreto asfáltico tende a modificar seu comportamento mecânico de acordo com a temperatura que sua massa apresenta. O asfalto que possui propriedades que dependem da temperatura transmite ao concreto asfáltico essa dependência. Assim esse material, quanto ao seu comportamento mecânico pode ser classificado como termo visco-elástico, ou seja trata-se de um material visco-elástico cujas curvas tensão-deformação variam com a temperatura.

O efeito de temperatura no nosso método de dimensionamento não é considerado, a não ser nas especificações para as misturas asfálticas, onde é pedido que se teste a estabilidade das mesmas, à uma temperatura de 60°C, no ensaio conhecido como ensaio Marshall que consiste em carregar uma amostra cilíndrica se-



gundo as normas do MÉTODOS DE ENSAIO - DNER.

Apesar de se conhecer o efeito qualitativo da temperatura, sua influência de forma quantitativa não tinha sido anunciada.

Um dos trabalhos pioneiro, Ref. 1, foi de MONISMITH e outros que estudaram o problema de aparecimento de trincas transversais em pavimentos. Estas trincas transversais eram espaçadas regularmente e foram atribuídas a efeitos de contração a baixas temperaturas. Monismith e sua equipe fizeram uma simulação das condições climáticas, considerando o revestimento como uma laje composta de material visco-elástico linear e sujeita a um campo de temperaturas dependente do tempo.

Para as distribuições de temperaturas superficiais mostradas abaixo, fig. 1, foram calculadas as distribuições de tensões apresentada na fig. 2.

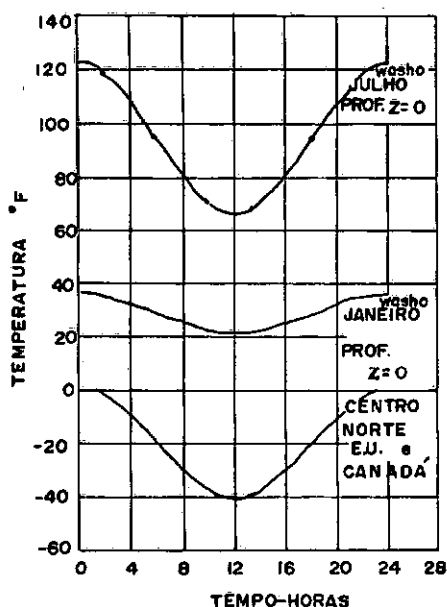


FIG. 1 - Relações temperatura-tempo assumidas.

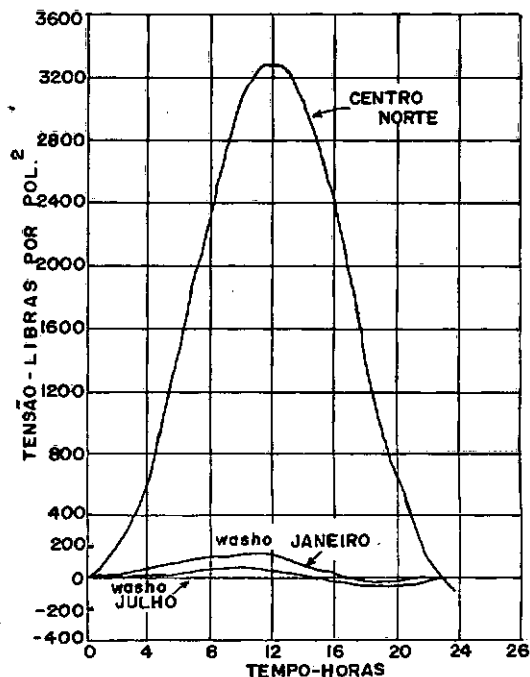


FIG. 2 - Tensão de tração x tempo na superfície da laje de revestimento para diversas condições de temperatura.

Como se vê variações de 38°F à 20°F (3°C a -7°C) e 124°F a 67°F (51°C a 19°C) dão origem a pequenas tensões, enquanto uma variação de 0°F a -40°F (-18°C a -40°C) ocasiona tensões de tração maiores que 3200 psi (225kg/cm<sup>2</sup>). Como a resistência a fratura do concreto asfáltico fica na faixa de 40 a 100 kg/cm<sup>2</sup>, já se pode esperar o trincamento superficial do revestimento.

Conclusões análogas foram assinaladas por P. B. STILL, ref. 2, que estudou o efeito de variação de temperatura para condições climáticas na Inglaterra. Com base neste trabalho e no de Monismith já se pode afirmar que para variações de temperatura nu

ma faixa acima de zero, as tensões induzidas pela variação de temperatura não são importantes.

No nosso país, a temperatura média nas regiões mais frias fica em torno de  $8^{\circ}\text{C}$  a  $12^{\circ}\text{C}$  com temperaturas mínimas na faixa  $-8^{\circ}\text{C}$  a  $-12^{\circ}\text{C}$  (Ref. 3), o que nos leva a concluir que esse fenômeno não nos afeta.

O problema com que nos defrontamos é o de "amolecimento" do concreto asfáltico que devido a altas temperaturas do ar e absorção de radiação solar se aquece muito, e se deforma mais sob a ação das cargas do tráfego.

Já se fez medições de temperatura em pavimentos aqui no Brasil. Num trabalho da autoria de Jacques de Medina e Hélio Farah, ref. 4, encontram-se medições efetuadas com termômetros na superfície e a 7,5cm de profundidade de um pavimento no Estado da Guanabara. Registrou-se temperaturas de até  $68^{\circ}\text{C}$  na superfície.

O trabalho que nos propomos a fazer é determinar um perfil de temperaturas no revestimento (não se considerará a influência da temperatura nas camadas de material granular) em função de fatores climáticos e daí estipularmos parâmetros significativos da curva tensão-deformação do concreto asfáltico.

De posse desses parâmetros, entramos com todos os dados no programa FEPAVE, Ref. 5, que calcula deflexões e tensões no pavimento, e assim poderemos observar a influência desse perfil de temperatura no comportamento do pavimento; como passo inicial tratemos de determiná-lo.

## CAPÍTULO II

### ESTIMATIVA DO PERFIL DE TEMPERATURA NO PAVIMENTO

#### 2.1 - Revisão dos métodos existentes

O trabalho pioneiro neste campo foi de BARBER, 1957, ref. 6, que utilizando a equação de transferência de calor unidimensional determinou a variação de temperatura com a profundidade. Ele considerou o pavimento como se fosse um meio homogêneo quanto às propriedades térmicas, ou seja tratando-o como um meio semi-infinito. Ele considera para a determinação do perfil de temperaturas a influência de fatores climáticas tais como temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento, bem como as propriedades térmicas do concreto asfáltico. No seu trabalho ele mostra comparações de temperaturas máximas na superfície, medidas, e calculadas pela sua fórmula e discute os resultados.

Monismith no seu trabalho já citado, ref. 1, tratou o problema considerando o revestimento como uma laje infinita no plano horizontal, mas de espessura  $h$  e com as seguintes condições de contorno: variação periódica da temperatura na superfície e

temperatura constante abaixo de profundidade h. Com esse perfil êle calculou as tensões induzidas por variações de temperatura. Tratamento análogo foi dado por P. B. Still.

STRAUB e outros, ref. 7, estudaram o problema de forma mais ampla considerando as diferenças das propriedades térmicas das diversas camadas do pavimento. Foi utilizado um método numérico de análise, o de diferenças finitas. Este estudo além de levar em consideração a temperatura do ar, inclui também o efeito da radiação solar incidente. Infelizmente o programa idealizado pelos pesquisadores não está disponível.

Na ref. 8, foi feito também um estudo com elementos finitos que parece conduzir a bons resultados.

## 2.2 - Análise dos métodos

De todos os métodos apresentados o de Barber é o que mais se presta para utilização, pela simplicidade na sua formulação.

O trabalho de Monismith não leva em conta a radiação solar já que o seu estudo principal é com temperaturas no inverno quando aquela variável assume valores desprezíveis.

O método de Straub apesar de teoricamente mais correto tem o inconveniente de necessitar dados não disponíveis em Boletins Meteorológicos e sua listagem não é descrita na referência.

Na ref. 8 fez-se uma comparação entre valores medidos, e calculados pela teoria de Barber e elementos finitos; mostram boa concordância os valores calculados e medidos. Como o método de elementos finitos é bem mais sofisticado, o método de Barber foi escolhido para utilizarmos em nosso trabalho.

### 2.3 - Método de Barber

Este autor apresentou em 1957, ref. 6, um artigo intitulado "Calculation of Maximum Pavements Temperatures from Weather Reports". Como o próprio nome diz ele procurou correlacionar analiticamente a temperatura do pavimento com fatores climáticos. Esses fatores são vento, precipitações, temperatura do ar e radiação solar.

Os fatores citados acima e mais as propriedades térmicas do pavimento fornecem, dentro de um modelo matemático pré concebido, um perfil de temperaturas nesse pavimento.

Barber simplificou o problema considerando o pavimento como uma massa semi-infinita, homogênea, apesar dos materiais

granulares possuírem propriedades térmicas diferentes do revestimento. As propriedades térmicas consideradas para cálculo são do revestimento.

Considerando a superfície do pavimento em contato com o ar com uma temperatura  $T' = T_m + T_v \text{ sen } 0,262t$ , a equação que exprime a temperatura do pavimento será:

$$T = T_m + T_v \cdot \frac{H e^{-xC}}{\sqrt{(H+C)^2 + C^2}} \text{ sen } (0,262t - xC - \text{arc tg } \frac{C}{H+C})$$

onde:

$T$  = temperatura do pavimento, °C

$T_m$  = temperatura média do ar junto à superfície, °C

$T_v$  = variação máxima em relação à média, °C

$t$  = tempo a partir de uma determinada origem, horas

$x$  = profundidade abaixo da superfície, metros

$h$  = coeficiente de transmissão térmica superficial,  
kcal/m<sup>2</sup>h°C

$K$  = coeficiente de transmissão térmica, kcal/m.h.°C

$H = h/K$

$C = \text{difusibilidade térmica} = K/(s.w), \text{ m}^2/\text{h}$

$s = \text{calor específico Kcal/kg.}^\circ\text{C}$

$w = \text{densidade do concreto asfáltico, kg/m}^3$

O valor de  $h$  que toma em consideração o fenômeno de convecção forçada, incluindo também a re-irradiação média é:



$$h = 1,3 + 0,62v^{3/4}$$

onde:

v = velocidade do vento em milhas por hora

A temperatura do ar em contato com a superfície difere da normalmente medida (acima do solo e na sombra) devido à radiação solar. A relação entre as duas é:

$$T_m = T_a + \frac{b I}{h} \cdot p \quad \text{onde}$$

$T_m$  = temperatura média do ar em contato com a superfície do revestimento, °C

$T_a$  = temperatura média do ar, medida segundo as normas do Serviço de Meteorologia, °C

b = coeficiente de absorção adimensional

I = radiação solar, Kcal/m<sup>2</sup>.h

p = coeficiente de perda por re-irradiação, tomado aproximadamente igual a 0,67

Do mesmo modo a variação diária do ar junto ao pavimento é alterada pela radiação solar e pode ser estimada como:

$$T_v = 0,5 T_r + 3 \times R \quad \text{onde}$$

$T_v$  = já definida

$T_r$  = variação diária da temperatura do ar

$$R = \frac{b I}{h} \times p$$

O autor cita o fato de que uma precipitação pluviométrica faz decrescer as temperaturas devido à razão de que parte do calor recebido do sol é utilizado na evaporação da água sobre o pavimento.

Comparações entre valores medidos e calculados pela sua teoria são mostrados, e apresentam boa concordância. Certas disparidades são explicadas pelo fato de que as vezes a temperatura do ar muda rapidamente e o pavimento não acompanha tão rápidas mudanças.

Vale salientar que esta teoria segundo dados adicionais oriundos de diversas referências é válida para dias ensolarados, de pouca nebulosidade.

#### 2.4 - Informações Adicionais

São dignas de nota algumas conclusões tiradas da ref. 7 que são as seguintes:

1) Há um atraso no tempo para que as temperaturas no revestimento atinjam os valores máximo e mínimo em relação ao ar. Este intervalo de tempo aumenta com a profundidade.

2) O efeito da passagem de uma nuvem faz baixar rapidamente a temperatura na superfície criando picos na curva temperatura x tempo.

3) A chuva tende a igualar as temperaturas a diversas profundidades dentro do pavimento.

4) A grandes profundidades (30cm no caso) a temperatura sofre pouca influência de variações na temperatura do ar.

5) Houve pouca diferença entre valores de temperatura, para o revestimento de 15cm de espessura e para o de 30cm. Isso é explicado devido a semelhança entre as propriedades térmicas do revestimento e da base.

6) O efeito da radiação solar é maior que o da temperatura do ar, no que se refere ao aumento de temperaturas no pavimento.

## 2.5 - Aplicação do Método

Para nos utilizarmos do método precisamos definir todas as variáveis sejam elas os fatores climáticos ou propriedades térmicas do asfalto.

Começemos pelas propriedades térmicas. Elas são o coeficiente de transmissão térmica  $K$ , o coeficiente de transmissão térmica superficial  $h$ , calor específico  $s$  e difusibilidade térmica  $c$ .

O valor adotado para  $K$  será o mesmo utilizado por Barber ou seja 0,7 BTU/ft. h. °F (1,042Kcal/m.h. °C). Na ref. 9 é

citada a sugestão de um pesquisador para se ter aproximadamente o valor de K.

$$\log K_{mx} = X' \log K_{asph} + (1 - X') \log K_{agg}$$

onde

$K_{mx}$  - coeficiente de transmissão térmica da mistura

$K_{asph}$  - coeficiente de transmissão térmica do asfalto

$K_{agg}$  - coeficiente de transmissão térmica do  
agregado

$X'$  - fração em volume de asfalto

Esta fórmula é aplicável para misturas bem compactadas (com pouco vazios) para não se ter influência do ar.

O valor de  $h$  foi tomado como igual a 3,6 BTU/ft<sup>2</sup>h°F (17,577 Kcal/m<sup>2</sup>.h°C).

Isto pelo fato de não termos dados acerca do vento e então tomamos um valor médio utilizado por Barber em um de seus exemplos.

O calor específico usado por nós foi o mesmo de Barber  $s = 0,22$  BTU/lb .°F (0,220 Kcal/kg.°C). Existem também uma relação em função da mistura, como se segue:

$$s_{mix} = 0,01 \left[ (100 - x) s_{asph} + x s_{agg} \right]$$

$s_{mix}$  = calor específico da mistura

$s_{asph}$  = calor específico do asfalto

$s_{agg}$  - calor específico do agregado e  
 $x$  - percentagem em peso de agregados

A difusibilidade térmica foi calculada para  $w = 140 \text{ lb/ft}^3$  ( $2,24 \text{ t/m}^3$ ) e igual  $0,0227 \text{ ft}^2/\text{h}$  ( $102,160 \text{ m}^2/\text{h}$ ).

Os fatores climáticos são temperatura do ar, radiação solar e vento.

O vento como não era disponível nos lugares desejados considerou-se tal que proporcionasse o valor de  $h$  estipulado.

A temperatura do ar foi extraída dos Boletins do Serviço Meteorológico, Ministério da Agricultura, mais precisamente, de Normais Climatológicas, ref. 10. Foi utilizado o seguinte critério: considerou-se a temperatura média ( $T_a$ ) como sendo a média aritmética das temperaturas máxima e mínima do dia e a variação ( $T_r$ ), a diferença entre essas duas temperaturas.

A radiação solar não é comumente medida no Brasil pelos Postos de Meteorologia. Ela foi estimada em função da insolação - número de horas em que o sol não está encoberto - e de outras variáveis como latitude do ponto considerado, ângulo horário e declinação solar. Ver Apêndice 1.

Foram escolhidos diversas cidades representativas de

regiões do Brasil. A escolha foi feita em função do tempo de funcionamento da estação meteorológica e daí uma maior representatividade dos dados.

Os lugares escolhidos foram Manaus, Ilhéus, Cuiabá, Rio de Janeiro e Santos.

A determinação do perfil de temperaturas nestes locais foi feita nos dias de máxima e mínima temperatura do ar, no período 1931 - 1960.

Queríamos com isso ter uma gama de variação para o comportamento mecânico do pavimento em situações extremas, inverno e verão rigoroso e ver se havia grande influência da temperatura.

O fato de utilizarmos a temperatura máxima para termos uma deflexão máxima não é rigorosamente correto já que o perfil de temperaturas depende e muito da radiação solar; sendo assim poderíamos ter um perfil de temperaturas mais elevado em outro dia que não o utilizado, porém essa deficiência decorre dos dados disponíveis do Serviço de Meteorologia.

Apresentamos em anexo um programa de computador para calcular perfis de temperatura pelo método de Barber, em linguagem FORTRAN.

Foram determinados perfis de temperatura para os locais citados considerando o revestimento de espessuras de 7,5cm e 10,0cm para se estudar a influência da geometria do revestimento.

A hora do dia para a qual iríamos determinar a variação de temperatura ao longo do revestimento foi a que conduziu a maior quantidade de calor na massa do concreto asfáltico ou

$$\int_0^{z_0} Tdz = \text{máximo}$$

ver apêndice 2, onde

$z_0$  = espessura do revestimento

T = temperatura do revestimento

z = profundidade

Também foi calculada a variação de temperatura na hora em que ocorria a temperatura máxima na superfície. Denominou-se esta de H2 e a outra H1.

2.6 - Programa Automático para o Cálculo dos Perfis

```

DIMENSION PROF(15),TEMP(15),HORA(5),XNOME(5)
C HCON =COEF. DE CONDUTIVIDADE EXTERNA
C CONDT=COEF. DE CONDUTIVIDADE TERMICA
C CALES=CALOR ESPECIFICO
C PESP =PESO ESPECIFICO
C ADS =COEF. DE ABSORÇÃO
C DELTH=ESPESSURA DE UMA SUBDIVISAO DO REVESTIMENTO
C N =NUMERO DE SUBDISIVOES
C K =NUMERO DO PROBLEMA
C TAR =TEMPERATURA MEDIA DO AR
C VATAR=VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR
C RADSO=RADIAÇÃO SOLAR
C
C LEITURA E IMPRESSAO DOS DADOS
C
READ(8,3) HCON,CONDT,CALES,PESP,ADS,DELTH,N
3 FORMAT(6F10.5,I5)
WRITE(5,4) HCON,CONDT,CALES,PESP,ADS,DELTH,N
4 FORMAT(1H1//20X,'*****IMPRESSAO DE DADOS*****',//26X,'HC',
1 'ON =',F10.3/26X,'CONDT=',F10.3/26X,'CALES=',F10.3/26X,'P',
2 'ESP =',F10.3/26X,'ADS =',F10.3/26X,'DELTH=',F10.3/26X,
3 'N =,I10)
HGRAN=HCON/CONDT
DIF=CONDT/(PESP*CALES)
CGRAN=SQRT(0.131/DIF)
CONS1=HGRAN/SQRT((HGRAN+CGRAN)**2+CGRAN**2)
CONS2=ATAN(CGRAN/(HGRAN+CGRAN))
ESP=FLOAT(N-1)*DELTH
CH=CGRAN*ESP
ALFA=ATAN((EXP(-CH)*(SIN(CH)-COS(CH))+1.)/(EXP(-CH)*(SIN(CH)
1)+COS(CH))-1.))
ALFA=3.1416+ALFA
HORA(1)=(ALFA+CONS2)/0.262
HORA(2)=(3.1416/2.0+CONS2)/0.262
WRITE(5,50) (HORA(I),I=1,2)
50 FORMAT(/24X,'HORAS DE CALCULO'//11X,'HORA(1)=' ,F10.3,6X,
1 'HORA(2)=' ,F10.3)
5 READ(8,6) K,TAR,VATAR,RADSO,(XNOME(I),I=1,5)
6 FORMAT(15,3F10.5,5A4)
RADSO=RADSO/24,
IF(K-10)7,7,15
7 WRITE(5,16)K,(XNOME(I),I=1,5),TAR,VATAR,RADSO

```



```

16 FORMAT(/24('*'), 'TRABALHO NUMERO', I3, 23('*')/24X, 'DADOS',
  11X, 'DE METEOROLOGIA'/24X, 5A4//16X, 'TEMPERATURA DO AR', 6X,
  2F10.2/16X, 'VARIAÇÃO DE TEMPERATURA', F10.2/16X, 'RADIÇÃO S',
  3'OLAR', 9X, F10.2)
  RGRAN=0.67*RADSO/HCON
  TEMED=TAR+RGRAN
  VATAR=VATAR/2. + 3.0*RGRAN
  WRITE(5,9)
  9 FORMAT(/12X, 'PERFIL DE TEMPERATURAS NO REVESTIMENTO'//10X,
  1'PROFUNDIDADE(M)', 17X, 'TEMPERATURA(C)')
  DO 12 J=1,2
  WRITE(5,13) J
13 FORMAT(/29X, 'HORA', I2)
  DO 19 I=1, N
  PROF(I)=FLOAT(I-1)*DELTH
19 TEMP(I)=TEMED+VATAR*CONS1*EXP(-PROF(I)*CGRAN)*SIN(0.262*HOR
  1A(J)-PROF(I)*CGRAN-CONS2)

C
C
C
  SAIDA DOS RESULTADOS

  WRITE(5,11) (PROF(I), TEMP(I), I=1, N)
11 FORMAT(/15X, F5.3, 26X, F6.3)
12 CONTINUE
  GO TO 5
15 STOP
  END

```

CAPÍTULO IIICARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS MATERIAIS DO PAVIMENTO3.1 - Introdução

O fator escolhido para se verificar o comportamento do pavimento sob a ação das cargas dos veículos foi a deflexão transitória.

A importância daquele fator é enfatizada na publicação de SEED e outros, ref. 11, pois através dela pode-se prever a ruptura do pavimento por fadiga. Um pavimento pode suportar cargas de veículos que sobre ele trafegam, sem deformação permanente excessiva, no entanto, poderemos ter esse mesmo pavimento sem condições de tráfego devido ao fissuramento de seu revestimento devido a repetição de deflexões.

Consideraremos no nosso estudo que a ruptura por deformação permanente foi evitada e tratemos de determinar a deflexão transitória, recuperável que é denominada de resiliente.

Para determinarmos esta deflexão resiliente é preciso

caracterizar o comportamento dos diversos materiais que compõem o pavimento sob a ação de cargas repetidas. Passamos, então para a determinação de uma característica importante, que é denominada módulo resiliente,  $M_r$ , e é a relação entre a tensão desviatória aplicada repetidamente e a deformação axial resiliente correspondente.

Cada um dos materiais usados em pavimentação rodoviária, o concreto asfáltico, o material granular utilizado em base e sub-base, e o material de granulação fina comum em sub-leitos apresentam um comportamento diferente, próprio de cada um; estudaremos esse comportamento nas linhas seguintes.

As informações que se seguem foram tiradas da ref. 11.

### 3.2 - Solos de Granulação Fina

Para estudo deste solo foram realizados ensaios de compressão tri-axial com cargas repetidas. A velocidade de aplicação variava de 20 aplicações por minuto a 3 aplicações por hora. O intervalo de tempo de aplicação da carga foi de 0,25s e que melhor correspondia às condições reais nas estradas.

São os seguintes os fatores que influenciam as características resilientes deste material:

1) Número de aplicações de carga. As deformações resilientes diminuem quando o número de aplicações aumenta. Daí, ensaios com um número pequeno de repetições conduzir a resultados falsos.

2) Intervalo de tempo entre compactação e carregamento. Amostras compactadas em altos graus de umidade aumentam a resistência com o tempo. Este efeito de tixotropia tende a desaparecer quando se aumenta o número de repetições de carga.

3) Intensidade das tensões. A influência do nível de tensões é muito importante. Observou-se que o módulo resiliente diminui com o aumento de intensidade das tensões.

4) Método de compactação. Os métodos de compactação que tendem a produzir estruturas dispersas produzem baixos módulos resilientes.

5) Umidade de compactação. O aumento do grau de umidade faz aumentar a deformação resiliente e o módulo tende a baixar.

6) Mudanças no grau de umidade e densidade após a compactação. É comum o solo ter sua umidade aumentada após a compactação, devido à absorção d'água e com isso a resiliência aumenta. Por outro lado, um aumento da densidade faz diminuir a resiliência.

### 3.3 - Materiais granulares

O comportamento deste material depende muito do grau de confinamento. Existem três tipos de teste para a utilização nestes materiais.

A) Compressão tri-axial com cargas repetidas e tensão confinante constante.

B) Carregamento repetido no Resiliometro de HVEEM.

C) Compressão axial com cargas repetidas, em amostras compactadas e testadas em cilindros rígidos que não permitem movimento lateral.

De trabalhos publicados sobre o assunto, chegou-se às conclusões de que o módulo resiliente do material em estudo depende de:

1) Duração da carga e velocidade de deformação. A diminuição do tempo de duração da carga aumenta o módulo resiliente, o mesmo acontecendo com o aumento da velocidade de deformação.

2) Frequência de aplicação de cargas. Um aumento na frequência implica num aumento do módulo.

3) Tipo do agregado e percentagem passando na peneira nº 200. Os resultados de ensaios com cascalhos e pedra britada não permitem tirar conclusões definitivas.

4) Índice de vazios. Já foi constatada uma diferença de até 50% no módulo resiliente de uma areia no estado fôfo para uma no estado denso.

5) Grau de saturação. O aumento no grau de saturação importa na diminuição do módulo resiliente.

6) Tensão confinante. É mais que reconhecida a sua influência. O seu aumento implica no aumento do módulo.

7) Grandeza das tensões. O módulo resiliente é independente do nível de tensões desde que o mesmo não provoque deformações plásticas em excesso.

### 3.4 - Concreto Asfáltico

As características resilientes deste material dependem tanto de sua composição, como da forma que foi ensaiado.

O comportamento "elástico" do concreto asfáltico tem sido extensivamente estudado nestes últimos tempos.

O trabalho pioneiro é de VAN DER POEL, que permite determinar a "rigidez" da mistura em função das propriedades do asfalto e da concentração em volume de agregado.

Inúmeros trabalhos existem, mostrando o comportamento do material, sob a ação de tensões de tração e compressão, em ensaios

de creep e relaxação.

Entretanto a forma mais adequada de ensaio para determinar-se a rigidez do concreto asfáltico é o ensaio de flexão, que é realizada em vigotas sujeitas a um momento constante na sua parte central, e que melhor simula as condições reais.

De um modo geral, as propriedades resilientes são afetadas pelos seguintes fatores: temperatura, cujo aumento faz baixar a rigidez e pelas condições de carregamento ou seja frequência de aplicação de carga e intervalo de tempo de duração desta aplicação.

CAPÍTULO IVCÁLCULO DAS DEFLEXÕES COM AUXÍLIO DO PROGRAMA FEPAVE4.1 - Dados de Entrada para o Programa4.1.1 - Dados referentes ao revestimento

Foram utilizadas duas espessuras de revestimento para os cálculos. Estas espessuras adotadas foram de 7,5cm e 10,0cm.

Da análise dos resultados obtidos com o programa que calculou os perfis de temperatura para diversas cidades do nosso país chegou-se a conclusão de usar os perfis de temperatura encontrados para as cidades do Rio de Janeiro e Santos que apresentavam além de temperaturas mais elevadas, uma maior variação de temperatura entre o verão e o inverno.

Um dos valores necessários para utilização no programa é o peso específico tomado igual  $2,40\text{t/m}^3$  ou em unidades coerentes com a utilização do programa  $0,0024\text{kg/cm}^3$ .

Os outros valores necessários são o módulo resiliente e



o coeficiente de Poisson que dependem da temperatura e foram tirados da ref. 12.

Os valores de  $M_r$  e  $\nu$  estão apresentados nos quadros 1 e 2 que se seguem.

### Simbologia

R - Rio de Janeiro

S - Santos

V - verão

I - inverno

H - hora

Sigla	Temperatura, °C	M. resiliente Kg/cm <sup>2</sup>	Coef. Poisson
RV H1	65,44	380,	0,48
	60,90	620,	0,48
	56,12	1.600,	0,48
	51,70	1.650,	0,48
RV H2	66,92	320,	0,48
	60,29	660,	0,48
	54,33	1.250,	0,48
	49,39	2.100,	0,48
RI H1	29,07	19.000,	0,43
	27,12	23.500,	0,43
	25,07	27.000,	0,43
	23,17	36.000,	0,43
SV H1	65,82	360,	0,48
	60,73	620,	0,48
	55,37	1.100,	0,48
	50,40	1.900,	0,48
SI H1	31,98	14.000,	0,43
	29,16	19.000,	0,43
	26,19	26.000,	0,43
	23,44	35.000,	0,43

Quadro 1: Revestimento c/ espessura de 10,0cm

Sigla	Temperatura, °C	M.resiliente, kg/cm <sup>2</sup>	Coef.Poisson
RV H1	66,01	360,	0,48
	62,22	540,	0,48
	58,31	820,	0,48
	54,56	1.100,	0,48
RI H1	29,31	18.500,	0,38
	27,69	24.000,	0,38
	26,01	28.000,	0,38
	24,40	31.000,	0,38
SV H1	66,45	340,	0,48
	62,21	540,	0,48
	57,82	860,	0,48
	53,62	1.350,	0,48
SI H1	32,33	13.500,	0,40
	29,98	17.500,	0,40
	27,55	22.000,	0,40
	25,22	29.000,	0,40

Quadro 2: Revestimento c/ espessura de 7,5cm

4.1.2 - Dados referentes à base, sub-base e sub-leito

Base

material: granular

espessura: 15,0cm

peso específico:  $\gamma = 2,20\text{t/m}^3 = 0,0020\text{kg/cm}^3$

coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,40$

módulo resiliente:  $M_R = 2763\sigma_3^{0,48} \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_3$  - tensão confinante

Sub-base

material: granular

espessura: 25,0cm

peso específico:  $\gamma = 1,85\text{t/m}^3 = 0,00185\text{kg/cm}^3$

coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,40$

módulo resiliente:  $M_R = 2028\sigma_3^{0,40} \text{ kg/cm}^2$

Sub-leito

material: granulação fina

espessura: infinita

peso específico:  $\gamma = 1,70\text{t/m}^3 = 0,0017\text{kg/cm}^3$

coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,47$

módulo resiliente: ver figura 3

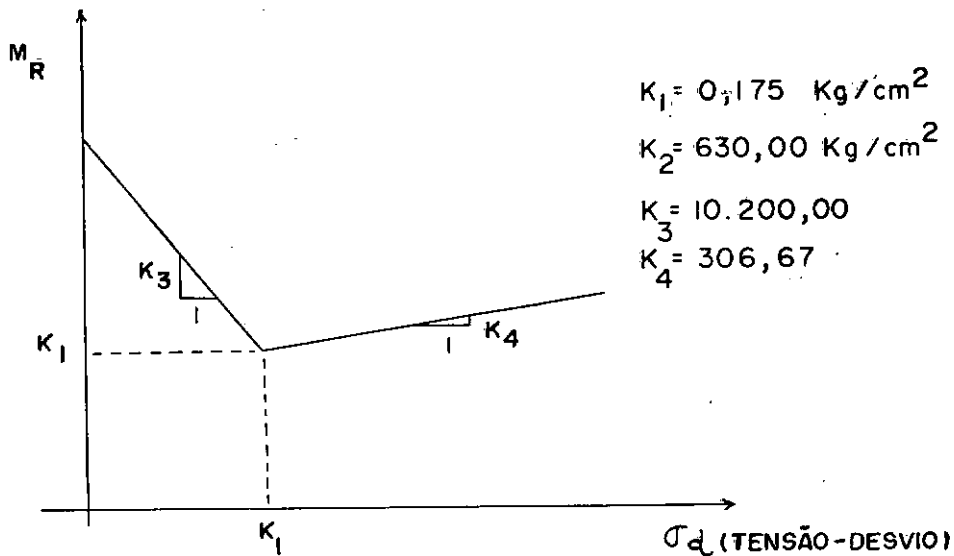


Fig. 3

- 1)  $M_r = 630,00 + 10.200,00 (0,175 - \sigma_d) p/\sigma_d \leq 0,175 \text{ kg/cm}^2$
- 2)  $M_r = 630,00 + 306,67 (\sigma_d - 0,175) p/\sigma_d > 0,175 \text{ kg/cm}^2$

Os valores de módulo resiliente e coeficiente de Poisson foram tirados da ref. 5.

#### 4.1.3 - Dados do carregamento

Considerar-se-á a distribuição de tensões devido a carga do eixo-padrão adotada no Brasil, 18000 libras (8,2t).

A carga é transmitida ao pavimento através do conjunto de rodas duplas. Considerar-se-á a área de contato pneu-revestimento como circular, e tiramos da ref. 13 os dados referentes ao valor da pressão considerada distribuída uniformemente e área circular equivalente à real. Sejam,

$p$  - pressão transmitida ao pavimento

$r$  - raio de área carregada

$a$  - afastamento entre as rodas duplas

$$p = 5,04 \text{ kg/cm}^2$$

$$a = 28,80 \text{ cm}$$

$$r = 11,40 \text{ cm}$$

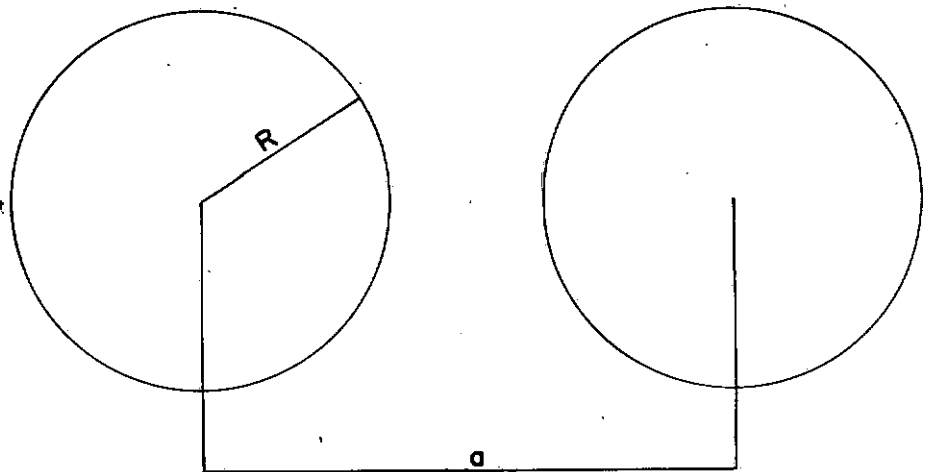


Fig. 4 - Roda dupla

#### 4.1.4 - Geometria da malha

O pavimento foi dividido em elementos retangulares ligados pelos vértices ou "nós" como são mais comumente conhecidos.

Os elementos na região onde temos maior interesse em pesquisar são de pequena dimensão para aumentar a precisão dos resultados.

De acordo com recomendações da ref. 5 colocamos a fronteira lateral rígida a uma distância de  $12 \times r$ ,  $r$  sendo o raio do carregamento e a fronteira inferior rígida a  $50 \times r$  da superfície do pavimento.

Como se trata de um problema axi-simétrico de tensões, estudamos somente "metade" do pavimento, considerando o eixo do carregamento como outra fronteira lateral rígida.

O meio fica então geometricamente definido, compreendido entre duas fronteiras laterais, a superfície do terreno e a fronteira inferior.

A divisão do maciço em linhas foi feita de seguinte maneira:

O revestimento foi dividido em 3 partes iguais, independente de sua espessura, a base em outras 3 de 5,0cm cada e a sub-base em 2 de 12,5cm.

A parte restante correspondente ao sub-leito foi dividida em 10 partes iguais.

A divisão em colunas procedeu-se assim:

1) o trecho compreendido pela carga foi dividido em quatro partes;

2) o afastamento entre os pontos seguintes foi tal que seguia uma progressão aritmética de razão  $r/4$  entre pontos sucessivos.

Segue a fig. 5 mostrando a malha para o revestimento de 7,5cm de espessura. O esquema para o revestimento de 10,0cm é idêntico.



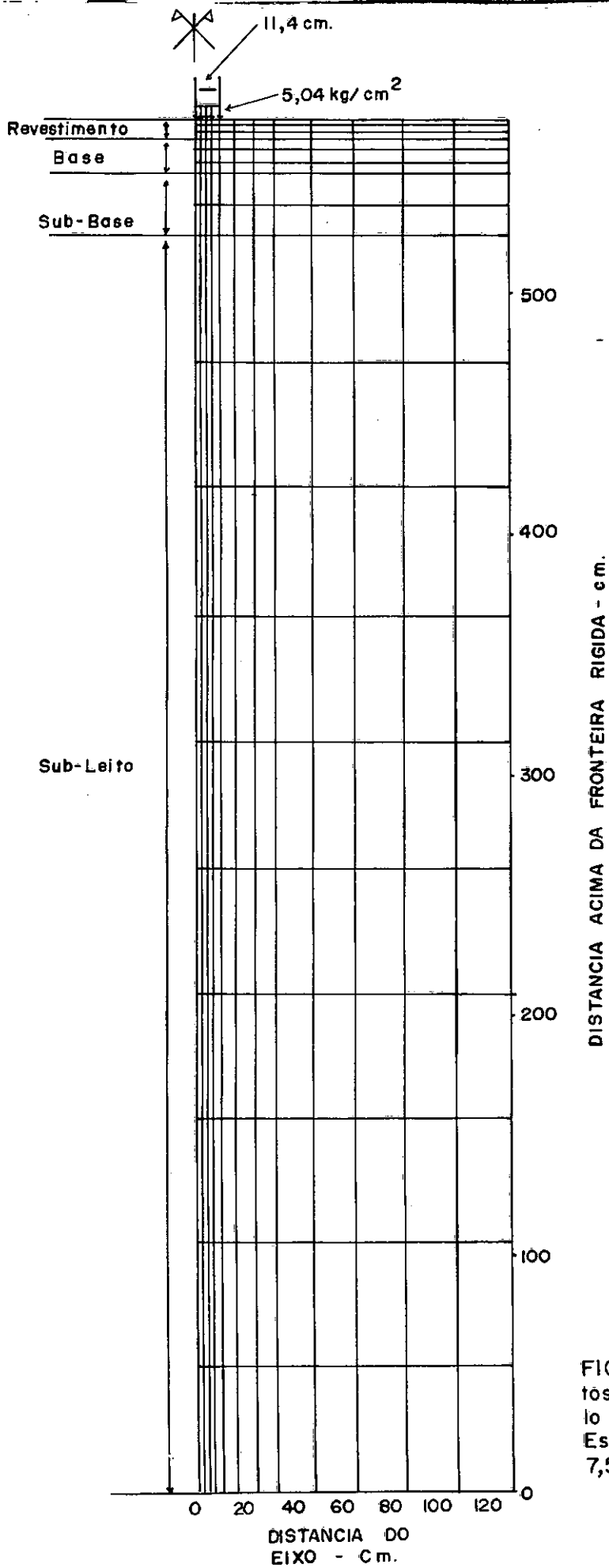


FIG.5 - Malha de elementos finitos usado no calculo de deflexões.  
Espessura do revestimento 7,5 cm.

#### 4.2 - Saída do Programa

A variação das deflexões superficiais com a distância ao eixo do carregamento é mostrada nos quadros 3 e 4 e figs. 6 e 7.

Na apresentação dos resultados, utilizou-se a seguinte simbologia:

R - distância do ponto ao eixo de carregamento.

Houve um pequeno acréscimo à simbologia dos quadros 1 e 2. O número colocado à frente das letras indica a espessura do pavimento em milímetros.

Como nas figuras só são apresentadas as deflexões para H1 - hora 1, omite-se esses dois caracteres.

No quadro 3 apresentou-se também as deflexões referentes a H2 - hora 2, para fins de comparação, isso para o perfil de verão no Rio de Janeiro, no pavimento de 10,0cm de espessura.

R	DEFLEXÕES ( $10^{-2}$ mm)				
	100RV-H1	100RV-H2	100RI-H1	100SV-H1	100SI-H1
0,00	101,70	94,11	29,73	94,39	31,18
2,85	98,94	92,57	29,28	93,34	30,55
5,70	92,81	87,24	28,52	89,85	29,52
8,55	85,09	81,16	27,22	83,13	28,23
11,40	58,05	55,38	25,18	56,52	26,00
17,10	30,35	30,05	21,39	30,01	21,93
25,65	17,47	17,84	16,61	17,60	16,89
37,05	9,20	9,40	11,57	9,30	11,61
51,30	4,88	4,94	7,29	4,91	7,20
68,40	2,92	2,92	4,28	2,92	4,17
88,35	2,10	2,10	2,53	2,10	2,47
111,50	1,76	1,76	1,70	1,76	1,69
136,80	1,66	1,66	1,48	1,66	1,48

Quadro 3

R	DEFLEXÕES ( $10^{-2}$ mm)			
	75RV-H1	75RI-H1	75SV-H1	75SI-H1
0,00	112,30	38,13	110,40	41,69
2,85	109,60	37,82	107,40	40,95
5,70	100,70	36,73	100,10	39,46
8,55	92,30	34,71	92,04	37,11
11,40	62,50	31,67	62,44	33,53
17,10	31,61	25,76	32,06	26,80
25,65	16,81	18,57	17,14	18,89
37,05	8,57	11,80	8,71	11,67
51,30	4,57	6,76	4,62	6,50
68,40	2,82	3,72	2,85	3,53
88,35	2,08	2,23	2,10	2,16
111,50	1,77	1,64	1,78	1,66
136,80	1,67	1,50	1,68	1,55

Quadro 4

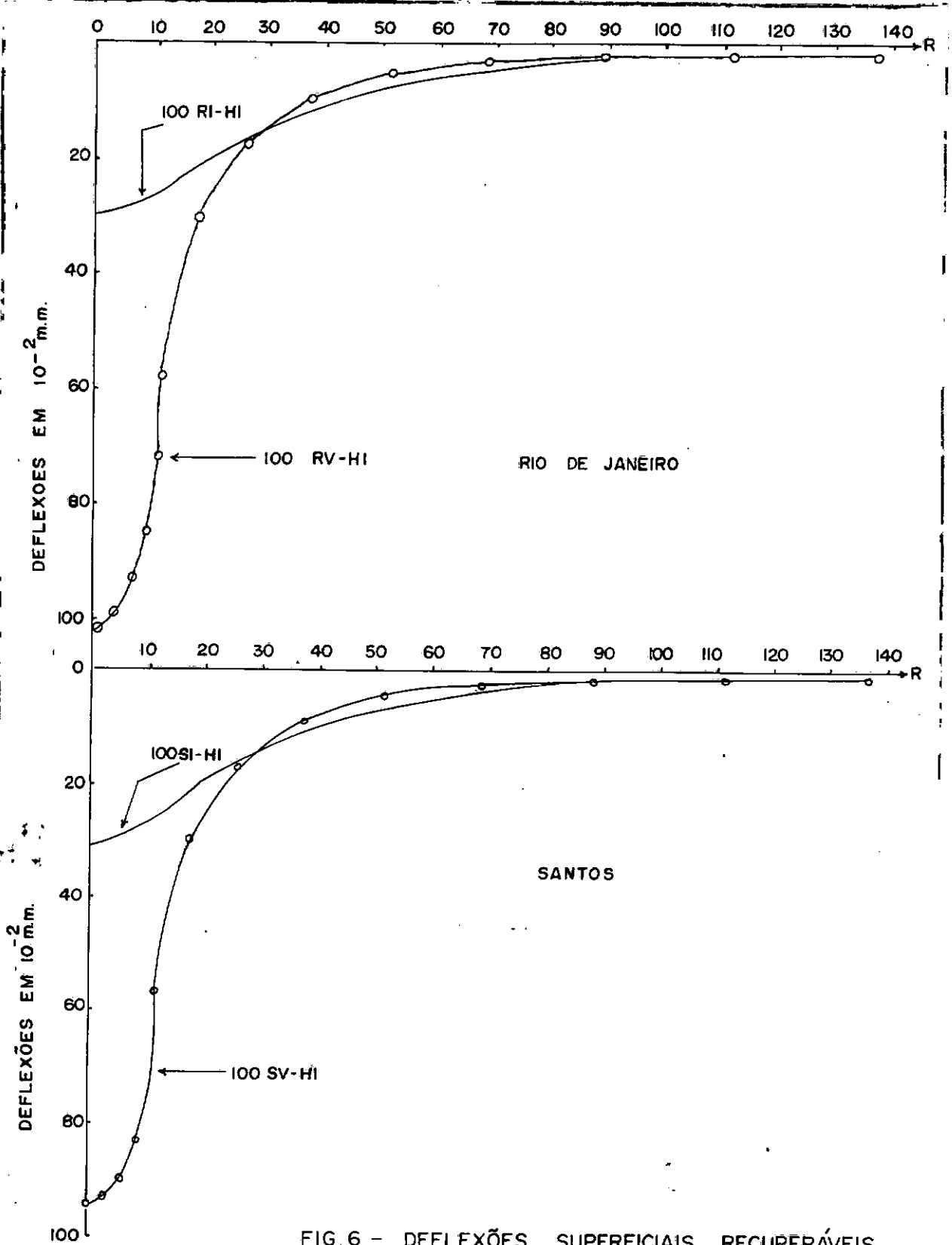


FIG. 6 - DEFLEXÕES SUPERFICIAIS RECUPERÁVEIS

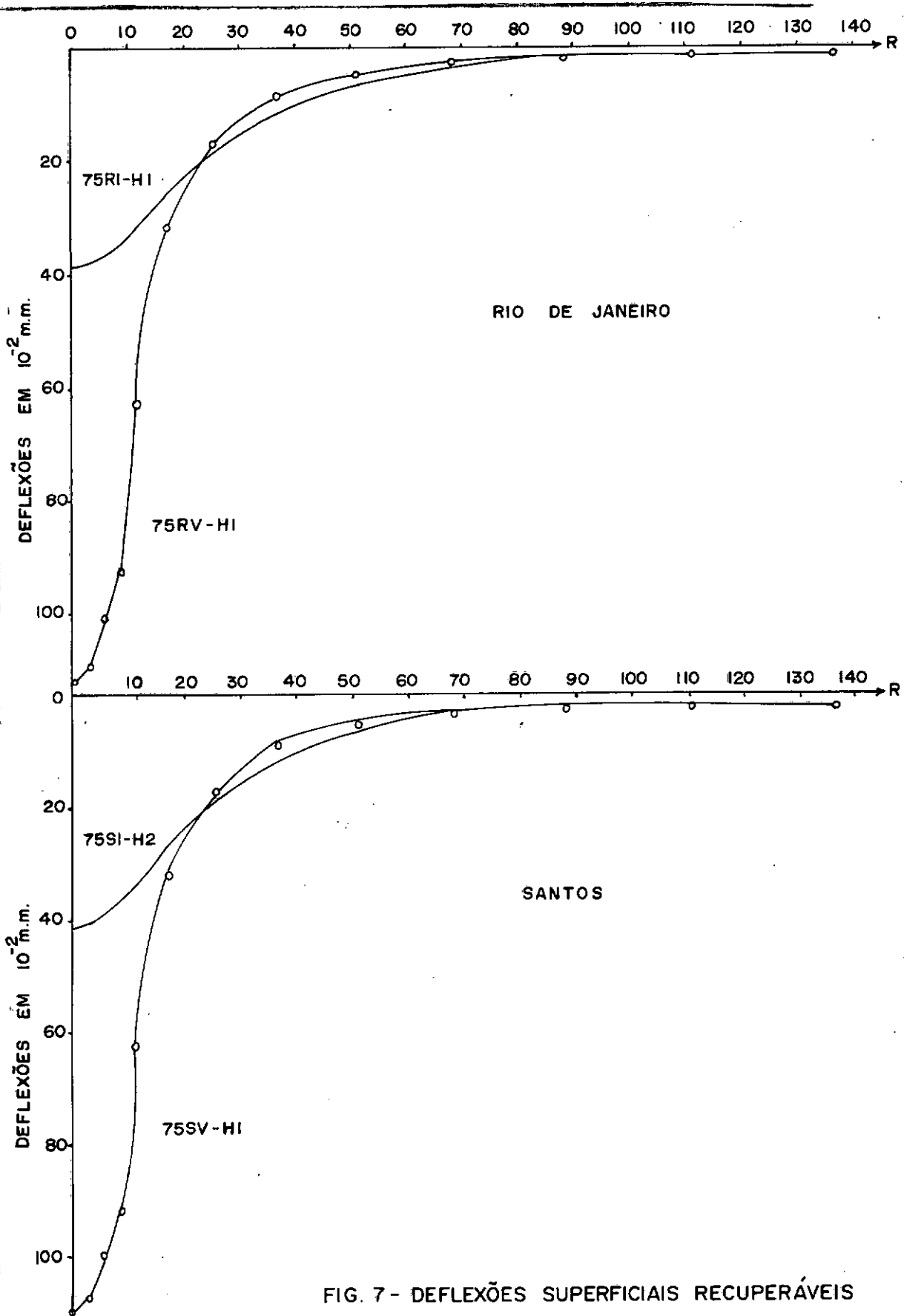


FIG. 7 - DEFLEXÕES SUPERFICIAIS RECUPERÁVEIS

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

#### 5.1 - Análise dos Resultados

Inicialmente calculou-se as deflexões durante as hora 1 e 2, para a cidade do Rio de Janeiro, em época de verão e com revestimento de espessura igual a 10,0cm (100RV-H1 e 100RV-H2); verificou-se - ver quadro 3 - que as maiores deflexões ocorriam quando o pavimento estava mais quente como um todo, ou seja na hora 1. Assim as deflexões seguintes foram calculadas somente durante esta hora.

Os valores de deflexão apresentados são devidos à pressão de contato de um dos pneus. A influência da outra roda na deflexão sob o centro do carregamento é pequena no verão (15%) mas no inverno ela é importante (50%) porque o revestimento se comporta como um corpo rígido.

Da observação dos resultados, sente-se a influência da temperatura. A deflexão sob o centro a carga chega a ser três vezes maior no verão, comparada com a obtida no inverno.

Observa-se que no verão, a variação das deflexões com a distância ao centro do carregamento é mais acentuada que no inverno, pela razão explicada acima ou seja o pavimento, nessa estação comporta-se de uma forma mais rígida.

Determinou-se as deflexões do ponto situado a meia distância dos centros das áreas carregadas (áreas de contato dos pneus). Isto foi feito porque neste ponto é que são feitas medições com a viga de Benkelman. Apesar da forma de aplicação do carregamento ser diferente em cada caso, pode-se ter uma idéia aproximada do que acontece com o valor da deflexão medida com a viga.

Os valores - não apresentados no trabalho - indicaram uma menor influência da temperatura. A deflexão no verão é duas vezes maior que a determinada no inverno, isso para o revestimento de 10,0cm de espessura. Quando o revestimento de 7,5cm de espessura foi utilizado, a relação cai abaixo de dois.

O efeito da temperatura é mais pronunciado no revestimento mais espesso (10,0cm). A causa provável, segundo a ref. 5, é que em pavimentos com revestimento espesso, as deformações radiais no fundo de camada são grandes em relação às deformações verticais e este quadro de deformações tendem a produzir um estado de tensões de tração, baixando o módulo resiliente da base e aumentando as deflexões no pavimento.



## 5.2 - Comentários Adicionais

Esse trabalho apresentou a variação das deflexões resilientes em condições extremas de verão e inverno, entretanto de um mesmo esquema se pode estudar tanto variações diárias como sazonais de deflexão.

A publicação "Design Framework for Asphalt Concrete Pavements using Available Theory", ref. 14, mostra uma maneira bem interessante de se levar em conta o efeito de temperatura no dimensionamento de pavimentos.

É o seguinte o critério adotado: faz-se uma estatística do número de eixos de carga  $K$  ( $K$  refere-se ao valor da carga, por exemplo: um eixo com 8,2t - eixo padrão) em cada intervalo horário  $i$  do dia. A partir de um perfil de temperatura médio em cada mês, determina-se também a distribuição das faixas da rigidez do concreto asfáltico (ex. de 300-400kg/cm<sup>2</sup>) em cada intervalo horário  $i$ . Com estas duas distribuições estatísticas se pode determinar o número de aplicações da carga do eixo  $K$  quando a rigidez do revestimento estava na faixa  $\ell$ , e assim um mapa com nível e número de deflexões resilientes em um ano, por exemplo.

Considera-se que o pavimento entrará em ruptura por fadiga quando o número de repetições de deflexões resilientes atingirem um certo valor que depende da grandeza dessa deflexão. Como

não temos um só valor, e sim uma faixa de valores, a ruptura se dará quando:

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad \text{onde}$$

$n_i$  - número de repetições da deflexão de valor  $i$

$N_i$  - número de repetições da deflexão de valor  $i$  para que o pavimento entre em ruptura

$n$  - número que cobre toda a faixa de valores de deflexão  $i$

Como se vê, dentro do mesmo esquema de trabalho apresentado, pode-se estudar o comportamento do pavimento sob a ação de fatores climáticos e cargas de veículos e evitar sua ruptura devido a fadiga, desde que se tenha uma estatística de tráfego, e o levantamento de parâmetros climáticos para determinação de perfis de temperatura.

Fica esta possibilidade levantada para trabalhos complementares.

APÊNDICE 1RADIAÇÃO SOLAR (Ref. 15)

A terra recebe continuamente do Sol, radiações emitidas por este astro. Parte dessa radiação chega em forma de energia calorífica e é fator importante no clima das regiões do nosso planeta.

A quantidade de energia solar que atravessa uma superfície normal aos raios do Sol, e situada na Terra chama-se constante solar, e é de aproximadamente  $1,94 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min} \pm 1,5\%$ . Este valor é baseado na hipótese de não-existência da atmosfera (que absorve parte de energia) e que a Terra se encontra a uma distância média do Sol ( $1,5 \times 10^{13} \text{ cm}$ ).

Costuma-se chamar radiação solar esta energia incidente sobre a Terra.

A quantidade de radiação solar que incide numa superfície horizontal (também admitindo a inexistência da atmosfera circundante) pode ser calculada pela expressão:

$$Q_s = S \cdot \left(\frac{d_m}{d}\right)^2 \cos z \quad \text{onde}$$

- $Q_s$  - quantidade de radiação solar que atinge a superfície horizontal,  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$  ou  $\text{langleys/min}$ ;
- $d_m$  - distância média Sol-Terra
- $d$  - distância instantânea entre Sol e Terra
- $z$  - ângulo zenital do Sol
- $S$  - constante solar

O ângulo  $z$  não é determinado diretamente e sim definido através de outras variáveis.

Na fig. 1.1, seja o ponto de observação  $P$ , o centro da terra  $O$ , definimos  $X$  como a interseção de  $OS$ , paralela à direção  $PS$  dos raios solares, com a superfície terrestre.

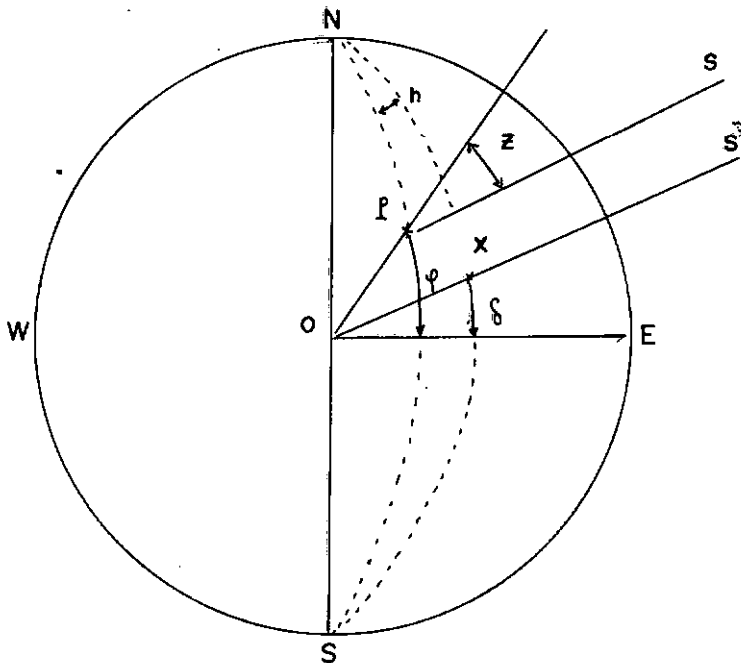


Fig. 1.1

Podemos então caracterizar as variáveis:

- $h$  - ângulo horário do sol, diferença de longitude entre os pontos P e X, ou ainda o ângulo que a terra deveria girar para que coincidisse os meridianos que passem por estes dois pontos;
- $\delta$  - declinação solar ou latitude de X
- $\varphi$  - latitude do ponto P

O ângulo zenital é definido então por:

$$\cos z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos h$$

A declinação solar é função só do dia do ano e independente da localização do ponto de observação. Varia  $23^{\circ}27'$  em 21 de junho a  $-23^{\circ}27'$  em 22 de dezembro.

A latitude é considerada positiva no hemisfério norte.

O ângulo horário ao meio-dia é igual a zero e varia  $15^{\circ}$  por hora. Ao nascer e ao por-do-sol, em qualquer latitude, exceto nos polos,  $\cos z = 0$  e  $h = H$  onde:

$$\cos H = - \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta$$

O valor de  $Q_0$  - radiação solar incidente durante um dia, é calculado integrando-se o valor de  $Q_s$  neste período de tempo e vale:

$$Q_0 = \frac{1.440}{\pi} \times S \cdot \left(\frac{d}{d_m}\right)^2 (H \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin H),$$

cal/cm<sup>2</sup>.dia

A ref. 16 possui valores de  $Q_0$  tabelados para diversas latitudes e cada dia do ano.

Nosso próximo passo é determinar  $Q$  - radiação solar ao nível do solo, ou seja já tomando em conta efeitos de perda de energia devida à atmosfera que nos envolve.

Existe uma relação empírica correlacionando os valores de  $Q_0$  e  $Q$  que é a seguinte:

$$Q = Q_0 \left( a + b \times \frac{n}{N} \right) \quad \text{onde}$$

$Q$  e  $Q_0$  - já foram definidos

$a$  e  $b$  - coeficientes determinados por regressão estatística

$n$  - insolação ou número de horas em que os raios do sol incidiram no ponto considerado

$N$  - duração teórica do dia, também em horas.

No Brasil determinou-se em alguns lugares os parâmetros  $a$  e  $b$ .

Para determinarmos o valor de  $Q$  nas cidades de Manaus, Cuiabá e Ilhéus, usamos os valores de  $a = 0,33$  e  $b = 0,30$ , ref. 17, e para as cidades de Rio de Janeiro e Santos,  $a = 0,58$  e  $b = 0,24$ , ref. 18.

Os valores de  $n$  foram tirados dos arquivos do Serviço de Meteorologia e os de  $N$  da ref. 19.

APÊNDICE IIDETERMINAÇÃO DAS HORAS 1 e 2Parte 1 - Determinação de H1

Seja a equação da temperatura ao longo do revestimento:

$$T = T_m + T_v \cdot K_1 e^{-xC} \times \text{sen}(w t - xC - K_2) \quad (1)$$

onde:

$$K_1 = \frac{H}{\sqrt{(H+C)^2 + C^2}}$$

$$K_2 = \text{arc tg } \frac{C}{C+H}$$

w no caso é igual a 0,262

Para termos o revestimento mais aquecido devemos ter:

$$Q = K \cdot \int_0^{z_0} T \cdot dx = \text{máximo} \quad (2)$$

$z_0$  - espessura do revestimento

K - constante de proporcionalidade

Para determinarmos o tempo em que isso ocorre a expressão (2) devemos ter o seguinte:

$$\frac{d}{dt} Q = 0 \text{ ou } \frac{d}{dt} \int_0^{z_0} T dx = 0 \quad (3)$$

de (3) temos:

$$\frac{d}{dt} \int_0^{z_0} [T_m + T_v \cdot K_1 e^{-xC} x \text{ sen}(wt - xC - K_2)] dx = 0$$

$$\int_0^{z_0} [T_m + T_v \cdot K_1 e^{-xC} \text{ sen}(wt - xC - K_2)] dx =$$

$$= T_m z_0 + T_v \cdot K_1 \int_0^{z_0} e^{-xC} \text{ sen}(wt - xC - K_2) dx$$

$$\int_0^{z_0} e^{-xC} \cdot \text{ sen}(wt - xC - K_2) dx =$$

$$= \frac{e^{-xC}}{2C} [\cos(wt - xC - K_2) - \text{ sen}(wt - xC - K_2)] \Bigg|_0^{z_0} =$$

$$= \frac{e^{-Cz_0}}{2C} [\cos(wt - Cz_0 - K_2) - \text{ sen}(wt - Cz_0 - K_2)] -$$

$$- \frac{1}{2C} [\cos(wt - K_2) - \text{ sen}(wt - K_2)]$$

$$\int_0^{z_0} T dx =$$



$$\begin{aligned}
&= T_m z_0 + \frac{T_v K_1}{2C} \{ e^{-Cz_0} [\cos(wt - Cz_0 - K_2) - \\
&\quad - \sin(wt - Cz_0 - K_2)] - [\cos(wt - K_2) - \\
&\quad - \sin(wt - K_2)] \}
\end{aligned}$$

daí

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \int_0^{z_0} T dx &= \\
&= \frac{T_v K_1}{2C} w \{ e^{-Cz_0} [-\sin(wt - Cz_0 - K_2) - \\
&\quad - \cos(wt - Cz_0 - K_2)] - \\
&\quad - [-\sin(wt - K_2) - \cos(wt - K_2)] \} = 0 \\
e^{-Cz_0} [\sin(wt - Cz_0 - K_2) + \cos(wt - Cz_0 - K_2)] &- \\
- [\sin(wt - K_2) + \cos(wt - K_2)] &= 0 \tag{4}
\end{aligned}$$

$$\text{fazendo em (4) } \alpha = wt - K_2 \tag{5}$$

temos:

$$\begin{aligned}
e^{-Cz_0} [\sin(\alpha - Cz_0) + \cos(\alpha - Cz_0)] - [\sin\alpha + \cos\alpha] &= 0 \\
e^{-Cz_0} [\sin\alpha \cos Cz_0 - \sin Cz_0 \cos\alpha + \cos\alpha \cos Cz_0 + \\
+ \sin\alpha \sin Cz_0] - \sin\alpha - \cos\alpha &= 0
\end{aligned}$$

$$e^{-Cz_0} \operatorname{sen} \alpha (\cos Cz_0 + \operatorname{sen} Cz_0) + e^{-Cz_0} \operatorname{cos} \alpha (\cos Cz_0 - \operatorname{sen} Cz_0) - \operatorname{sen} \alpha - \operatorname{cos} \alpha = 0$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \alpha [e^{-Cz_0} (\cos Cz_0 + \operatorname{sen} Cz_0) - 1] &= \\ = \operatorname{cos} \alpha [e^{-Cz_0} (\operatorname{sen} Cz_0 - \cos Cz_0 + 1)] &\quad \text{donde} \end{aligned}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{e^{-Cz_0} (\operatorname{sen} Cz_0 - \cos Cz_0) + 1}{e^{-Cz_0} (\operatorname{sen} Cz_0 + \cos Cz_0) - 1}$$

$$\text{de (5)} \quad t = \frac{\alpha + K_2}{w} = \frac{\alpha + \operatorname{arc} \operatorname{tg}(C/C+H)}{0,262} \quad (6)$$

portanto  $H_1 = t_0 + t$  onde

$t_0$  - hora considerada como origem

## Parte 2 - Determinação de H2

A temperatura na superfície pode ser determinada fazendo  $x = 0$  em (1) e temos:

$$T = T_m + T_v K_1 \operatorname{sen}(wt' - K_2)$$

Evidentemente, a temperatura será máxima quando:

$$\text{sen}(wt' - K_2) = 1$$

o que implica em

$$wt' - K_2 = \frac{\pi}{2} \quad \text{donde } t' = \frac{\pi/2 + K_2}{w} \quad \text{ou}$$

$$t' = \frac{\pi/2 + \text{arc tg}(C/C + H)}{0,262}$$

portanto:  $H_2 = t' + t_0$

BIBLIOGRAFIA

1. C. L. MONISMITH, G. A. SECOR e K. E. SECOR, "Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete" - American Association of Pavement Technologists, vol. 34 - 1965.
2. P. B. STILL, "Thermal Stresses in Bituminous Flexible Pavements" Road Research Laboratory, Report LR 433.
3. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística, "Atlas Nacional do Brasil", Seção de Climatologia.
4. JACQUES DE MEDINA e HÉLIO FARAH, "Dados sobre a Temperatura de um Revestimento Betuminoso", Instituto de Pesquisas Rodoviárias 1965.
5. J. M. DUNCAN, C. L. MONISMITH, E. L. WILSON, "Finite Element Analysis of Pavements", trabalho preparado para ser apresentado na 47a. Reunião do Highway Research Board.
6. EDWARD S. BARBER, "Calculation of Maximum Pavement Temperature from Weather Reports", Boletim 168, Highway Research Board, 1957.
7. A. L. STRAUBB, H. N. SCHENCK JR., F. E. PRZYBYCIEN, "Bituminous Pavement Temperature related to Climate", Highway Research Record 256, Highway Research Board, 1968.
8. PIETER C. PRETORIUS, "Design Considerations for Pavements containing Soil Cement Bases", The Institute of Transportation and Traffic Engineering, Universidade da California.

9. F. N. FINN, "Factors involved in the Design of Asphalt Pavement Surfaces", National Cooperative Highway Research Program, Report 39, Highway Research Board, 1967.
10. Escritório de Meteorologia, "Normais Climatológicas", Vols. I, II, III e IV, Ministério da Agricultura.
11. H. B. SEED, F. G. MITRY, C. L. MONISMITH e C. K. CHAN, "Prediction of Flexible Pavement Deflection from Laboratory Repeated-Load Tests", National Cooperative Highway Research Program, Report 35, Highway Research Board, 1967.
12. Research Result Digest, National Cooperative Highway Research Program, dez. 1971.
13. CESAR AUGUSTO V. DE QUEIROZ, "Estudo da Deformação Vertical do Pavimento para o Dimensionamento de Recapeamento"; Tese de Mestrado, COPPE 1972.
14. C. L. MONISMITH, "A Design Framework for Asphalt Concrete Pavements using Available Theory", Summer Institute on Flexible Pavement Design and Performance, jun. 1973, Pennsylvania State University.
15. WILLIAM D. SELLERS, "Physical Climatology", The University of Chicago Press.
16. E. SALATI, A. CERVELLINI e outros, "Estimativa da Radiação Solar que atinge uma Superfície Horizontal Unitária na Ausência da Atmosfera", Serviço de Meteorologia, Boletim Técnico nº 6.

17. MARLENE M. PINTO, "Estimativa da Radiação Solar em Fortaleza", trabalho não publicado.
18. JESUS M. DOS SANTOS, LEANDRO R. RATISBONA e LUCIA M. PINTO CARNEIRO, "Estimativa da Distribuição Mensal da Radiação Solar no Estado do Rio de Janeiro", Serviço de Meteorologia, Boletim Técnico nº 3.
19. SMITHSONIAN INSTITUTE, "Smithsonian Meteorological Tables", 6a. Edição (1951).
20. E. SALATI, J. C. OMETTO, A. CERVELLINI, N. A. VILLANOVA, J. M. DOS SANTOS, "Estudo da Determinação de Radiação Solar em Piracicaba", Serviço de Meteorologia, Boletim Técnico nº 5.
21. FERNANDO SILVEIRA MOTA, "Manual de Instruções", Universidade de Pelotas.
22. S. PETERSEN, "Introduction to Meteorology", Mac Graw-Hill Book Company, Inc.
23. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, "Equipamento para medição de Temperatura numa laje de Aeroporto de Lisboa", Lisboa jul. 1971.
24. B. F. KALLAS, "Asphalt Pavement Temperatures", The Asphalt Institute, trabalho preparado para ser apresentado na Reunião Anual da Highway Research Board, 1966, em Washington D. C..
25. J. W. GALLOWAY, "Temperature Durations at various Depths in Bituminous Roads," Road Research Laboratory, Report LR 138, 1968.

26. P. J. WILLIAMSOM, "The estimation of Heat Output for Road-Heating Installations", Road Research Laboratory, Report LR 77, 1967.
27. C. S. DESAI e JOHN F. ABEL, "Introduction to the Finite Element Method", Van Nostrand Reinhold Company.
28. O. C. ZIENKIEWSKI, "The Finite Element Method in Engineering Science", Mac Graw-Hill Publishing Company Limited.
29. V. S. ARPACI, "Conduction Heat Transfer", Addison Wesley Publishing Company.
30. H. S. CARSLAW e J. C. JAEGGER, "Conduction of Heat in Solids", Oxford Press.
31. C. CAROLL, H. SCHENCK JR., W. WILLIAMS, "Digital Simulations of Heat Flow in Soils", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering - American Association of Civil Engineering, SM 4, jun. 1966.
32. C. L. MONISMITH, Y. M. SALAM, "Distress Characteristics of Asphalt Concrete Mixes", Publicação preparada para a 48a. Reunião anual da American Association of Pavement Technologists, Houston, Texas, fev. 1973.