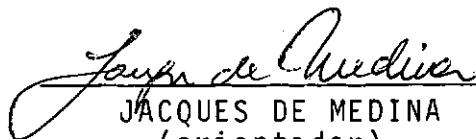


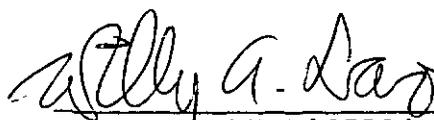
O ESTUDO DA TEMPERATURA EM REVESTIMENTOS BETUMINOSOS

- *Laura Maria Goretti da Motta* -

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:

  
JACQUES DE MEDINA  
(orientador)

  
WILLY LACERDA

\_\_\_\_\_  
MARCIO MIRANDA SOARES

\_\_\_\_\_  
MURILLO LOPES DE SOUZA

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
FEVEREIRO DE 1979

## AGRADECIMENTOS

- Ao professor Jacques de Medina, pela orientação e interesse mostrados durante toda a pesquisa.
- Ao professor João Previtera Filho, pelo incentivo e supervisão efetiva nos primeiros meses de trabalho.
- Ao professor Avelino Gonçalves Kock Torres, da FEUFJF que, com suas aulas, me entusiasvou para a Mecânica dos Solos.
- Aos professores da área de Mecânica dos Solos da COPPE, que mostraram o quanto existe para eu aprender.
- Ao Dr. Mário Kabalem Restom, pelo apoio, e ao Núcleo de Desenvolvimento Tecnológico de Transportes e de Trânsito, que através do convênio COPPE/IPR financiou os trabalhos. Ao IPR, pela colaboração e financiamento.
- Aos meus pais, irmãos, Juçara e Ricardo, pelo incentivo e compreensão.
- A Fátima, pelos desenhos caprichados; a Cirlei, pela datilografia cuidada.
- A Sandra, pela boa vontade durante todo o ano, na assistência e datilografia de trabalhos e relatórios.
- A todos os colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos, especialmente Gilson e Álvaro, que auxiliaram nas tarefas, pelo apoio e pelo ambiente amigo.

\* \* \*

S I N O P S E

Estuda-se a influência da temperatura de revestimentos betuminosos no comportamento dos pavimentos flexíveis, em especial, quanto às deflexões, através de uma pesquisa experimental realizada num painel de pavimento da COPPE/UFRJ e na pista experimental de Imbituba, na BR-101, Santa Catarina, do IPR/DNER.

Na revisão bibliográfica sobre os efeitos da temperatura e os métodos de estimativa dos perfis de temperatura, apresentam-se vários comentários próprios.

Descreve-se a experimentação de campo, a aparelhagem utilizada (termopares e registrador automático), e os resultados obtidos durante vários meses de pesquisa.

Evidencia-se, da análise dos dados, o interesse e a necessidade de se considerar a temperatura nos estudos deflecométricos, e sugerem-se pesquisas complementares.

Este trabalho foi realizado graças ao patrocínio do Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

A B S T R A C T

The effects of temperature of bituminous surface layers are studied on the behavior of flexible pavements, mainly concerning deflections, are studied using data from a paving panel at COPPE/UFRJ and an experimental road section at Imbituba, federal highway BR-101, State of Santa Catarina, IPR/DNER.

A commented bibliography on temperature effects and methods for predicting temperature profiles is presented.

Description is made of the field work, equipment (thermocouples and automatic register) used, and results obtained after several months.

From the data analysis it is confirmed the importance of temperature effects and the need for temperature being taken into account in deflection measurements. Further research is suggested.

This work was made possible through the sponsorship of the Road Research Institute, Federal Department of Highways.

O ESTUDO DA TEMPERATURA EM REVESTIMENTO BETUMINOSOS

I - Introdução

II - Revisão bibliográfica

2.1. - Breve comentário sobre propriedades térmicas características dos revestimentos.

2.2. - A temperatura e seus efeitos.

2.2.1 - O efeito da temperatura nas deflexões

2.3. - Estimativa de perfis de temperatura

III - Experimentação de campo

3.1. - Aparelhagem e instalação

3.2. - Perfis de temperatura obtidos

3.3. - Deflexões "versus" temperatura

IV - Métodos de previsão da temperatura

4.1. - Barber

4.2. - Southgate

V - Conclusões

VI - Sugestões de pesquisa

Referências bibliográficas

## I - Introdução

Os pavimentos estão sujeitos à ação do clima de forma mais direta e intensa, que a maioria das estruturas que interessam ao engenheiro civil. O ambiente influi nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais, na velocidade de ataque dos agentes físico-químicos, e gradual perda de integridade estrutural dos pavimentos.

Os dois fatores que melhor representam a ação climática são a temperatura e a umidade, sendo que o presente estudo se detém na ação da temperatura.

A tendência à variação de volume por ação térmica resulta em tensões internas no pavimento, independentemente do carregamento do tráfego.

A temperatura dos pavimentos é função de fatores extrínsecos e intrínsecos. Os extrínsecos são as condições ambientais (temperatura do ar, radiação solar, ventos e pluviosidade) e a situação geográfica condicionante. Os fatores intrínsecos referem-se, sobretudo, às propriedades térmicas dos materiais do pavimento, em particular as do revestimento betuminoso, mas incluem também, a emissão de radiação na terra e, por extensão, os fatores geológicos da região.

O estudo da temperatura de pavimentos flexíveis é muito importante visto terem as misturas betuminosas comportamento visco-elástico e serem sensíveis aos gradientes térmicos.

O asfalto amolece com o aumento da temperatura e enrijece quando a temperatura decresce, o que afeta, marcadamente, o comportamento do revestimento pela variação da sua viscosidade e alteração das razões de módulos de deformação das camadas que formam o pavimento.

Isto enfatiza a necessidade de se medir ou conhecer, de alguma forma, o perfil de temperaturas do pavimento quando se vai medir tensões dinâmicas ou deflexões sob o tráfego de veículos.

Embora existam diversas pesquisas no exterior sobre o assunto, é importante conhecer o perfil real de temperaturas dos nossos pavimentos visto que a temperatura e seus efeitos são grandemente afetados pelas condições climáticas locais.

Em países quentes, como o Brasil, que mesmo em suas regiões mais frias, não apresentam temperaturas mínimas muito baixas, quase nunca menores que  $0^{\circ}\text{C}$ , as altas temperaturas e sua duração é que merecem especial atenção no projeto e análise do desempenho do pavimento, assim como nas pesquisas de laboratório.

As propriedades térmicas dos materiais que compõem o pavimento têm influência no ganho ou perda de temperatura a um dado nível da estrutura. Assim, as características de absorção, calor específico, condutividade térmica e difusividade são fatores importantes no perfil de temperaturas do pavimento.

Características de cor da superfície do pavimento também influenciam a distribuição de temperaturas, sendo relatado em trabalhos de pesquisa a ocorrência de maiores temperaturas em superfícies betuminosas escuras do que em superfícies de concreto de cimento, mais claras. Evidentemente por serem sempre de cor preta a cinzenta, as superfícies betuminosas absorvem muito mais radiação solar que as outras, além de apresentar textura áspera devido ao desgaste. Este é um aspecto importante em nosso país, pois temos elevados índices de radiação solar durante quase todo o ano.

A preocupação com a influência do clima nos pavimentos, levou à linha de pesquisas na COPPE referente ao efeito da temperatura, em particular. A primeira tese de Mestrado sobre o assunto deve-se a João Previtiera Filho (1974). Seguiu-se a construção de um painel experimental, o qual foi instrumentado com termopares, a fim de obter as primeiras informações sobre temperatura a várias profundidades de um pavimento no Brasil.

O conhecimento dos perfis de temperatura, com suas variações diárias e sazonais, os dados de condições atmosféricas e as propriedades de transferência de calor do concreto as

fáltico, forneceriam elementos para estabelecer um método de previsão de temperaturas no país, ou quando mais não fosse, o regime de variação dessas temperaturas comparativamente a de outros países e regiões.

Existe controvérsia sobre a influência da temperatura nas medidas de deflexões recuperáveis do pavimento. Algumas medições que visavam obter elementos sobre este aspecto foram feitas no painel experimental da COPPE e na pista experimental de areia-cal-cinza volante, do DNER, localizada próximo a Imbituba, na BR-101, Santa Catarina. Nesta pista foram instalados, em duas seções, pares termo-elétricos para medição de temperaturas.

O comportamento visco-elástico das misturas betuminosas é influenciado pela temperatura porque o ligante betuminoso - asfalto ou alcatrão - modifica-se fisicamente com a mudança de temperatura. O alcatrão e o asfalto diferem na origem e modo de obtenção, mas têm propriedades viscoelásticas similares, embora a viscosidade do alcatrão seja mais susceptível à temperatura. O alcatrão é pouco usado no país.

Sob cargas dinâmicas verifica-se, também, a influência da temperatura, cujo aumento causa o decréscimo do módulo resiliente ou da rigidez do revestimento, o que repercute nas tensões e deformações e, conseqüentemente, nas deflexões do pavimento.

\* \* \*

## II - REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1. - Breve comentário sobre as propriedades térmicas características do revestimento.

Os fatores intrínsecos do pavimento que influem no perfil de temperatura do mesmo são variáveis em diversos aspectos, mas, esta variação é muito pequena se comparada com as condições climatológicas dinâmicas que ocorrem causando grandes flutuações nos fatores extrínsecos atmosféricos.

Não se mediu nenhuma propriedade térmica do asfalto em laboratório, nesta pesquisa. Portanto, os elementos empregados, as características e propriedades aqui descritas são obtidas somente por consulta bibliográfica a respeito.

No estudo das propriedades térmicas dos materiais do pavimento deve-se conhecer a condutividade térmica, o calor específico e os coeficientes de expansão linear e cúbica.

A condutividade térmica é a constante que aparece na expressão da primeira lei de Fourier de condução do calor:

$$Q = -K.A. (dT / dx)$$

em que Q é a quantidade de calor que passa, por unidade de tempo, através da área A, numa direção  $x$  que lhe é perpendicular, quando há um gradiente de temperatura  $dT/dx$ , cuja unidade é  $\text{cal/s. cm}^{\circ}\text{C}$ . Metais como o cobre, ouro e prata, excelentes condutores de calor, tem um K de  $1 \text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}$  ( $360 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$ ) e os maus condutores, líquidos e gases,  $10^{-3}$  a  $10^{-4} \text{ cal/s.cm.}^{\circ}\text{C}$  ( $0,36$  a  $0.036 \text{ Kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$ ).

O calor específico é o quociente da quantidade infinitesimal de calor fornecida a uma unidade de massa de uma substância pela variação infinitesimal de temperatura resultante deste aquecimento.

$$C_p = \frac{dq_p}{dT} \quad (\text{a pressão constante}).$$

O coeficiente de expansão (ou dilatação) linear ,

$\alpha$ , é a variação da dimensão linear por variação da temperatura, por unidade de comprimento:

$$\alpha = \left( \frac{1}{L} \right) \left( \frac{\partial L}{\partial T} \right)$$

O coeficiente de expansão (ou dilatação) volumétrico é:

$$\beta = \left( \frac{1}{V} \right) \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p, \text{ costuma ser nos sólidos e líquidos três vezes o coeficiente } \alpha.$$

Alguns valores encontrados na bibliografia (Finn (1967); Siemens AG (1976) vêm a seguir:

Material	Absorção solar %	Condutividade térmica (Kcal/m. °C.h)	calor específico Kcal/Kg °C	Coef.exp. linear °C <sup>-1</sup>
Concreto asfáltico	85-95	0,7 - 1,3	0,220	$2 \times 10^{-5}$
Concreto cimento Portland	60-70	0,5 - 1,1	0,210	$9,14 \times 10^{-6}$
Agregados		1 - 2	0,190 0,177(quartzo)	

A condutividade térmica do concreto asfáltico é baixa e seu calor específico difere pouco do dos agregados.

Por sua condutividade térmica baixa, o material asfáltico permite que nele se estabeleçam gradientes térmicos já que não transmite bem o calor que recebe, o que induz altas tensões térmicas no material.

Seu coeficiente de expansão volumétrico é cerca de 1/10 do da água e próximo do de metais.

Portanto, a característica térmica do concreto asfáltico é a baixa condutividade aliada à alta absorção das radiações.

As misturas asfálticas do pavimento por suas características de elevada absorção da radiação solar na superfície e baixa condutividade, desenvolvem altos gradientes térmicos, com temperaturas decrescentes em profundidade. A reirradiação

e a convecção invertida que ocorrem a partir do entardecer invertem esses gradientes térmicos, ou durante o dia, quando há uma precipitação ou a incidência de sombra.

O conhecimento da variação diária e sazonal da temperatura em um pavimento, permitiria avaliar as mudanças das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, a várias épocas do ano.

\*

\*

\*

## 2.2 - A temperatura e seus efeitos

Dentre as propriedades do concreto asfáltico que variam com a temperatura, podem ser destacadas a resiliência, a estabilidade e a viscosidade de massa.

De *Queiroz e Visser (1978)* tiramos a figura 1 que mostra a variação do módulo resiliente de amostras de concreto asfáltico e de camadas de tratamento superficial de estradas brasileiras. É notória a influência da temperatura no módulo resiliente de ambos os tipos de revestimento, mesmo sendo amostras de pavimentos com vários anos de uso.

De *ASTM, STP 252*, temos a figura 2 que mostra a variação da estabilidade Marshall com a temperatura de ensaio. A amostra é de boa qualidade como demonstra sua alta estabilidade, e mesmo assim pequenas variações da temperatura de ensaio influem muito sobre os resultados de estabilidade. A estabilidade do concreto asfáltico é resultante das propriedades cimentantes do ligante (coesão) e do equilíbrio mecânico dos agregados (atrito interno). A sua componente dependente do material viscoelástico (ligante betuminoso) é afetada pela temperatura de ensaio ( $60^{\circ}\text{C}$ ), que se pretende seja bastante alta para representar condições desfavoráveis; ora, em regiões quentes não se está assegurando a mesma margem de segurança quanto à estabilidade que nas regiões de definição da norma de ensaio.

Isto ainda pode ser visto na figura 3, onde se mostra a variação da "coesão de Hveem", que é um módulo empírico de resistência à tração, determinada no coesímetro, com a temperatura, bem como com o tipo de mistura, exemplo tirado de um trabalho de *Hveem e Sherman (1963)*.

Outras características do pavimento também são afetadas pelas condições atmosféricas. Assim, por exemplo, a resistência à derrapagem varia de uma estação para outra, em parte devido à temperatura variável do revestimento.

*Yang (1972)* mostra como a resistência à derrapagem tende a decrescer com o aumento da temperatura, variando a razão com a textura da superfície e com a viscosidade do revestimento. Deste trabalho é a figura 4, aqui apresentada, que

indica exemplos de variação do coeficiente de atrito pneu-pavimento com a temperatura do revestimento.

A durabilidade do concreto asfáltico ao longo do tempo é afetado pelo seu envelhecimento e a ação abrasiva do tráfego. O nível de condições de serviço do revestimento decresce com o tempo devido às deformações produzidas pelo tráfego, ao trincamento de retração ou fadiga e à desintegração dos materiais devido às cargas e à ação do clima. Correlaciona-se a durabilidade com os resultados de ensaios simples tal como o de película delgada, fixando-se limites empíricos para estes valores, que também são dependentes da temperatura.

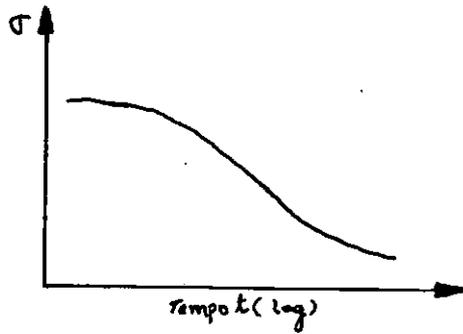
Segundo *Monismith e outros (1965)*, os gradientes de temperatura provocam tensões que podem causar fissuramento do pavimento. Este fissuramento, devido à retração térmica, é transversal à direção do tráfego e uniformemente espaçado. A contração do revestimento é contrariada pela camada de base, e resultam tensões de tração, que, ao excederem a resistência à tração, originam o trincamento.

Este fenômeno ocorre principalmente a baixas temperaturas, mas, também, ocorre quando um súbito esfriamento da superfície causa uma considerável redução na resistência à fratura do concreto asfáltico, permitindo o desenvolvimento das fissuras.

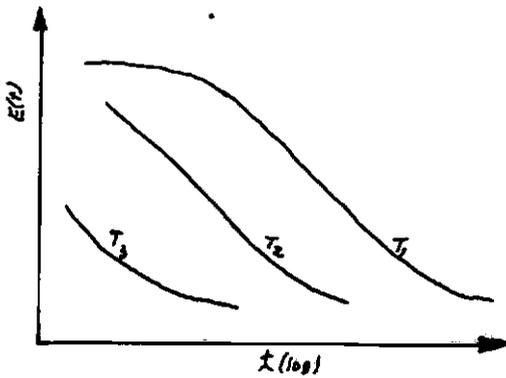
Um material viscoelástico tem suas características de tensão-deformação dependentes tanto da temperatura quanto do tempo. Assim, para este tipo de material, o módulo de relaxação dependerá da temperatura e pode ser definido por:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0}$$

estando o material a uma temperatura constante, se uma deformação de tração  $\epsilon_0$  é aplicada no tempo zero, e mantida, a tensão inicial desenvolvida decairá com o tempo segundo uma curva esquetizada abaixo:

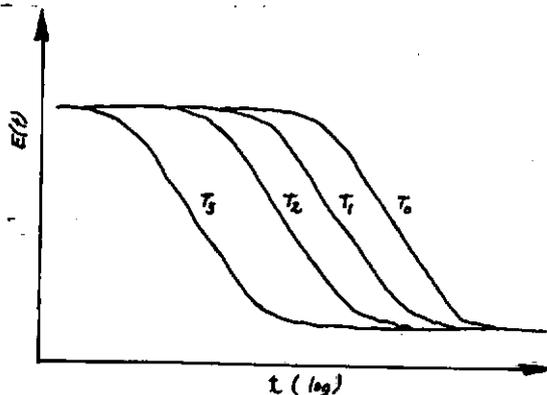


Fazendo-se uma sêrie de ensaios a diferentes temperaturas, obtem-se uma família de curvas de mōdulo de relaxa - ção versus tempo:



$T_1 < T_2 < T_3$  : quanto maior a temperatura menor a relaxação.

Se o material tem comportamento termo-reolōgico simples, a curva do mōdulo de relaxação versus tempo somente so fre translação segundo o eixo dos tempos, mas sem mudar de forma.



Se o mesmo material termoreologicamente simples ê sujeito a ensaio de "creep" sob tração (uma tensão,  $\sigma_0$ , ê aplicada no tempo zero e a deformação se modifica com o tempo), te mos o "creep compliance" definido como

$$D(t) = \frac{E(t)}{\sigma_0}$$

obtendo-se curvas "compliance" versus tempo semelhantes às do módulo de relaxação.

Pelas suas características e comportamento, o concreto asfáltico pode ser representado, para fins práticos, como um material viscoelástico linear termo-reologicamente simples.

Através de ensaios em laboratório, *Monismith e outros (1965)* chegaram à conclusão de que é possível com razoável confiança, prever tensões ou deformações resultantes da variação de temperatura usando dados de ensaios de "creep" em amostras de concreto asfáltico, analisados com a teoria viscoelástica.

Dado  $E(t)$ , a várias temperaturas,  $\alpha_0$  (coeficiente de expansão térmica) e a distribuição de temperaturas  $T(z,t)$ , é possível prever as tensões térmicas no revestimento. O módulo  $E(t)$  pode ser obtido por ensaio de relaxação de tensão uniaxial ou por conversão do módulo de "creep", obtido no ensaio de "creep" uniaxial. O coeficiente de expansão térmica também pode ser obtido experimentalmente, enquanto a distribuição de temperatura  $T(z,t)$  é obtida da solução da equação de condução de calor.

*Still (1972)* mostra que os valores de tensão térmica no revestimento, quando uma chuva produz uma queda brusca de temperatura na superfície, podem chegar a  $100\text{KN/m}^2$  ( $100\text{Kg/cm}^2$ ) quando as temperaturas envolvidas estão próximas a  $0^\circ\text{C}$ .

*Monismith e outros (1965)* indicam para baixas temperaturas uma resistência do concreto asfáltico da ordem de  $50\text{Kg/cm}^2$  (700 psi), valor que decresce quando a temperatura cresce.

Mas este problema de contração não é tão importante para nós visto não termos temperaturas tão baixas, normalmente.

Materiais que aumentam de volume quando a temperatura cresce têm um coeficiente de expansão térmica definido por:

$$\beta = \frac{\Delta V}{\Delta T V_0}$$

onde:

$\beta$  = coeficiente de expansão térmica cúbica

$V_0$  = volume a uma temperatura de referência

$\Delta V$  = variação de volume devido a  $\Delta T$  que é a variação da temperatura em relação à referência.

Definindo o coeficiente de expansão térmica linear como:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T \cdot L_0} \quad , \quad \text{sendo } L_0 \text{ o comprimento à temperatura } T_0$$

podemos dizer que, se o material tem a mesma expansão térmica em todas as direções, material dito isotrópico, então:  $\alpha = \frac{\beta}{3}$

*Monismith e outros (1965)* apresentam algumas conclusões quanto ao coeficiente de expansão do concreto asfáltico tais como:

- aumentando-se a porcentagem de asfalto, aumenta-se a expansão do concreto asfáltico;
- o coeficiente de expansão térmica é praticamente o mesmo para cimentos asfálticos com grau de penetração 60-70 e 85-100 ( $1,8 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  e  $7,0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ );
- os coeficientes teóricos calculados para as misturas variam aproximadamente em proporção com o coeficiente térmico e o volume do respectivo componente na mistura;
- a média dos coeficientes de expansão térmicas linear é da ordem de  $1,1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{F}$  e volumétrico é de  $3,9 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{F}$ .

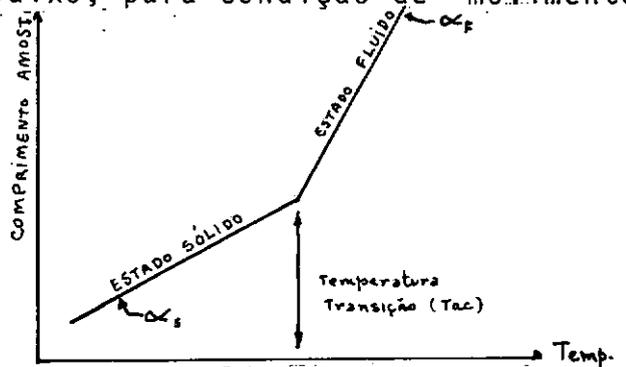
*Segundo Jones e outros (1968):*

O cimento asfáltico tem dois coeficientes de expansão chamados coeficientes de "glassy" e fluido, sendo a temperatura de transição chamada  $T_g$  (temperatura "glass").

Acima de  $T_g$ , onde atua o coeficiente fluido, o tempo, a velocidade de carregamento e a temperatura tornam-se fatores importantes para os asfaltos, que tem propriedades viscoelásticas.

O concreto asfáltico tem um comportamento expansão-contracção esquematizado abaixo, para condição de movimento livre:

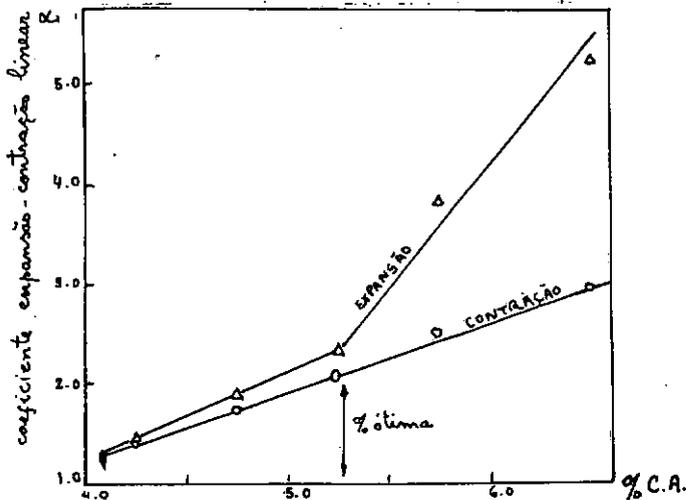
$T_{ac}$  - temperatura transição  
 $\alpha_F$  - Coef. expansão { fluído  
 $\alpha_S$  - { sólido  
 Sólido  $\times T_{ac} <$  fluído



O asfalto tem um coeficiente de expansão térmica 12 vezes maior que o agregado de quartzo no estado sólido e 21 vezes maior no estado fluído. É natural então que a porcentagem de asfalto contribua significativamente para a expansão-contracção térmica do concreto asfáltico.

Para o estado sólido, um aumento de 1% na porcentagem de asfalto aumenta  $\alpha$  de  $0,37 \times 10^{-5}/^{\circ}F$  ( $0,67 \times 10^{-5}/^{\circ}C$ ).

Para o estado fluído, que nos interessa mais por ser correspondente a altas temperaturas, que é o nosso caso, a relação de  $\alpha \times \% \text{ cimento asfáltico}$  é mais complexa, variando para expansão e contracção diferencialmente: ( $\alpha_F \times 10^{-5}$ ).



Na contracção a relação  $\alpha_F$  versus % asfalto é linear e única enquanto na expansão, amostras com % asfalto maiores que a ótima apresentam maior crescimento de  $\alpha_F$  com % asfalto.

O concreto asfáltico apresenta propriedades viscoelásticas em todas as temperaturas, tanto sólido quanto fluído, ao contrário do cimento asfáltico que é elástico abaixo de  $T_g$ ,

e viscoelástico acima.

A temperatura de transição do concreto asfáltico  $T_{ac}$  é muito diferente da temperatura de transição do cimento asfáltico  $T_g$ , devido à presença do "filler" e outros materiais, no concreto.

Jones (1968) apresenta para um concreto com porcentagem ótima de asfalto,  $T_{ac} = 78,2^{\circ}\text{F}$  ( $26^{\circ}\text{C}$ ), enquanto  $T_g = -27^{\circ}\text{F}$  ( $-33^{\circ}\text{C}$ ), sendo portanto a diferença de  $100^{\circ}\text{F}$  ( $59^{\circ}\text{C}$ ) entre as duas transições.

A temperatura de transição do concreto asfáltico decresce quando a porcentagem de asfalto cresce.

O concreto asfáltico é uma combinação de cimento asfáltico, agregados e vazios de ar. A variação de volume total com a temperatura deve-se à combinação das mudanças de volume dos componentes.

A variação de volume de cimento asfáltico e dos agregados é proporcional ao volume de cada um na mistura e é dada pelo coeficiente de expansão volumétrica de cada componente.

Já os vazios tem um comportamento menos fácil de esquematizar.

Os vazios de ar, são por definição, a diferença entre o volume total de concreto asfáltico e a soma dos volumes de asfalto e agregados. Apresentam-se com pequenas cavidades de ar aprisionadas na mistura compactada e diferindo muito dos outros elementos por serem compressíveis.

Quando se compacta a mistura, o ar dos vazios fica sob pressão não conhecida, e não se sabe se existe relaxação com o tempo. A expansão térmica do ar é 100 vezes maior que a expansão do concreto asfáltico ( $\beta = 20,4 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{F}$  para o gás ideal = ar). Portanto o ar aquecido exercerá pressão sobre os agregados e asfalto causando "creep" viscoelástico ou fluimento do ligante. Porém é extremamente difícil quantificar o efeito do ar dos vazios na expansão térmica do concreto asfáltico.

Quando o concreto esfria e se contrai, o ar dos vazios esfria também, causando uma sucção que aumenta a contração do concreto, mas este efeito é pequeno em proporção à contração total.

Se o ar aumenta a expansão e não tem efeito na

contração, o coeficiente de expansão deve ser maior que o de contração, o que realmente ocorre tanto no estado fluido quanto no sólido.

A porcentagem de cimento asfáltico também tem influência nos coeficientes. O coeficiente de expansão é maior nas amostras com porcentagem de asfalto maior que a ótima, mas na contração isto não ocorre. O crescimento do coeficiente de expansão com o aumento da porcentagem de asfalto pode ser explicado pelo "creep" que ocorre no excesso de ligante.

Os ensaios para se medir os coeficientes de expansão-contração são feitos em amostras sob duas possíveis condições: movimento livre da base ou atrito na base.

Para base livre, o concreto asfáltico expande muito, mais do que contrai, no estado fluido, resultando numa elongação permanente da amostra após um ciclo de temperatura; esta elongação crescendo com a porcentagem de asfalto. Isto porque há maior energia na expansão que na contração devido à atuação da pressão de ar dos vazios que só ocorre no aquecimento, empurrando os agregados e, portanto, causando deformação permanente.

Na condição de atrito na base, a expansão é menor que a contração, resultando em uma redução de volume permanente a cada ciclo de temperatura.

O coeficiente de expansão do ligante é 21 vezes maior que o do agregado e 17 vezes maior que o do concreto asfáltico, admitindo-se então que o ligante expanda para dentro dos vazios devido à restrição da expansão da amostra pelo atrito. Quando há o resfriamento o ligante não volta todo à sua posição original causando uma redução de volume, no estado fluido. Outra possibilidade é de que o ligante seja absorvido pelo agregado se este tiver alto coeficiente de absorção.

Os ensaios sob condição de atrito na base, apresentam contração permanente e representam bem o mecanismo de fissuramento transversal dos pavimentos por efeitos térmicos.

Como o efeito do ar dos vazios não é facilmente expresso matematicamente, as tentativas de criar uma fórmula teórica para cálculo do coeficiente de expansão terão que desprezar este efeito, e sendo de se esperar que os resultados teóri

cos, então, sejam menores que os experimentais.

*Jones e outros (1968)* apresentam:

$$\beta_{\text{misturas}} = \frac{V_{\text{concreto asfáltico}} \times \beta_{\text{ca}} + V_{\text{agregado}} \times \beta_{\text{ag}}}{V_{\text{mistura}}} + K$$

sendo K a parcela devida à pressão do ar.

Para efeitos práticos K é considerado nulo, adotando-se que o ar dos vazios não tenha efeito mensurável na contração.

Mas existe boa correlação entre o coeficiente de expansão-contração calculado por esta fórmula e os medidos experimentalmente.

$$\beta_{\text{mistura}} = \frac{V_{\text{concreto asfáltico}} \times \beta_{\text{ca}} + V_{\text{agregado}} \times \beta_{\text{agregado}}}{V_{\text{mistura}}}$$

As conclusões de *Jones e outros (1968)* são as seguintes:

- 1) O concreto asfáltico apresenta dois coeficientes de expansão térmica diferentes, entre  $-10^{\circ}\text{F}$  ( $23^{\circ}\text{C}$ ) e  $140^{\circ}\text{F}$  ( $60^{\circ}\text{C}$ ) que são chamados de coeficientes sólido e fluido. Existe uma temperatura de transição  $T_{ac}$ , acima da qual o concreto é fluido, e abaixo é sólido.
- 2) A temperatura de transição do concreto asfáltico varia com a porcentagem de asfalto, entre  $70$  e  $86^{\circ}\text{F}$  ( $21$  e  $30^{\circ}\text{C}$ ) para várias porcentagens de ligante. Quanto maior a porcentagem menor  $T_{ac}$ . A temperatura de transição do ligante,  $T_g$  (glass) é muito menor que  $T_{ac}$ , sendo explicado esta diferença pela presença do filler mineral no concreto.
- 3) O concreto asfáltico apresenta diferentes características de expansão-contração térmica, dependendo das condições de ensaio: movimento livre ou atrito na base.

No estado sólido, os coeficientes são iguais para ambas as condições de atrito ou livre; no estado fluído tem-se coeficien

tes menores na condição de atrito na base. A expansão térmica no estado fluído depende do grau de atrito na base.

4) O cimento asfáltico é o maior contribuidor da expansão - contração do concreto asfáltico. Quanto maior a porcentagem de asfalto, maior a expansão-contração térmica. Um aumento de 1% de asfalto em peso na mistura causa um acréscimo de 25% nos coeficientes, no estado sólido.

5) Obteve-se uma relação para prever o coeficiente de expansão - contração térmica do concreto no estado sólido:

$$\beta_{\text{mis}} = \frac{V_{\text{ac}} \beta_{\text{ac}} + V_{\text{ag}} \beta_{\text{ag}}}{V_{\text{mis}}} \quad (1) \quad \left( \alpha = \frac{\beta}{3} \right)$$

$\beta_{\text{ac}}$  e  $\beta_{\text{ag}}$  obtidos com dilatômetro.

$\beta_{\text{mis}}$  experimental é 7% maior que o teórico (1), na porcentagem ótima de ligante (porque se despreza efeito do ar dos vazios).

6) O concreto asfáltico apresenta coeficientes diferentes para expansão e contração. No estado sólido o coeficiente de expansão é 4% maior que o de contração. No estado fluído é de 5 a 43% maior, sob condições de movimento livre. Na expansão o ar exerce pressão e causa "creep" visco-elástico no ligante.

7) No estado fluído, observa-se uma elongação permanente no concreto asfáltico após aquecido e resfriado, sob movimentos livres.

Em condição de atrito na base, o concreto apresenta contração permanente. A expansão é menor que a contração no estado fluído, resultando redução permanente, fenômeno atribuído à absorção do asfalto pelo agregado e pela densificação do concreto causada pelo processo irreversível da expansão do asfalto para dentro dos vazios da mistura. O fenômeno da contração permanente tem muita ligação com o fissuramento transversal regular dos pavimentos.

Nunn (1973) faz um estudo sobre o efeito da temperatura no comportamento de fadiga dos pavimentos betuminosos, partindo do conhecimento de que a temperatura da camada betuminosa influencia suas propriedades elásticas o que afeta a distribui -

ção de tensões-deformações do pavimento e assim o grau de fadiga causado pela passagem das cargas. Ele se propõe a analisar teoricamente a profundidade e as temperaturas mais críticas para a fadiga.

Considerou *Nunn* (1973) um pavimento hipotético, de temperaturas constantes nas suas várias camadas, e chegou às conclusões seguintes:

- a temperatura tem um importante efeito nas tensões e deformações horizontais da base tratada com materiais betuminosos, influenciando a razão modular (RM) entre a base e sub-base. Quando a temperatura do pavimento cresce, RM decresce;
- a deformação radial total de tração no fundo da base é máxima quando  $RM \approx 1,0$ , é isto corresponde a uma determinada temperatura. Nesta condição as tensões horizontais de tração são muito baixas e as maiores deformações de tração são produzidas pelo efeito de Poisson da tensão vertical de compressão. Quando a temperatura for alta a deformação máxima de tração não ocorrerá no fundo da base, porém nas camadas superiores onde as tensões são exclusivamente de compressão;
- o exemplo considerado na análise de *Nunn* foi mais sensível à fadiga nas temperaturas entre 30 e 45°C, dependendo de qual parâmetro se usa na determinação do desempenho à fadiga, se deformação principal (efeito direto da tração) ou total (considerando efeito de *Poisson*);
- o somatório dos efeitos de fadiga causados pela passagem das cargas, a uma determinada temperatura, é uma função da sensibilidade do pavimento à fadiga e da duração desta temperatura;
- o efeito do gradiente de temperatura ao longo das camadas de base e sub-base não foi considerado por ser julgado desprezível.

Vemos que as temperaturas elevadas são mais propícias ao desenvolvimento da fadiga nos pavimentos como um todo.

*Bissada* (1972) que escreve sobre temperaturas de pavimentos no Kuwait, país muito quente, relata algumas conclusões importantes sobre as altas temperaturas.

Medições efetuadas no Aeroporto Internacional do Kuwait com termômetro de mercúrio apresentaram uma temperatura máxima de  $84^{\circ}\text{C}$  na superfície, no verão, com uma média mensal máxima de  $76^{\circ}\text{C}$ .

Os métodos normais, de projeto adotam  $60^{\circ}\text{C}$  para especificar estabilidade mínima, limite de deformação e índice de vazios da mistura. *Bissada* diz que o projeto e a avaliação das misturas asfálticas a altas temperaturas ( $>60^{\circ}\text{C}$ ) devem ter procedimentos de ensaio diferentes porque as propriedades mecânicas e viscoelásticas do concreto asfáltico não são lineares com a temperatura. Mas reconhece a dificuldade existente em se especificar restrições químicas e físicas para ligante e agregados em condições de serviço superiores a  $60^{\circ}\text{C}$ .

O princípio da deformação de tração horizontal (radial) no asfalto e da deformação de compressão vertical na superfície do subleito é altamente dependente das condições de temperatura no pavimento porque uma variação de temperatura provoca variação na rigidez do concreto asfáltico, assim como variação do módulo resiliente das diversas camadas.

O projeto de pavimento asfáltico para altas temperaturas deve ser controlado pelo critério da deformação vertical de compressão no topo do subleito, ao contrário dos climas frios que usam a deformação horizontal de tração no asfalto.

Outra consideração que *Bissada* fez é de que a espessura necessária de concreto asfáltico em condições de altas temperaturas é maior que a necessária em climas frios, para a mesma carga de roda e condições de subleito e base, por causa do efeito da temperatura sobre as propriedades de transmissão de carga e estabilidade do pavimento. É certo que a temperatura, ao influir no comportamento do concreto asfáltico, pode, inclusive, influir no coeficiente estrutural deste, e assim o dimensionamento de um pavimento deveria considerar o efeito das temperaturas máximas e mínimas esperadas da região.

Muitos trabalhos já foram publicados e muitas pes

quisas já foram feitas para se conhecer o perfil de temperaturas em pavimentos. A maioria por<sup>em</sup>, em climas frios, com maiores porcentagens de baixas temperaturas durante o ano do que altas.

A maioria das medições foram feitas empregando termopares e alguns pesquisadores tentaram utilizar os dados experimentais segundo diversas teorias para obterem uma maneira de prever as temperaturas dos pavimentos.

Os resultados experimentais e as conclusões dos trabalhos estudados foram bem semelhantes e de maneira geral podem ser agrupados como segue.

Quanto à forma das curvas de temperatura "versus" tempo para cada profundidade, observa-se uma grande tendência para um ciclo típico aproximadamente senoidal, tanto em um período curto de tempo (24 horas) quanto por um período longo de um ano.

Um dia quente de verão, totalmente ensolarado apresenta curvas típicas nas quais pode-se notar que as máximas e mínimas temperaturas, a cada profundidade, ocorrem em tempos diferenciados.

Quanto maior a profundidade, maior o tempo gasto para se atingir a máxima (ou a mínima) temperatura, maior defasagem em relação ao tempo gasto pela superfície para atingir ao seu máximo, e menores as variações térmicas.

A forma das curvas de temperatura versus tempo no inverno é a mesma que no verão, por<sup>em</sup> as temperaturas máximas são menores que as do verão, e as mínimas são também menores.

As curvas temperatura versus tempo para as diversas profundidades são grandemente influenciados por muitos fatores climáticos tais como chuva e nebulosidade, principalmente à superfície, decrescendo estas influências com a profundidade.

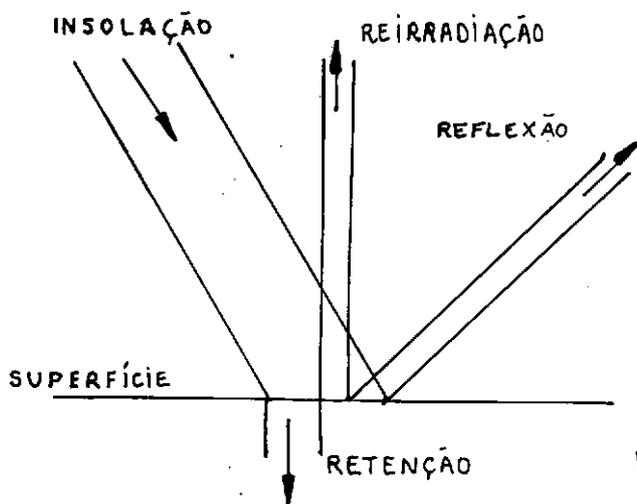
Medina e Farah (1965) observaram as temperaturas de um revestimento betuminoso com um termômetro de superfície e um termômetro metálico instalado em um furo com óleo, ao mesmo tempo que observavam as condições atmosféricas e a temperatura do ar. Mesmo com estes elementos simples, puderam observar a in

fluência da passagem de nuvens, chuvas repentinas ou longos períodos de chuva.

*Southgate* (1968) enumera os fatores que mais influenciam a temperatura da superfície, e esta, por sua vez, as de outras profundidades:

- a) Radiação solar
- b) Posição ou local do pavimento
- c) Hora do dia
- d) Condições climáticas : grau de insolação, chuva, neve, porcentagem de nuvens, vento, temperatura do ar e temperatura das camadas inferiores.

*Barber* (1957) considera a temperatura do ar como fator importante nas temperaturas do pavimento, e, através desta, a radiação solar. Mostra um esquema de fluxo de calor na superfície do revestimento, calor este advindo da radiação solar.



No seu trabalho *Barber* dá muita importância à radiação solar explicando muitos resultados a partir desta. A radiação solar e a insolação são uma função da estação e latitude do ponto considerado, sofrendo muito a influência das condições atmosféricas locais.

Cabe aqui fazer uma observação a respeito dos ter

mos "radiação solar" e "insolação".

Na tese de *Previtera* (1974), o apêndice 1 refere-se a radiação solar e seu cálculo teórico. Ali se define radiação solar como a energia calorífica incidente sobre a terra, proveniente do sol e que é fator importante no clima das regiões. Já insolação é o número de horas em que os raios do sol incidem sobre um ponto considerado. É usual definir-se e considerar -se a razão de insolação como sendo a relação entre o número de horas em que o sol não está encoberto por nuvens ( $n$ ) e o número possível de horas que o sol atua em cada dia ( $N$ ) ou seja, a duração teórica do dia. A razão de insolação  $\frac{n}{N}$  é um dos fatores que influencia a radiação solar e aparece nas fórmulas teóricas de cálculo desta.

*Straub* (1968) e *Przybycien* (1967) relatam a experiência que fizeram para verificar o que influencia mais a temperatura do pavimento, se a radiação solar ou a temperatura do ar, que são as principais causas de fluxo de calor através ou para o pavimento. Analisaram dois dias que receberam a mesma quantidade de radiação solar, porém apresentaram temperaturas do ar diferentes. A diferença na temperatura do ar entre os dois dias, de tarde, foi de  $13^{\circ}\text{C}$ , contudo, a diferença entre os picos máximos de temperatura correspondente a profundidade de 0,25 polegadas (0,63 cm) foi somente  $6^{\circ}\text{C}$ .

A seguir analisaram dois dias que apresentaram a mesma temperatura do ar, porém diferentes valores de radiação solar. Um recebeu  $707\text{Btu/pés}^2$  dia ( $192\text{ cal/cm}^2$  dia) de radiação enquanto o outro recebeu  $2125\text{ Btu/pés}^2$  dia ( $577\text{ cal/cm}^2$  dia). A diferença entre os picos máximos de temperatura correspondentes a profundidade de 0,25 pol (0,63cm) entre os dois dias, foi de  $17^{\circ}\text{C}$ .

Concluíram então que a radiação solar tem maior efeito sobre as temperaturas do pavimentos do que a temperatura do ar.

Dias claros, completamente ensolarados, serão os que apresentarão maiores níveis de temperaturas, em todas as profundidades, notando-se, porém, que o grau de insolação varia com as estações do ano e com a localização do ponto considerado

(latitude, longitude e altitude). Também, nem toda radiação solar recebida na superfície do pavimento será absorvida pelo asfalto, tal como indica o esquema anterior do trabalho de Barber (1957).

A cor do pavimento é o fator mais determinante na quantidade de energia solar absorvida pelo revestimento. Um revestimento preto, que é o mais comum, em termos de concreto asfáltico, absorve mais energia que um pavimento claro, por exemplo, de concreto de cimento portland.

A superfície do revestimento asfáltico, quando novo, é muito escura, e, à medida que este vai se oxidando, envelhecendo, tende a ficar menos escuro, mais cinza, o que deve levar a uma modificação, mesmo pequena, no perfil de temperaturas.

Rumney e Jiménez (1970) mostram como a temperatura da superfície do pavimento tem a mesma forma de variação com o tempo da radiação solar, somente defasadas de um certo intervalo desde o nascer do sol até que o pavimento seja atingido e começa a absorver energia suficiente para responder.

Pela manhã, a inclinação da curva de temperaturas da superfície é muito semelhante à da curva de radiação, mas quando a radiação atinge seu máximo, a temperatura da superfície ainda continua a subir, devido ao atraso inicial entre as duas. Quando a radiação começa a diminuir, a superfície ainda se conservará quente pelo efeito do calor absorvido, mas o vento começará a atuar sobre o revestimento, esfriando-o, e a curva começa a descer.

As curvas de temperaturas do ar e da superfície não tem uma correlação tão evidente, nem existe uma correspondência tão simultânea entre elas.

As temperaturas nas diversas profundidades tem comportamento similares aos da superfície, porém com maior defasagem de tempo em relação à radiação, porque dependem do calor chegar até cada nível por condução através da camada.

Quanto maior a profundidade, menor a influência das variações rápidas de insolação e temperatura do ar.

Rumney e Jiménez (1970) apresentaram um esquema do ciclo de temperaturas no pavimento através dos princípios

de transferência de calor. Durante a noite o ar está frio e as camadas inferiores, que absorvem calor durante o dia, estão quentes, portanto o fluxo se fará do pavimento para o ar, tendendo ao equilíbrio dinâmico ao longo das camadas. Quando aparece o sol, o ar começa a se aquecer, e a radiação solar a atuar, cedendo calor para a superfície, que ficará mais quente que as camadas inferiores, fazendo com que o fluxo se inverta (fig. 5).

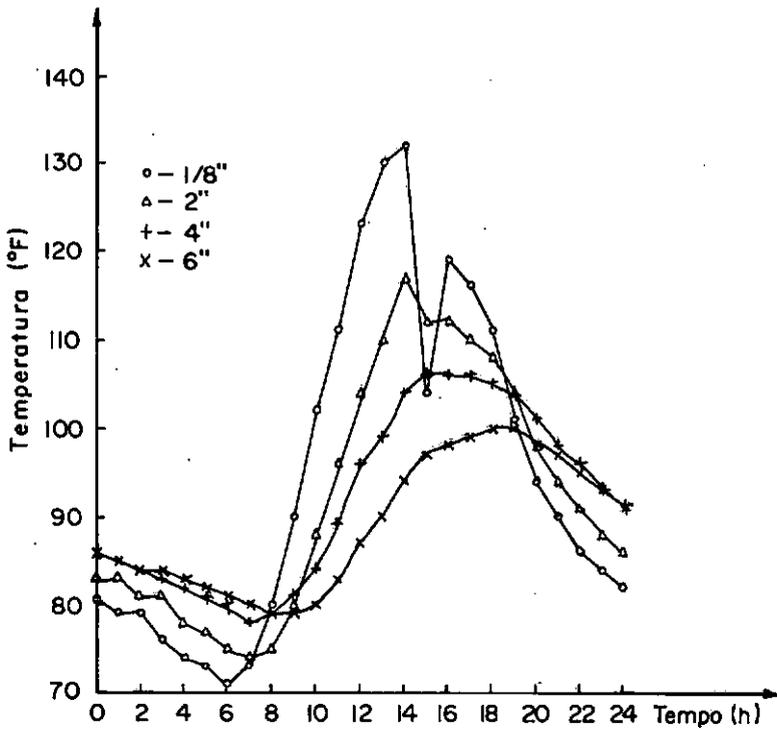
Na superfície do pavimento existe troca de calor por convecção do ar aquecido ao contato com o asfalto, enquanto nas camadas internas o fluxo de calor é para baixo ou para cima, por condução, conforme a hora do dia. As mudanças de fluxo de calor são diferentes em cada época do ano, em relação a tempo, mantendo porém a concepção básica acima.

A quantidade de calor que é transferida nos fluxos depende das diferenças de temperaturas e da condutividade do concreto asfáltico. A cada mês, as máximas e mínimas temperaturas são diferentes, mas a forma das curvas e as transferências de calor permanecem basicamente as mesmas.

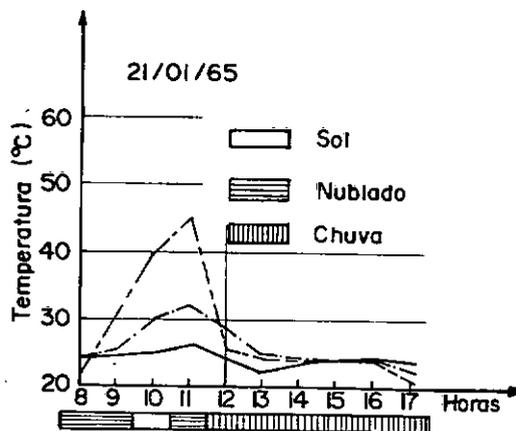
A temperatura da superfície do revestimento, que responde quase que instantaneamente às variações atmosféricas, apresenta formas típicas, segundo atuem sol ou chuva, vento e/ou nuvens e quaisquer outros fatores que alterem a insolação e temperatura do ar.

A passagem de nuvens é acusada por uma queda brusca da temperatura da superfície, enquanto as outras profundidades nem sequer chegam a ser sensibilizadas, se o tempo de encobrimento do sol for pequeno.

Este efeito pode ser ilustrado pelo exemplo mostrado em *Southgate (1968)*, e visto a seguir.



Uma chuva repentina também tem efeito imediato na temperatura da superfície, e ainda, tem efeito sobre a temperatura do ar, conforme exemplo de Medina e Farah (1965):



A passagem de uma nuvem ou uma chuva repentina causam um "mergulho" na curva de temperaturas da superfície, mas quando a influência perturbante passa, a forma da curva volta à distribuição normal.

Quando todo o dia está chuvoso ou muito nublado, as temperaturas nas diversas profundidades permanecem praticamente constantes, podendo a temperatura da superfície ser menor que

as temperaturas em profundidade. Um curto período de chuva e/ou um pequeno período de nuvens reduzem a temperatura da superfície e influencia apenas as temperaturas a pequenas profundidades; contudo, extenso período de mau tempo reduz a temperatura da superfície até quase ao nível da temperatura do ar e decresce a temperatura em toda a espessura do revestimento, proporcionalmente.

A temperatura do ar geralmente cai e se restabelece mais lentamente do que a temperatura da superfície do pavimento sendo um bom indicador de influências ao longo do tempo das temperaturas a diversas profundidades.

Outro fator que foi pesquisado como possível causador de efeitos no perfil de temperaturas é a espessura do revestimento asfáltico, fator muito variável nas estradas comuns.

Muitas pistas experimentais foram feitas com duas espessuras diferentes de revestimento e ambas instrumentadas. A conclusão de todos os pesquisadores é de que a espessura do asfalto não modifica o perfil de temperatura nas diversas profundidades, explicando isto com o fato das propriedades térmicas, não variarem muito nos materiais empregados no pavimento.

O que se deve observar é que a temperatura no pavimento varia com o tempo e com a profundidade, mas a uma mesma profundidade as temperaturas são semelhantes para dois revestimentos com espessuras diferentes. Mas, variando a temperatura com a profundidade e com o tempo, a cada hora do dia tem-se um perfil diferente, com diferentes gradientes entre os pontos e diferentes sentidos de fluxo. Assim, deve-se concluir que na realidade, não se pode admitir uma temperatura constante para toda a espessura do revestimento, a qualquer hora do dia.

As temperaturas máximas da superfície geralmente ocorrem entre 13 e 14 horas, aproximadamente 7 a 8 horas após a temperatura mínima que ocorre exatamente pouco antes do nascer do sol.

A amplitude da variação diária da temperatura decresce rapidamente com o crescimento da profundidade.

Os gradientes de temperatura que aparecem ao lon

go do revestimento induzem um amolecimento diferencial ao longo da camada betuminosa. Se a camada for muito espessa este efeito será mais pronunciado.

*VenKataraman e outros (1977)* apresentam um exemplo de gradientes medidos ao longo de um dia, que como se sabe são muito variáveis com o tempo, (figura 6).

*Dickinson (1969)* e *Bissada (1972)* comentam o efeito do vento sobre as temperaturas máximas do pavimento. Quanto maior a estagnação das massas de ar, maiores serão as temperaturas registradas no pavimento. É o efeito do vento é facilmente entendido quando já se sabe que a temperatura do ar tem grande influência na temperatura do pavimento. Correntes de ar acentuam a troca de calor por convecção entre o ar e o pavimento.

*Dickinson*, em seus artigos, relata variações diárias de temperaturas muito altas durante o verão, frequentemente excedendo  $40^{\circ}\text{C}$  na superfície, o que ele correlaciona com fissuras do pavimento devidas aos efeitos de expansão-contracção térmicas. A velocidade de mudança nas temperaturas dos pavimentos por ele estudados também são altas, sendo encontrado  $5,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$  no verão e  $5,0^{\circ}\text{C}/\text{h}$  no inverno, para o aquecimento. Para o decréscimo de temperatura *Dickinson (1969)* obteve uma razão de  $3^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ .

*Dunstons (1967)* apresenta um resultado sobre a influência da cor nas temperaturas do pavimento, relatando a experiência feita com a medição de temperaturas em um revestimento com a superfície pintada de branco e outra normal, sem pintura. A máxima temperatura medida na superfície pintada de branco foi  $14,5^{\circ}\text{C}$  menor que a medida na superfície normal de concreto asfáltico.

*Dickinson (1975)* apresenta resultados comparados de todos os artigos anteriores, mostrando que na Austrália, em muitos locais, as temperaturas máximas dos pavimentos são altas, chegando até a  $70^{\circ}\text{C}$  na superfície e a  $60^{\circ}\text{C}$  a cinco centímetros. Grandes variações diárias também são comuns. As temperaturas mínimas médias ficam por volta de  $15^{\circ}\text{C}$ . São valores comparáveis aos esperados para o clima de nosso país.

Os resultados de ensaios de laboratório de ligantes e misturas betuminosas dependem da temperatura, como, por

exemplo, a viscosidade do ligante, a estabilidade e a fluência Marshall, a coesão determinada no coesímetro de Hveem, e os diversos ensaios mecânicos (compressão, tração, flexão).

É importante, então, que se considere a faixa de temperatura no campo para a escolha das temperaturas de ensaio.

Daí nasce o interesse de se conhecer o real perfil de temperaturas nas várias estações do ano para regiões de climas diferentes.

No caso de revestimentos betuminosos de grande espessura, poderia se pensar em realizar o ensaio de estabilidade Marshall a diferentes temperaturas, de acordo com a profundidade em que determinada mistura se situaria no pavimento e conforme as condições climáticas da região.

A radiação solar, como já foi comentado, é uma variável crítica para o estudo de temperaturas em pavimentos. O efeito da radiação solar no pavimento deve ser bem considerado, mas é preciso notar que certos pavimentos não ficarão sujeitos a ela, tais como os revestimentos de túneis.

Outros revestimentos com características especiais, em termos de temperatura, são os revestimentos de tabuleiros de pontes e viadutos, que devem apresentar um perfil um pouco diferente por estarem sobre estrutura metálica e/ou de concreto e serem aerados por cima e por baixo.

Richards (1969) fez medições de temperaturas em toda a Austrália, em pontos escolhidos, instrumentando pavimentos com revestimento betuminosos e estruturas sem revestimento (acostamento, por exemplo). Observou que no verão, são significativamente maiores sob o revestimento betuminoso do que sob as superfícies naturais. No inverno, também tendem a ser maiores abaixo do revestimento, mas não tão diferentes das obtidas sob superfícies naturais. Isto resulta do aumento da absorção térmica ao ser revestido o pavimento com superfície betuminosa escura, que absorve muito mais radiação do que a superfície não revestida.

Richards (1969) comenta ainda o efeito dos gradientes de temperatura dos pavimentos sobre o fluxo de umidades

no solo, o qual ocorre normalmente sob forma de vapor, podendo chegar a transferir apreciável quantidade de água sob certas condições.

*Fang* (1969) apresenta curvas isotérmicas de um pavimento da AASHO ROAD TEST, mostrando que, quando a temperatura do ar é máxima, as temperaturas no material granular da base de cresce com a profundidade, no eixo do pavimento; quando a temperatura do ar é mínima, cresce a temperatura das camadas com a profundidade. Também mostra, tal como *Richards* observou, como, sob o revestimento as temperaturas são maiores.

Um estudo da correlação entre resultados da viga Benkelman e temperatura em revestimentos flexíveis para diferentes tipos de base e espessura de pavimentos, é apresentado por *Fang* (1969). Os resultados experimentais mostram que uma considerável redução na deflexão dos pavimentos ocorre com a queda da temperatura. Segundo os dados, o efeito do degelo sobre as medidas de deflexão são maiores que o efeito das altas temperaturas. Este entretanto, não é o caso do Brasil, de modo que a preocupação aqui deve ser com as altas temperaturas e seus efeitos.

*Southgate* (1969) apresenta um método de correlacionar deflexões e temperatura através de um fator adimensional que multiplicado pela deflexão do pavimento, a uma dada temperatura média do revestimento, transforma-a na deflexão a temperatura padrão. Este fator de ajustamento é também correlacionado com os módulos de elasticidade do pavimento às temperaturas de referência e de ensaio.

Existem diversos trabalhos que tratam da estimativa de perfis de temperatura e também do efeito desta sobre as deflexões. Estes aspectos serão detalhados a seguir.

## 2.2.1 - O efeito da temperatura nas deflexões

### a) Comentários

A avaliação de pavimentos baseada apenas em observações superficiais locais-ou seja, a chamada avaliação subjetiva-não permite prever a evolução dos defeitos nem projetar reforços.

Foi a idéia de medir deformações superficiais verticais sob a ação das cargas dos pneus que permitiu a avaliação objetiva dos pavimentos e o cálculo do reforço.

O comportamento dos pavimentos flexíveis está correlacionado às deflexões transientes que estes sofrem com a passagem dos veículos. A ruptura por fadiga depende da deflexão e do número de repetições da carga que provoca essa deflexão.

É necessário distinguir a deflexão recuperável ou elástica da deformação permanente ou plástica que vai sendo acumulada a cada repetição até provocar grandes deformações e caneluras nas trilhas das rodas, com prejuízo para o tráfego.

As primeiras medições de deflexões feitas sob a orientação de *Hveem*, na Califórnia, datam de 1938, sendo então usado o "GE travel gage", inserido no pavimento. Durante a pista experimental da WASHO (1952-1954) é que o Engenheiro A.C. Benkelman desenvolveu a viga para a medição de deflexões. Ainda na Califórnia foi desenvolvido o defletômetro móvel, de 1955 a 1960, instalado em um caminhão e dotado de duas vigas, dando granderendimento. Equipamentos dinâmicos estão atualmente em voga, como o "Dynalect" e o "Road Rater", mas todos correlacionados ao vasto acervo de informações obtidos há mais de trinta anos com a viga Benkelman.

*Carneiro* (1966) indica as possibilidades de utilização da viga Benkelman, com a definição da deflexão característica de uma área e o conhecimento da respectiva deflexão admissível:

- previsão e programação da conserva, definindo prioridade e real necessidade das obras;

- delimitação de áreas fracas dos pavimentos, determinando-se trechos críticos tais como bôrrachudos e rupturas plásticas;
- verificação da necessidade ou eficiência da drenagem, por comparação entre medições nas estações secas e chuvosas.
- influência do tipo de acostamento, por comparação entre os valores das deflexões medidas nas trilhas de roda externa e interna;
- dimensionamento e projeto de reforço ou recapeamento de pavimentos, determinando a espessura necessária de recapeamento em função das deflexões características de cada trecho.

Por ser um ensaio rápido não destrutivo e de fácil execução, a viga Benkelman pode ser usada em larga escala. Porém para sua correta interpretação é preciso conhecer os fatores que podem influir nas medições para tentar contorná-los.

Duas influências são notáveis sobre os resultados da viga: as variações de umidade do subleito e a temperatura do revestimento asfáltico.

As condições de umidade do subleito estão diretamente vinculados à pluviosidade da região bem como às condições de drenagem do pavimento. O valor das deflexões de cada ponto do pavimento varia com a época da determinação visto que a resistência estrutural e, em consequência, as deflexões estão ligadas ao comportamento do subleito e este tem sua capacidade de suporte variável com a umidade.

Geralmente nos meses de maior intensidade de chuva, o subleito está mais úmido e as deflexões são maiores. Existe pois a necessidade de um fator de correção que correlacione as medições em qualquer época do ano com a medição no período mais crítico. Este fator sazonal é tomado igual a 1,2, pelo mêtodo DNER ME 24-75, quando não se conhece outro valor.

A temperatura do revestimento é importante por que a rigidez do concreto asfáltico varia muito com a temperatura, e, em consequência, varia a capacidade de distribuição de carga do pavimento, alterando o valor da deflexão.

Esta influência será vista mais detalhadamente a

seguir.

Kirk (1967) analisa as deflexões da AASHO ROAD TEST, e, para uma estrutura de 4 camadas apresenta um estudo teórico, que é aplicado aos dados obtidos. Segundo a teoria da elasticidade e considerando todas as camadas com coeficientes de Poisson igual a 0,5, a fórmula de cálculo das deflexões na superfície do pavimento será:

$$d = \frac{1,5 \cdot \sigma_0 \cdot a}{E_m \cdot \left[ 1 + \left( \frac{De}{a} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

onde:

$d$  = deflexão (cm)

$\sigma_0$  = pressão de inflação dos pneus  $\text{Kgf/cm}^2$

$E_m$  = módulo de deformação do subleito  $\text{Kgf/cm}^2$

$a = \frac{L}{(2\pi + \sigma_0)^{1/2}}$  = raio da área carregada (cm)

$L$  = carga axial (kgf)

$De = 0,8 D_1 \left( \frac{E_1}{E_m} \right)^{1/3} + 0,8 D_2 \left( \frac{E_2}{E_m} \right)^{1/3} + 0,8 D_3$

$\left( \frac{E_3}{E_m} \right)^{1/3}$

$D_i$  = espessura (cm)

$E_i$  = módulo de deformação ( $\text{Kgf/cm}^2$ )

$$\left. \begin{array}{l} i = 1 \text{ - revestimen} \\ \text{to.} \\ = 2 \text{ - base} \\ = 3 \text{ - sub-} \\ \text{base} \end{array} \right\}$$

Por esta fórmula vê-se que a deflexão é uma função inversa do módulo de deformação do revestimento o que explica o aumento da deflexão com o aumento da temperatura, visto que esta altera o MR.

É interessante notar ainda que a influência da variação do módulo de deformação sobre a deflexão é maior quanto mais fraca for a estrutura, ou seja, quanto menor os módulos do

subleito e/ou da base, mantendo-se constante as outras variáveis. E ainda, de uma outra forma, pode-se dizer que a variação da deflexão com a temperatura depende da grandeza da deflexão, sendo maior a influência da temperatura quanto maior a deflexão própria do pavimento.

Tomando-se valores de módulos de deformação citados por *Quêiroz e Visser*, podemos efetuar um cálculo demonstrativo com a fórmula de *Kirk*.

Temp. °C	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_m$	$E_1/E_m$	$E_2/E_m$	$E_3/E_m$	$d(10 \text{ mm})$	$\Delta d$	%
35	10000	2500	1000	500	20	5	2	77	6	8
22	30000	2500	1000	500	60	5	2	71		
35	10000	2500	1000	1000	10	2,5	1	47		
22	30000	2500	1000	1000	30	2,5	1	44	3	6

Outra observação que se pode fazer, por análise da expressão é que a deflexão aumenta ao se diminuir a espessura de qualquer uma das camadas do pavimento, conservando-se as outras condições.

Como se nota na expressão é grande a variação da deflexão com a razão modular das diversas camadas. Isto ajuda a entender a oscilação das medidas de deflexão que podem ocorrer no pavimento durante sua vida útil. Existe, logo no início da utilização da estrada como que uma compactação pela ação do tráfego, o que modifica os valores dos módulos. No caso de um pavimento com base cimentada, por exemplo há um ganho de resistência com o tempo, até uma certa época. Variação do nível freático e problemas de drenagem também alteram as condições de módulo das camadas de solo, enquanto que no revestimento será o efeito da temperatura a principal análise a ser feita.

*Kirk* comenta que a análise dos dados da AASHO ROAD TEST mostra que as seções não fissuradas dão melhor ajustamento com a teoria.

As medidas de deflexão são usadas para avaliar a capacidade e comportamento estrutural do pavimento, fazer o prognóstico da vida útil e projeto de reforços do pavimento existen

te. Portanto, é necessário, para a exatidão das soluções e avaliações, referir-se às medições a condições constantes, quer do ponto de vista de temperatura quer de umidade (fator de correção para o período crítico do subleito).

b) Influência da temperatura do revestimento nas medições com viga Benkelman.

Variações da temperatura causam variações na rigidez do revestimento, alterando as características do revestimento asfáltico e conseqüentemente a distribuição de tensões no pavimento.

Assim sendo, os dados de ensaio com a viga de Benkelman são, também, influenciados pela variação de temperatura e, para uma análise perfeita, a qualquer época e qualquer lugar, devem ser ajustados para uma temperatura padrão ou para uma temperatura média de referência.

Muitos trabalhos já foram feitos a fim de se determinar a correlação entre temperatura e deflexão.

Um trabalho brasileiro sobre o assunto, feito por *Oliveira e Fabrício (1968)* apresenta uma experiência em um trecho de rodovia, onde foram feitas medições a diversas estações do ano numa tentativa de determinar a época crítica das medições. Em quatro estações foram feitas séries de medições durante um dia inteiro para se verificar a influência da temperatura nos resultados da viga. Os autores concluíram que nenhuma influência existe entre 20<sup>o</sup> e 50<sup>o</sup>C, não encontrando nenhum padrão de variação com a temperatura, dizendo que a dispersão de resultados é devida às imperfeições naturais nas determinações.

Examinando os dados por eles apresentados vemos que uma das estações apresenta correlação temperatura-deflexão de 0,830, tal como mostra a figura 7 enquanto as outras estações não apresentam realmente nenhuma correlação.

*Carneiro et al (1966)* cita efeito da temperatura na deformação do pavimento, pela variação da rigidez do concreto asfáltico, mas observando que a influência se limita a temperaturas inferiores a 25<sup>o</sup>C.

Como já citamos anteriormente, todas as características do asfalto se modificam com o aumento da temperatura. É, pois, lógico se esperar que esta variação se manifeste também nas deflexões.

*Lobo Carneiro (1966)* ainda cita uma correção que deve ser feita, quando a temperatura for inferior a  $25^{\circ}\text{C}$ , correção esta baseada no valor da deflexão. "A correção da deflexão devido à variação da rigidez do revestimento betuminoso com a temperatura, depende da deflexão do pavimento, sendo maior para as deflexões mais elevadas". (figura 8).

Nesta correção, para uma mesma variação de temperatura, pavimentos que apresentam deflexões diferentes são tratados de maneira diferente. O fator de correção é tanto maior quanto maior a deflexão, sendo, por exemplo, de  $0,01 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$  para uma deflexão de  $1,50 \text{ mm}$  e  $0,0085 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$  para  $1,20 \text{ mm}$ .

À época do citado trabalho, eram escassas as observações feitas neste país que sugerissem outro critério de correção. Pode-se observar na Figura 7, que o coeficiente angular da reta ajustada é  $0,97 \times 10^{-3} \text{ pol}/^{\circ}\text{C}$  ou  $2,46 \times 10^{-2} \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ , bem superiores aos maiores valores de fator de correção da figura 8.

Um comportamento de análise também usado, quando se quer estudar o efeito da temperatura é o de isolar-se este fator, convencionando uma temperatura padrão e "normalizando" os valores das deflexões, os quais são dependentes de muitos outros fatores. Esta "normalização" consistiria em se referir as deflexões à deflexão correspondente à temperatura padrão, criando-se um "fator de ajustamento".

Este procedimento é o usado por Southgate, em trabalho a ser comentado mais adiante.

Se a influência da temperatura é mais notável nas deflexões maiores, mais uma razão para que este efeito seja considerado e corrigido, visto que as grandes deflexões indicarão a necessidade de reforço da estrutura do pavimento. Este reforço é proporcional à deflexão característica do pavimento.

Na análise dos dados da AASHO ROAD TEST (ref:1) algumas observações importantes foram obtidas. Durante os meses

de verão, quando a temperatura do revestimento é relativamente alta e as condições do subleito boas, a diferença nas deflexões de grupos de seções com revestimento de 1, 3 e 5 polegadas (2,54; 7,62 e 12,7 cm) é pequena. Este efeito da espessura do revestimento foi analisado marcando-se a razão entre as deflexões médias de duas espessuras de revestimento "versus" temperatura média do revestimento. Os dados mostram que acima de 26,7°C (80°F) não há influência notável da temperatura. Porém a mais marcante influência da espessura é a baixas temperaturas, abaixo de 26,7°C (80°F), quando então, a razão cresce ao diminuir a temperatura, mais acentuadamente a razão entre as deflexões dos revestimentos de 1 e 5 polegadas (2,54 e 12,7 cm).

Foram feitas séries de medidas de deflexão durante um dia, a várias épocas do ano, para se estudar o efeito da temperatura nos resultados. A cada seção o nível das deflexões varia; contudo a variação da deflexão por grau de variação de temperatura é essencialmente a mesma, e, acima de 26,7°C (80°F) a deflexão é praticamente constante, havendo influência mais acentuada entre 30° e 50°F (-1,1° a 10°C).

No entanto, baseado nos dados também da AASHO ROAD TEST, *Southgate* (1968) mostra que existe um fator de ajustamento temperatura-deflexão aplicável à viga Benkelman, determina este fator, e não limita a temperatura em 26,7°C, pelo contrário, leva seus cálculos até 150°F (≈66°C).

O fator de ajustamento apresentado por *Southgate* (1968) é definido como um fator adimensional multiplicativo que é aplicado à deflexão medida a uma conhecida temperatura do revestimento, para "reduzi-la" a uma deflexão referenciada a uma temperatura padrão.

Com os dados da AASHO ROAD TEST, *Southgate* (1968) marcou temperatura contra deflexão, em gráficos semi-logarítmicos, obtendo uma reta de inclinação:

$$M = \frac{Y_2 - Y_1}{\log T_2 - \log T_1}$$

onde:

$M$  = inclinação da linha reta

$Y_1$  ,  $Y_2$  = valores da deflexão

$T_1$  ,  $T_2$  = temperatura média do revestimento, correspondente às deflexões  $Y_1$  e  $Y_2$

Com a determinação da reta, calculou-se as deflexões para temperaturas médias entre  $30^{\circ}\text{F}$  ( $-1,1^{\circ}\text{C}$ ) até  $150^{\circ}\text{F}$  ( $66^{\circ}\text{C}$ ). Tomou-se a temperatura de  $60^{\circ}\text{F}$  ( $15,6^{\circ}\text{C}$ ) como temperatura de referência, e, definiu o fator de ajustamento como:

$$f = \frac{D_{\text{Ref}}}{DT}$$

onde:

$f$  - fator de ajustamento

$D_{\text{ref}}$  - deflexão à temperatura referência

$DT$  - deflexão à temperatura qualquer, tirada da reta de log temperatura x deflexão

O fator de ajustamento é portanto um puro número. Foi obtida uma série de curvas  $f \times T$ , e depois definida uma curva média.

Neste mesmo trabalho, *Southgate* determina a relação, entre o fator de ajustamento da temperatura e o módulo de elasticidade do concreto asfáltico obtendo uma reta.

As curvas de *Asphalt Institute* (1969), conhecidas como curva "A" e "B", são usadas respectivamente para pavimentos com menos de 4 polegadas (10, 16 cm) de espessura total de asfalto e mais ou igual espessura de asfalto sobre um subleito fraco.

Estas curvas foram confirmadas pelos resultados de muitos trabalhos como podemos ver, por exemplo, na figura 9, tirada de *Southgate e Deen* (1969). A curva apresentada por *Southgate* (1968) é intermediária a estas duas.

*Kingham e Reseigh* (1967) fizeram medições de temperatura e deflexão em seções-testes de pavimentos com bases

de areia-asfalto e granular e verificaram que a temperatura tem uma grande influência na deflexão em seções com base tratada, crescendo a deflexão com a temperatura. O raio de curvatura é também muito afetado pela temperatura, sendo que a baixas temperaturas correspondem grandes raios de curvatura.

*Scala e Dickinson (1967)* apresentam resultados de medições de deflexões versus temperatura na Austrália e mostram a influência desta naquela, bem como o efeito da espessura do revestimento. Um exemplo dos valores encontrados por *Scala e Dickinson* está mostrado na figura 10. Este mesmo efeito é mostrado como uma reta, em gráfico log-log, sendo:

$$d = \frac{4,4}{t} \quad (38^{\circ}\text{C})$$

$$d = \frac{2,4}{t} \quad (11^{\circ}\text{C})$$

onde:

d - deflexão em 0,001 polegadas

t - espessura em polegadas.

No *CGRA (1965)*, encontra-se referência à correção do valor da deflexão com a temperatura. No procedimento de ensaio e cálculo aparece a fórmula:

$$X_{70^{\circ}} = X_{(T)} + \frac{70^{\circ} - t^{\circ}}{5000}$$

onde:

$X_{70^{\circ}}$  = deflexão corrigida para a temperatura padrão de 70°F (≅ 21°C)

$X_{(T)}$  = deflexão a uma temperatura  $t^{\circ}$  qualquer.

$t^{\circ}$  = temperatura do revestimento (°F)

Com isto, o *CGRA* está admitindo que haja uma relação linear entre a deflexão e a temperatura do pavimento, com uma inclinação de 0,002"/10°F (0,009 mm/°C), numa inclinação de temperatura de 35°F a 100°F, para deflexões de 0,020" a 0,070"

( $\approx 2^{\circ}\text{C}$  a  $38^{\circ}\text{C}$ ;  $50 \times 10^{-2}$  mm a  $180 \times 10^{-2}$  mm).

*Southgate e Deen (1975)* apresentam resultados de uma série de se es experimentais que confirmam a influência da temperatura nos resultados da viga Benkelman. Um exemplo típico dos valores encontrados para a rela o temperatura contra deflexão, neste trabalho, está na figura 11. Os autores correlacionam ainda estas duas variáveis com o CBR do subleito. Concluem que o fator de ajustamento deflexão-temperatura definido no trabalho anterior de *Southgate (1968)* e já mencionado, parece ser uma fun o do subleito, ou seja, do CBR do subleito, ou do fator de equivalência estrutural. Porém, com os dados disponíveis, não foi possível a *Southgate e Deen* determinar uma rela o entre deflexão, temperatura e CBR.

Quanto   espessura do concreto asfáltico esta parece não afetar a posi o da curva do fator de ajustamento.

*Petroni e outros (1977)* apresentam um estudo muito extenso sobre a varia o da deflexão Benkelman com a temperatura em diversas se es de pavimento.

Deduziu-se teoricamente uma equa o de correla o temperatura contra deflexão, e, com os dados experimentais obtidos nos diversos postos observados, obteve-se o coeficiente empírico da mesma.

A expressão geral que permite calcular a deflexão a uma temperatura padrão ( $20^{\circ}\text{C}$  para este trabalho) de qualquer pavimento conhecendo-se a deflexão a uma temperatura  $t$  qualquer  :

$$D_{20} = \frac{D_t}{e (t-20) \times 10^{-3} + 1}$$

onde:

$D_{20}$  = deflexão a temperatura padrão ( $20^{\circ}\text{C}$ ) ( $\text{mm} \times 10^{-2}$ )

$D_t$  = deflexão a temperatura "t" da hora da medi o ( $\text{mm} \times 10^{-2}$ )

e = espessura total do revestimento asfáltico (cm)

$$20 = \text{temperatura padrão}$$

$$10^{-3} = K \frac{\text{cm}^{-1}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{C_t}{D_{20} \times C} \quad (\text{empírico})$$

$C_t$  = inclinação da reta temperatura x deflexão

Esta expressão, como foi obtida através de elementos empíricos, deve ser usada entre  $30 < D_{20} < 100 \text{ mm} \times 10^{-2}$ , conforme os dados usados na sua obtenção. A temperatura " $t$ " usada na fórmula é a obtida pelo processo clássico de furo com óleo.

Dentro das limitações da dedução, a expressão permite calcular a deflexão a  $20^{\circ}\text{C}$  com um erro menor que 5%.

Uma observação importante a ser feita sobre este trabalho, é que, na Argentina, as medidas com viga Benkelman são feitas somente quando a temperatura do revestimento se encontra abaixo de  $30^{\circ}\text{C}$ , para evitar a grande influência deste fator nas medições. E ainda assim se preocupam em definir uma correção de temperatura, referindo as deflexões a  $20^{\circ}\text{C}$ , para qualquer análise destes dados.

Procedimento semelhante encontramos em *Lister (1972)* Inglaterra, que mostra gráficos de variação das deflexões com a temperatura e comenta sobre a dificuldade de se obter medidas dignas de confiança em condições de verão muito quente, quando a temperatura do revestimento excede  $30^{\circ}\text{C}$ . Pesquisas que determinem a relação deflexão-temperatura, permitem que as medições feitas a qualquer temperatura sejam corrigidas para uma temperatura padrão ( $20^{\circ}\text{C}$ ) e os erros inerentes a este procedimento são minimizados pela restrição da utilização da viga em períodos em que a temperatura do revestimento esteja entre  $10^{\circ}\text{C}$  e  $30^{\circ}\text{C}$ , segundo *Lister (1972)*.

Na norma DNER-ME 24-75 "Medidas de deflexões no pavimento através da viga Benkelman", o método de ensaio, no item 4. 2.1 cita o fator de ajustamento para a temperatura de referência .

Este fator de ajustamento é dado em forma de tabela:

Temperatura média do Pavimento °C	Fator Ft
6	1,20
8	1,14
10	1,10
12	1,07
17	1,03
21	1,00
27	0,96
32	0,93
38	0,90
43	0,87
39	0,84

A temperatura de referência é portanto 21<sup>0</sup>C. Não está citada a fonte destes dados, mas os valores coincidem com a Curva "A" do Instituto do Asfalto.

É definida a maneira de se tomar a temperatura.

"Registra-se a temperatura do pavimento inserindo o termômetro em orifício aberto no pavimento, cheio com glicerina, óleo ou água. Aconselha-se abrir o orifício entre o ponto de ensaio e o bordo do pavimento. A temperatura deverá ser determinada no mínimo a cada hora de trabalho. Ao mesmo tempo, anota-se a temperatura ambiente".

O orifício é feito com ponteira e martelo e deve ter de 4 a 5 cm de profundidade e de 1,0 a 1,5cm de diâmetro, usando-se termômetro de 0<sup>0</sup> a 100<sup>0</sup>C, com divisões de 1<sup>0</sup>C.

Apesar do método de ensaio aprovado pelo DNER em 16/06/75, adotar todo este procedimento anterior e definir um fator de ajustamento da temperatura, normalmente não se utiliza esta correção nos cálculos de deflexão !

Bulman (1972) cita a necessidade de se corrigir a deflexão pelo efeito da temperatura, e, sugere que nas regiões tropicais a temperatura padrão mais realista deveria ser 35<sup>0</sup>C, e não 20<sup>0</sup>C como usado, por exemplo, na Inglaterra. Mostra um exemplo de variação da deflexão com a temperatura na Malásia, na forma de uma curva que tem duas inclinações conforme o nível de tem

peraturas..

*Kennedy e Lister (1978)* apresentam seis gráficos de correção da deflexão devido a temperatura do revestimento. Cada gráfico é correspondente a diferentes valores de espessura do material betuminoso. Em cada gráfico as correções variam com o valor das deflexões, sendo mais acentuada quanto maior a deflexão. A temperatura padrão é 20<sup>0</sup>C e a temperatura do pavimento é medida a 40 mm de profundidade. Um exemplo de um gráfico apresentado por *Kennedy e Lister* é mostrado na figura 12.

\* \* \*

2.3 - Estimativa de perfis de temperatura

Alguns pesquisadores tem procurado um procedimento de previsão do perfil de temperaturas de um pavimento, em função de parâmetros de fácil obtenção, sempre testado o modelo com dados experimentais.

## 1) Barber (1957)

A temperatura de uma massa semi-infinita em contato com o ar varia segundo uma equação de difusão de calor con forme segue:

$$T = T_m + T_v \frac{H e^{-xc}}{\sqrt{(H+c)^2 + C^2}} \operatorname{sen} \left( 0,262t - xc - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{C}{H+C} \right) \quad (1)$$

onde:

T - temperatura da massa, °C

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

$T_v$  - máxima variação na temperatura do ar em relação à média, °C

t - tempo a partir de uma determinada origem, horas.

x - profundidade abaixo da superfície, metros

H - h/K

h - coeficiente de transmissão térmica superficial, Kcal/m<sup>2</sup> . h. °C

K - coeficiente de transmissão térmica, Kcal/m. h. °C

c - difusibilidade térmica =  $\frac{K}{S.W}$  ; m<sup>2</sup>/h

S - calor específico; Kcal/Kg. °C

w - densidade do concreto asfáltico; Kg/m<sup>3</sup>

$$c = 0,131/c \quad \left(0,131 = \frac{2\pi}{24}\right)$$

O valor de  $h$  inclui a convecção forçada e a reirradiação média e é dado por:

$$h = 1,3 + 0,62 v^{3/4} \quad (2)$$

onde:

v = velocidade do vento, milhas por hora

O valor de  $h$  deve ser calculado com a velocidade em milhas por hora devido às constantes numéricas que aparecem na fórmula (2). Mas para entrar na fórmula (1) este valor será convenientemente transformado.

Barber chama de temperatura efetiva do ar, a temperatura do ar em contato com a superfície, que é diferente da aquela medida segundo as Normas Meteorológicas (a um metro acima do solo e na sombra).

Com a definição desta temperatura efetiva é que Barber considera o efeito da radiação solar sobre o pavimento:

$$T_m = T_a + \frac{bI}{h} \cdot p$$

onde:

$T_m$  - temperatura média do ar em contato com a superfície do revestimento (°C)

$T_a$  - temperatura média do ar, medido segundo das normas meteorológicas (°C)

b - coeficiente de absorção da radiação solar pela superfície.

I - radiação solar, Kcal/cm<sup>2</sup>/dia

p - coeficiente de perda por reirradiação, tomado como 0,67.

A variação máxima da temperatura do ar, em relação à média, junto ao pavimento, também é diferente da variação

diária dos valores meteorológicas, pelo efeito da radiação solar:

$$T_v = 0,5 T_r + 3R$$

onde:

$T_v$  : variação máxima da temperatura do ar

$T_r$  : variação diária da temperatura do ar, meteorológica

$$R : \frac{bI}{h} \times p$$

Barber considerou o pavimento como uma estrutura homogênea, não diferenciando as propriedades térmicas do revestimento e das outras camadas, o que, para muitos autores, não é importante.

Comparações entre dados calculados e medidos apresentados em seu artigo mostram boa concordância, principalmente nos dias ensolarados e quando não ocorrem variações bruscas das condições atmosféricas. Mudanças rápidas tais como chuvas súbitas, passagem de nuvens, quedas de temperatura do ar, não podem ser consideradas pela fórmula, que não se adapta a estas variações.

A fórmula de Barber pode ser usada, também, para pavimentos de concreto de cimento portland, bastando para isto usar os coeficientes das propriedades térmicas de acordo com o material.

## 2) Przybycien (1967)

O modelo de simulação de Przybycien também é comentado por Straub e outros (1968)

O objetivo da simulação proposta por Przybycien em sua tese de mestrado é conseguir um modelo para prever as temperaturas do pavimento a várias profundidades, com base em dados climatológicos, através das equações básicas de transferência de calor.

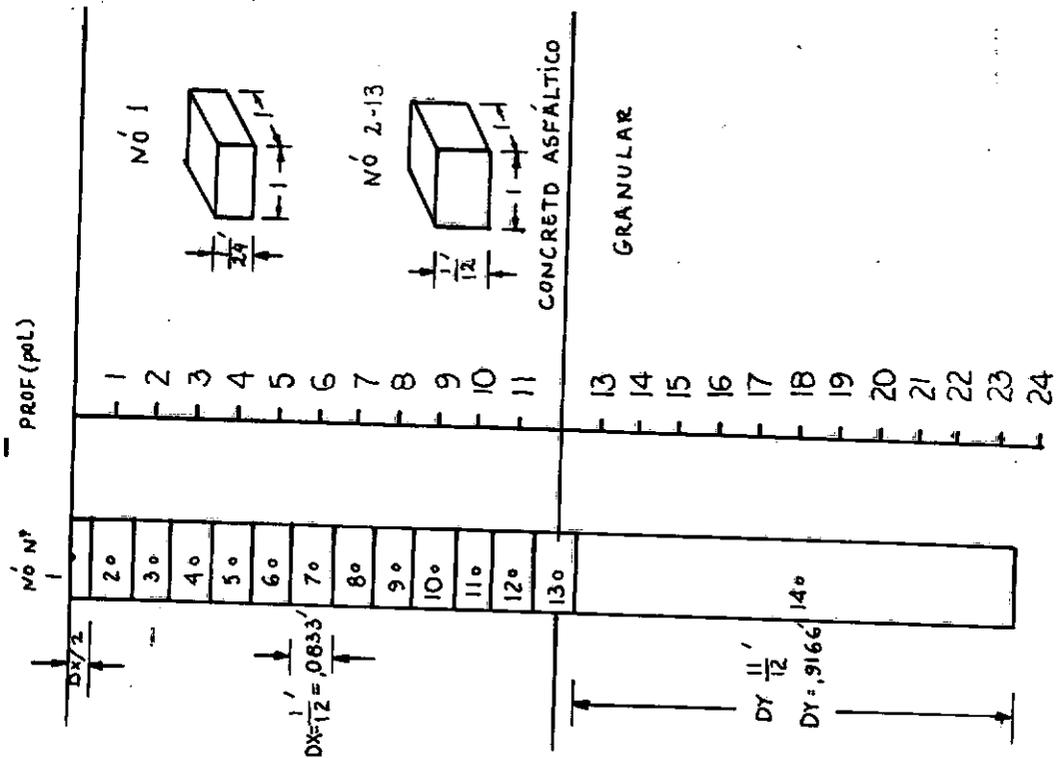
Seus dados de entrada são de fácil obtenção: temperatura do ar, radiação solar, condições iniciais de temperatura do pavimento e tempo em relação a uma origem. Além destes, usa também as propriedades térmicas do concreto asfáltico e solo: coeficiente de convecção, calor específico e condutividade.

Também aqui, o modelo foi usado só para dias ensolarados evitando-se considerar dias chuvosos que introduziam outras variáveis, como a transferência de calor por evaporação.

Para aplicar as equações de transferência de calor por convecção, condução ou radiação usou ele o método das diferenças finitas que permite considerar muitos parâmetros climáticos, velocidade de computação, considerações de camadas diferenciadas e até maior mobilidade do modelo para acompanhar as variações dos dados.

Neste estudo foram adotados 14 nós, números amplamente suficiente para os propósitos práticos.

A temperatura calculada para qualquer nó é a temperatura média do volume inteiro da seção que representa geralmente a temperatura do elemento, o qual, para comparações diretas de resultados deve coincidir com os pontos de instalação dos sensores no campo.



Elemento 1 - superfície do pavimento, por onde a radiação solar é introduzida no pavimento.

Elemento 2 a 12 - seções no concreto asfáltico

Elemento 13 - misto, metade no revestimento asfáltico, metade na base de pedregulho

Elemento 14 - nã de fechamento, pedregulho. Muito maior que os outros nã, acurácia menor. Mas como é mais profundo, sofre menores variações de temperatura e por tanto o erro é menor.

Os dados de entrada para o programa de simulação:

a) propriedades de concreto asfáltico e pedregulho (diferentes)

1 - Densidade

2 - Condutividade K

3 - Calor específico  $C_p$

4 - Coeficiente de convecção H

5 - Difusividade  $(K/\rho C_p)$

b) condições iniciais em cada nã - temperatura convencionalada;

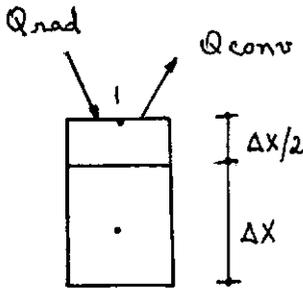
c) temperatura do ar;

d) radiação solar.

As temperaturas iniciais do pavimento constituem dados de entrada na simulação e podem ser obtidas, como primeira aproximação, através de termômetros, ou são conhecidas de outras medições mais acuradas. A sensibilidade do programa a esta variável foi testada mostrando que o resultado de  $10^{\circ}\text{F}$  ( $5,5^{\circ}\text{C}$ ) de erro, não induzia muita variação na superfície, mas, à medida que aumenta a profundidade, aumenta o erro da simulação.

A equação da transferência de calor para o modelo de simulação é uma combinação de equações de condução, convecção

e radiação, como segue:



Elemento 1 : q condução "out" =

$$\frac{K(1)}{\Delta x} (T_1' - T_1)$$

q condução "in" = 0

q convecção "in" =  $H(1) (T_{ar} - T_1)$ ;

$A=1$  pē 2

q radiação "in" =  $q_{rad}$

q armazenado =  $q_{in} -$

$q_{out}$

$$\frac{MC \Delta T}{\Delta \theta} = \frac{\rho V C_p}{\Delta \theta} (T_1' - T_1)$$

q armazenado = q condução + q convecção + q radiação

$$\frac{\rho C_p \left(\frac{\Delta x}{2}\right) (1)}{\Delta \theta} (T_1' - T) = \frac{K(1)}{\Delta x} (T_2 - T_1) +$$

$$H(1) (T_{ar} - T_1) + q_{rad}$$

Resolvendo para a nova temperatura  $T_1'$

$$T_1' = T_1 \left(1 - \frac{2\alpha\Delta\theta}{(\Delta x)^2} - \frac{2H\Delta\theta}{\rho C_p \Delta x}\right) + T_2 \left(\frac{2\alpha\Delta\theta}{(\Delta x)^2}\right)$$

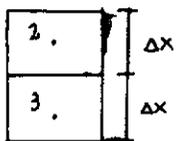
$$T_{ar} + \left(\frac{2\Delta\theta}{\rho C_p \Delta x}\right) q_{rad}$$

Desde que todos os coeficientes de temperatura sejam positivos para satisfazer os requisitos de estabilidade todos os termos entre parêntesis devem ser positivos.

Termos tais como  $\Delta\theta$ ,  $\Delta x$ ,  $H$ ,  $\rho$ ,  $C_p$  e  $\alpha$  serão positivos, de modo que o único termo em questão será  $T_1$ . O requisito de estabilidade será:

$$\Delta\theta \leq \frac{\rho C_e \Delta x}{2[H+K/\Delta x]}$$

Elementos gerais do concreto asfáltico :



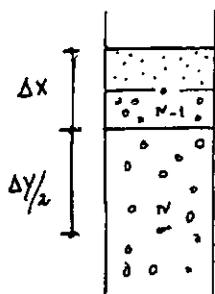
$$q \text{ armazenado} = \frac{MC_e \Delta T}{\Delta\theta} = q \text{ cond in} + q \text{ cond out}$$

Como na última derivação:

$$\frac{\rho C_e \Delta x}{\Delta\theta} (T'_2 - T_2) = \frac{K(1)}{\Delta x} (T_1 - T_2) + \frac{K(1)}{\Delta x} (T_3 - T_2)$$

$$T'_2 = T_2 \left( 1 - \frac{2\alpha\Delta\theta}{(\Delta x)^2} \right) + (T_1 + T_3) \left( \frac{\alpha\Delta\theta}{(\Delta x)^2} \right)$$

Elementos metade asfalto, metade pedregulhos:



- ..... A - asfalto
- ..... G - pedregulho
- ..... C - combinação

$$\frac{MC_e \Delta T}{\Delta\theta} = q \text{ cond in} - q \text{ cond out}$$

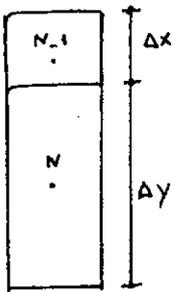
$$\frac{(\rho C_e)_c \Delta x}{\Delta\theta} = \frac{KA}{\Delta x} (T_{n+2} - T_{n-1}) + \frac{2KG}{\Delta x + \Delta y} (T_n - T_{n-1})$$

Finalmente:

$$T_{n-1} = T_{n-1} \left( 1 - \frac{KA \Delta\theta}{(\rho C_e)_c (\Delta x)^2} - \frac{2KG \Delta\theta}{(\rho C_e)_c \Delta x (\Delta x + \Delta y)} \right) + T_{n-2} \left( \frac{KA \Delta\theta}{(\rho C_e)_c (\Delta x)^2} \right) + T_n \left( \frac{2KG \Delta\theta}{(\rho C_e)_c \Delta x (\Delta x + \Delta y)} \right)$$

Nenhum problema de estabilidade nesta equação devido ao grande valor de Δy.

Elementos de terminação:



(sō pedregulho)

$$\frac{MC_e \Delta T_c}{\Delta \theta} = q \text{ cond in}$$

$$\frac{(\rho C_e)_G \Delta y}{\Delta \theta} (T'_n - T_n) = \frac{K_G}{\frac{\Delta x + \Delta y}{2}} (T_{n-1} - T_n)$$

$$T'_n = T_n \left( 1 - \frac{2K_G \Delta \theta}{(\rho C_e)_G \Delta y (\Delta x + \Delta y)} \right) + T_{n-1} \left( \frac{2K_G \Delta \theta}{(\rho C_e)_G \Delta y (\Delta x - \Delta y)} \right)$$

 $\rho$  = densidade $K$  = condutividade $C_e$  = calor específico $H$  = coeficiente convecção $\frac{K}{\rho C_e}$  = difusividade

Os dados de radiação solar devem ser "corrigidos" visto que o asfalto não retém a radiação solar total, sendo parte da radiação absorvida pelo pavimento, reirradiada para os arredores. A reirradiação é tomada como uma função da diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do ar, o que pode ocorrer à noite também:

A reirradiação será subtraída do valor da radiação total, durante o dia, obtendo-se a radiação correta absorvida pelo pavimento.

Assumindo que o pavimento é preto, 10% da radiação solar será emitida de volta pelo pavimento, segundo a fórmula:

$$q = EA\alpha F (T_{\text{sup}}^4 - T_{\text{ar}}^4)$$

onde:

$\sigma$  - constante de Stefan - Boltzman =  $0,172 \times 10^{-8}$   
BTU/hft<sup>2</sup> R<sup>4</sup>

A - área 1,0 pē<sup>2</sup>

E - 0,9 (adotado como efeito de corpo negro)

F - 1,0 (reflexão do pavimento)

Tsup - temperatura da superfície em °R

Tar - temperatura do ar em °R

$$q = 0,9(1,0)(0,172 \times 10^{-8})(T_{sup}^4 - T_{ar}^4) = 0,155 \times 10^{-8} (T_{sup}^4 - T_{ar}^4)$$

q → Btu/pēs/hora

Przybycien mostra uma análise de transferência de calor para um nō de superfície, onde aparecem os vários tipos de calor. (figura 13).

- a) radiação solar - valor  $\left\{ \begin{array}{l} \text{positivo} - \text{chega ao nō} \\ \text{negativo} - \text{sai do nō (reirradiação)} \end{array} \right.$
- b) convecção - valor  $\left\{ \begin{array}{l} \text{positivo} - \text{do ar para a superfície} \\ \text{negativo} - \text{da superfície para o ar (o pa-} \\ \text{vimento perde calor)} \end{array} \right.$
- c) condução - valor  $\left\{ \begin{array}{l} \text{positivo} - \text{nō 1 ganha calor, fluxo } \uparrow \\ \text{negativo} - \text{nō 1 perde calor, fluxo } \downarrow \end{array} \right.$
- d) calor armazenado no nō - 1 composição dos três primeiros  
positivo - ganho de calor em 1  
negativo - perda de calor → mais calor é levado do nō 1 do que chega.

Assim é possível ver o que está acontecendo no pavimento com o passar do tempo.

Um exemplo da simulação é mostrada, sendo considerada boa visto que as curvas resultantes do modelo tem a mesma forma básica das correspondentes curvas reais, a cada profundida

de, diferindo a máxima temperatura da superfície de  $\pm 5\%$  da real (figura 14).

*Straub e outros (1968)* comentam que as diferenças entre o modelo e os dados reais de temperatura tanto podem ser devido a defeitos conceituais como instrumentais, no modelo e no sistema real. Estimativas do coeficiente de convecção e propriedades térmicas do asfalto ou radiação, modelo imperfeito de reirradiação, ou colocação defeituosa dos sensores no pavimento são fatores que podem ter efeito sobre o modelo discretizado.

O modelo não foi testado para dias nublados nem chuvosos.

Com a simulação digital de Przybycien, é possível prever as temperaturas máximas do pavimento com dados das condições atmosféricas, podendo ainda ser usado para determinar qual tipo e quanto de fluxo de calor ocorre nos pavimentos de rodovias, melhorando os conhecimentos do que realmente acontece nas estradas.

*Straub e outros (1968)*, comentam que esta simulação foi aplicada para dias sem sol de inverno e não deu boa correlação, provavelmente devido ao pequeno fluxo de calor.

Esta simulação, comentam, é bom instrumento para predizer temperaturas máximas que ocorrem nos pavimentos betuminosos, porém, não são apropriadas para prever as mínimas.

O difícil deste método são as temperaturas iniciais que devem ser usadas como entrada no programa. É preciso que se tenha alguma experiência de medição na região para estimar bem as condições iniciais.

### 3) *Southgate (1968)*

Uma relação entre temperatura-profundidade, para uma dada hora, é tomada como uma equação polinomial da forma:

$$Y = C_1 + C_2 X + C_3 X^2 + \dots + C_n X^{n-1}$$

onde:

Y - temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{a}$  profundidade X

X - profundidade em cm, abaixo da superfície

$c_1, c_2, c_3 \dots c_n$  - coeficientes determinados pelo método dos mínimos quadrados.

Por experiência com dados reais, um polinômio de 4ª ordem satisfaz a todas as horas.

Calculou-se por meio de regressão as temperaturas da superfície e de cada 1,27 cm ( $\frac{1}{2}$ " ) de profundidade até 12" com dados da AASHO ROAD TEST, com uma equação polinomial determinada para o respectivo dia.

Estas temperaturas calculadas foram plotadas como ordenadas, em gráfico cuja abcissa é a soma da temperatura da superfície com a média das temperaturas do ar dos dias precedentes.

O uso da média das temperaturas do ar é devido a necessidade de produzir um deslocamento nos valores da abcissa, em relação à ordenada.

Foi investigado qual seria o número ideal de dias a serem considerados para se ter o melhor ajustamento dos dados. Como este número ideal fosse variável conforme a hora e a profundidade, adotou-se a média das temperaturas médias dos 5 últimos dias anteriores, para representar a história da temperatura do ar, e que se soma à temperatura da superfície.

Pelo cálculo do erro padrão da estimativa, mostra-se que a média das temperaturas do ar dos 5 dias anteriores, deve ser usada para todas as profundidades maiores que 2 pol (5cm). Para profundidades entre 0 e 2 pol, a melhor estimativa será obtida com o uso apenas da temperatura da superfície. Admitê-se que as temperaturas de pavimentos de, até 2 pol de espessura são diretamente dependentes da hora do dia e da temperatura da superfície, enquanto que as temperaturas a profundidades maiores que 2 pol são admitidas como uma função da temperatura da superfície, quantidade de calor absorvido e da média das temperaturas do ar, dos cinco dias anteriores.

Alguns pesquisadores citam o fato de que a temperatura a uma determinada profundidade, em condições normais do tempo e a uma dada hora, é aproximadamente a mesma porcentagem do

valor da temperatura da superfície. Assim, marcando-se temperatura a uma profundidade "x" contra a temperatura da superfície somada à temperatura média do ar dos 5 dias anteriores a uma determinada hora do dia, evita-se o efeito das estações sobre a correlação.

Se, para a obtenção da correlação entre temperatura a uma dada profundidade com a temperatura da superfície somada à média dos 5 dias anteriores, forem usadas somente os dados dos dias de bom tempo, a correlação resultante será diferente daquela que se calcula com o uso de dados de todas as espécies de condições atmosféricas.

A conclusão que Southgate tirou é que a confiança na acurácia de previsão de temperatura cresce na medida que se usam todos os tipos de dados.

Exemplos dos tipos de correlação obtidos por Southgate são mostrados nas figuras 15 e 16.

Alguma dificuldade deste método será a medição da temperatura da superfície com precisão.

#### 4) Rumney e Jimenez (1970)

Estes autores apresentam um método de prever os máximos picos em cada camada, usando correlações com a temperatura do ar e com a radiação solar.

Marca-se na abcissa a máxima temperatura do ar durante o dia; e, na ordenada, a média da radiação solar ( das horas 11,12 e 13 do dia mais a máxima radiação do dia ).

Neste gráfico, encontram-se curvas empíricas que foram construídas somente com base em dados experimentais.

O teste da validade das curvas foi feito com dados de Straub e outros (1968) sendo conseguida uma aproximação de 2°F (1,1°C).

Mas como o número de variáveis envolvidas na determinação da temperatura de pavimentos é muito grande, é possível que uma acurácia tão grande não seja conseguida em todos

os casos, sendo mais realístico esperar erros maiores (Rumney e Jiménez citam  $\pm 5^{\circ}\text{F} \rightarrow 2^{\circ}\text{C}$ ).

Este método é empregado para dias claros.

São apresentados exemplos de curvas para a superfície, para 2 pol e 4 pol.

Um exemplo, para 2 pol, é mostrado na figura 17.

Este método só é válido para se prever a máxima temperatura que cada profundidade vai atingir, em dias claros.

Mas não foi suficientemente testado com dados de diversas regiões para se estudar a sua acurácia e se as curvas são compatíveis para quaisquer locais, ou se devem ser propostas outras em cada situação.

#### 5) Wilson, A.H. (1976)

O trabalho de Wilson apresenta uma previsão de gradientes de temperatura através de considerações teóricas, usando equações que foram desenvolvidas para prever temperatura de estruturas de ponte, e uma previsão empírica com dados experimentais.

Usando dados publicados, foi testada a acurácia do modelo teórico verificando-se que as diferenças básicas entre os gradientes previstos e medidos são.

- próximo à superfície: valor previsto maior que o medido durante o período quente;
- máxima diferença quando a superfície começa a esfriar após ter atingido o máximo;
- Na base, as temperaturas calculadas são menores que as medidas.

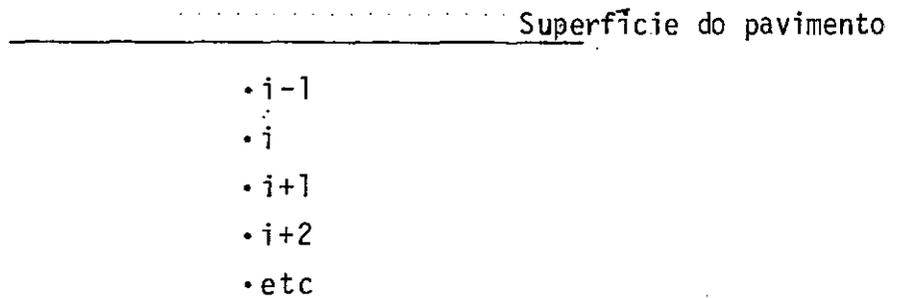
Wilson explica, porém, que, como as constantes físicas que compõem a fórmula foram adotadas segundo valores que aparecem na literatura, novos cálculos usando valores de condutividade térmica do concreto asfáltico diferente do primeiro deram melhores aproximações, embora não se conseguindo coincidência de resultados. Para melhor acurácia é preciso que os dados de cons-

tantes térmicas do material sejam medidos e não adotados.

A teoria empregada para desenvolver uma equação capaz de ser usada para prever gradientes de temperatura em pavimentos é de equações iterativas de fluxo de calor unidimensional.

O pavimento é dividido em pequenas camadas de espessura  $\Delta x$ , camadas  $i-1$ ,  $i+1$ ,  $i+2$ , etc.

As temperaturas são calculadas no intervalo de tempo  $\Delta t$ , começando em  $T$  e terminando em  $T_1$



A equação diferencial parcial para condução transiente de calor em um meio, em uma dimensão é:

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

onde:

$$K = \text{difusidade térmica} = \frac{\text{condutividade}}{\text{calor específico} \times \text{densidade}}$$

$T$  = temperatura

$t$  = tempo

$x$  = profundidade abaixo da superfície

Escrita em outra forma:

$$(1) \dots K \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) (T_{i-1} - T_i) / \Delta x - (T_i - T_{i+1}) / \Delta x =$$

$$= (T_i^1 - T_i) / \Delta t$$

onde:

$T_i$  - é a temperatura a um nível do pavimento

$$\text{III} \quad K (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}) / \Delta x^2 = (T_i^1 - T_i) / \Delta t \dots (2)$$

ou:

$$K \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}) + T_i = T_i^1 \dots (3)$$

Condições no topo do pavimento (superfície):

O topo do pavimento pode ser descrito como estando em equilíbrio térmico, o calor absorvido pela radiação iguala o calor perdido pela convecção e radiação + o calor conduzido para dentro do pavimento:

$$rI = h_1 (T_i - T_a) + K (T_{i-1} - T_{i+1}) / 2\Delta x \dots (4)$$

onde:

$I$  = intensidade da radiação solar

$r$  = coeficiente de absorção da superfície

$h_1$  = coeficiente de transferência de calor da superfície.

$K$  = condutividade térmica do pavimento

$T_i$  = temperatura do topo do pavimento

$T_a$  = temperatura do ar.

Como  $T_i$  é a temperatura da superfície,  $T_{i-1}$  não está longe do pavimento. Então, substituindo  $T_{i-1}$  de (3) em (4):

$$\begin{aligned} T_i^1 = & \frac{2\Delta x}{\Delta K} \left( K \frac{\Delta t}{\Delta x^2} r I - T_i \left( K \frac{\Delta t}{\Delta x^2} h_1 + \right. \right. \\ & \left. \left. + K \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{K}{\Delta x} - \frac{K^2}{2 \Delta x} \right) + K \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{K}{\Delta x} T_{i+1} + \right. \\ & \left. K \frac{\Delta t}{\Delta x^2} h_1 T_a \right) \dots (5) \end{aligned}$$

Cálculos dos gradientes

Para usos práticos  $\Delta t$  e  $\Delta x$  devem ser pequenos. No caso considerado,  $\Delta t = 30$  minutos,  $\Delta x = 50$ mm. Substituição de valores reais  $K \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$  e  $\frac{\Delta x}{K}$ , os quais são também constantes para dadas condições, na equação (5), obtêm-se uma equação muito mais manuseável.

Uma temperatura inicial uniforme através do pavimento é adotada e condições práticas mostram que é possível obter isto.

Uma nova temperatura é calculada usando a equação (5). A temperatura do ar e a intensidade da radiação solar são da da como a média dos valores entre  $t$  e  $t + \Delta t$  com o propósito de cálculo, as temperaturas das outras profundidades calculadas pela equação (3); um novo gradiente térmico é assim obtido. Este novo gradiente é usado para o cálculo do próximo.

Constantes utilizadas:

Condutividade do asfalto  $K = 1,3 \text{ W/m}^0\text{C}$

Densidade do asfalto  $e = 2242 \text{ Kg/m}^3$

Calor específico do asfalto  $H = 838 \text{ J/Kg}^0\text{C} (\text{Ws} / \text{Kg}^0\text{C})$

Difusividade do asfalto  $K = \frac{K}{eK} = 6,94 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{seg.}$

Coefficiente de transferência de calor  $h_c = 12 \text{ W} / \text{m}^2\text{C}$

Coefficiente de absorção,  $r = 0,95$

$\Delta t = 1800\text{s}$  (30 min)

$\Delta x = 50 \text{ mm}$

A previsão empírica de temperatura no pavimento parte de medição real que mostra a tendência da variação diária da temperatura ser de forma senoidal, diminuindo seus "picos" com a profundidade.

A estimativa é feita através da relação harmônica simples com o tempo e a profundidade, introduzindo um fator

de amortecimento da amplitude com a profundidade e diferença de fase por inserção de um fator dependente da profundidade no argumento da equação:

$$T = T_a \text{ sen } (\omega t - Ax) e^{-Bx}$$

onde:

t - tempo (segundo)

$\omega$  - velocidade angular =  $2\pi r d / 86400s$

A e B - constantes

T - temperatura do pavimento

$T_a$  - amplitude

x - profundidade (metros)

A diferença de fase que se quer  $\bar{e}$  para compensar o atraso com que cada profundidade atinge a máxima e a mínima temperaturas, em relação à superfície.

As constantes são calculadas a partir de dados experimentais.

Para os dados de Wilson :

$$T = T_a \text{ sen } \left( \frac{\pi}{12} \times \frac{1}{3600} t - 4,12x \right) e^{-5,8x}$$

Supondo que as constantes sejam válidas para qualquer pavimento betuminoso, a previsão da temperatura nas diversas profundidades será possível com o conhecimento da amplitude da variação.

A acurácia da previsão empírica foi avaliada com medições verdadeiras e verifica-se que existe similaridade entre temperatura medidas e preditas, nas horas quentes, discrepando bastante no período frio do dia.

A maior discrepância  $\bar{e}$  durante a noite quando a previsão não tem especial interesse, e durante as horas do dia a deficiência não  $\bar{e}$  grande, do ponto de vista prático.

A validade deste enfoque empírico  $\bar{e}$  limitada às pequenas espessuras de revestimento betuminoso sensível à tempe

ratura.

Nas figuras 19 e 20, exemplos de utilização dos dois métodos.

Wilson conclui que previsões de temperatura por simples considerações teóricas dão limitada precisão, quando se usa constantes físicas estimadas. Previsões, usando o método empírico são mais satisfatórias, porém limitadas a pequenas espessuras de material betuminoso.

6) Venkataraman, T.S. e Venkatasubramanian, V. (1977)

Os autores baseiam-se na teoria de Soutgate para prever as temperaturas dos pavimentos através da relação somente com a temperatura do ar.

Neste estudo, eles observaram que a temperatura a cada profundidade tem uma correlação com a temperatura do ar no local + a média das temperaturas do ar nos três dias anteriores.

A relação temperatura-profundidade, a cada hora, é dada por uma equação polinomial de quarta ordem:

$$Y = C_0 + C_1X + C_2X^2 + C_3X^3 + C_4X^4$$

onde:

Y = temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ , a profundidade  $x$ , em centímetros.

$C_0, C_1, C_2, C_3, C_4$  - coeficientes determinados pelo método dos mínimos quadrados.

Os resultados obtidos com esta equação, para 2,5; 5,0 e 7,5cm foram colocados em ordenadas, em gráficos cuja abscissa é a soma da temperatura do ar na hora e dia estudado + a média das temperaturas do ar nos três dias anteriores (figura 18).

Para as 13 horas, a correlação apresentada foi linear, praticamente, para as profundidades, com coeficientes de correlação de 0,94 em média e erro padrão de estimativa de  $1,5^{\circ}\text{C}$ , em média.

Para verificar esta correlação empírica, comparou-se os resultados calculados e medidos em observações que não foram incluídas na regressão, obtendo-se ótima concordância de valores.

Os autores apresentam também uma forma de estimativa da temperatura da superfície baseada no gradiente de temperatura do ar observado.

Por observações, sabe-se que a temperatura do ar e da superfície do pavimento são próximas às 6 horas da manhã (antes do nascer do sol) e que a superfície atinge seu máximo próximo às 13 horas, em dias claros.

O objetivo então é conseguir uma relação entre os gradientes de temperatura do ar e da superfície entre estes dois horários.

Por regressão linear obteve-se uma equação:

$$Y = 1,56x + 0,95$$

onde:

Y = gradiente de temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$  por hora)

x = gradiente de temperatura do ar, durante o mesmo intervalo de tempo.

Comparando-se as temperaturas estimadas e medidas observou-se que diferem de  $4^{\circ}\text{C}$ , o que foi atribuído ao efeito da velocidade do vento sobre o pavimento que não foi considerada por causa de sua complexidade.

\* \* \*

### III - EXPERIMENTAÇÃO DE CAMPO

#### 3.1. - Aparelhagem e Instalação de Campo

As medições de campo foram feitas num painel experimental da COPPE e na pista experimental de Imbituba, na BR 101 em Santa Catarina, do DNER.

O painel experimental da COPPE foi construído em duas partes idênticas, de 4 x 8 metros cada, sendo uma cercada por alambrado e tendo uma cabine de alvenaria para abrigar os registradores, e a outra externa destinada às provas de carga e medição de deflexões. O painel compreende um pavimento de revestimento asfáltico e estrutura convencional. Sobre o aterro local, fez-se a regularização do subleito com solo A-2-7; sobre este solo uma sub-base de solo A-1-b de 25cm, e base de brita corrida A-1-a, de espessuras de 30 e 23cm, que recebeu um revestimento de concreto asfáltico de duas espessuras: 10 e 20 cm. A construção da base e do revestimento foi feita pelo DER-RJ, mas todos os demais gastos couberam à UFRJ (figura 21).

As características do concreto asfáltico, fornecidas pelo laboratório do DER-RJ são as seguintes:

	Granulometria % passando							%	$\gamma_{ap}$	estabilidade	fluência
	1"	3/4"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200				
								ligante	gf/cm <sup>3</sup>	Kgf	1/100"
Revestimento	100	99	86	66	48	20	3	5,6	2,33	727	14,5

Devido às dimensões reduzidas, a compactação foi feita com rolo muito leve, além do que o painel não está sujeito à ação do tráfego, de modo que o peso específico verificado recentemente por meio de três corpos-de-prova retirados com rotativa é de 2,15 gf/cm<sup>3</sup>. Resultou daí que as deflexões medidas no painel foram elevadas, conforme se verá mais adiante.

No painel cercado por alambrado instalaram-se cin

co termopares de cobre-constantan no centro da área de 4 x 4 metros cujo revestimento é de 20cm de espessura média. Foram os termopares instalados da superfície até o fundo, de 5 em 5 centímetros.

Os fios termopares empregados foram do tipo 24-55-1, segundo a classificação do catálogo geral Leeds e Northrup International, sendo o calibre nº 24 AWG, termopar tipo T ( Cobre-Constantan ) e o revestimento de fibra de vidro. Os termopares foram preparados simplesmente com a solda de uma das pontas do fio termopar, cuja outra ponta foi diretamente ligada ao aparelho registrador.

Tanto o registrador como os termopares foram calibrados em laboratório, colocados em gelo, na estufa e ao ar a fim de se cobrir toda a escala do aparelho ( 0 a 80°C ).

Os fios termopares devem ter aproximadamente o mesmo comprimento para que suas resistências sejam próximas e permitam uma calibração única do aparelho registrador.

Durante a construção do painel já se tinha deixado no pavimento um tubo de PVC que liga o ponto central do revestimento à cabine de colocação do registrador. Na época da instalação dos termopares (dezembro 1977), já testados em laboratórios, os fios, envolvidos em tubos plásticos, foram levados através do tubo PVC enterrado até o ponto central da placa de concreto asfáltico, onde havia sido aberto um furo com sonda rodativa.

As pontas sensíveis dos termopares foram inseridas no revestimento e o furo preenchido com nova massa, compactada com soquete Proctor.

Nenhum termopar sofreu danos com a instalação e todos estavam funcionando bem, quando se descobriu que o aparelho registrador apresentava problemas no seu compensador automático de temperatura ambiente. O registrador foi levado para conserto, ficando no fabricante até final de abril de 1978. Assim a programação de se obter um ano de registro de temperaturas não foi conseguida.

Após algum tempo de uso, o termopar de superfície apresentou problemas de comportamento irregular e foi então subs

tituido por outro, agora colocado por cima do revestimento, desde a cabine de alvenaria até o ponto de instalação dos outros termopares (e não mais dentro do tubo PVC enterrado).

O registrador instalado no painel experimental é um modelo 800 TC, da Engro, de seis canais; cinco canais estão ligados aos cinco termopares do revestimento (um a cada 5 cm), e um canal ligado a um termopar colocado em uma casinhola padronizada pela Meteorologia, para medição de temperatura do ar. Este termopar colocado ao ar serve como controlador do funcionamento do registrador porque faz-se uma comparação diária entre o valor dado por este e dois termômetros de mercúrio (um de Máxima e Mínima), também colocados na casinhola.

Outro controle periódico que se faz é a comparação das leituras do termopar de superfície com as leituras de um termômetro de contato de par bi-metálico e uma pistola de radiação, obtendo-se sempre boa concordância entre os três.

A pista experimental de Santa Catarina tem duas seções instrumentadas com termopares de Cobre-Constantan, inclusive também colocados na base e sub-leito, além do revestimento.

Durante duas campanhas de medições nesta pista experimental, o registrador Engro foi levado para este local, mas existe lá um pirômetro milivoltimétrico que é normalmente usado nas medições.

Foram feitas medições com viga Benkelman tanto no painel experimental quanto na pista experimental de Santa Catarina para se verificar o efeito da temperatura nas medidas de deflexões.

A pista experimental de Santa Catarina foi construída com o propósito de se estudar o comportamento de misturas pozolânicas tipo areia-cal-cinza volante, e para isto foram feitas dez seções de 54 metros cada, com diversos tipos de mistura como base. Para comparação, construiu-se também duas seções com base granular.

Os termopares se encontram instalados em duas seções com base cimentada, do tipo básico, que é 83% de areia de

duna, 4% de cal e 13% de cinza volante; uma com 5 cm de revestimento de concreto, asfáltico e outra com 10cm.

Os ensaios de viga Benkelman para o estudo da influência da temperatura foram feitos na seção descrita anteriormente, de 5 cm de revestimento, e na seção de base granular também com 5 cm de revestimento.

A viga Benkelman empregada foi sempre tipo 4:1, com defletômetro de 0,01 mm e caminhão carregado com 8,2t por eixo. O método de ensaio é descrito no Método DNER MB 24-75, só que a temperatura foi medida com termopares.

A radiação solar é medida em local próximo ao painel experimental da COPPE, por um piranômetro Eppley, ligado a um registrador Engro, modelo 800, de um canal. Este aparelho está sendo usado e seus dados coletados, por uma equipe de pesquisadores da Química para outro plano de pesquisa sobre problemas de absorção da radiação solar.

\* \* \*

### 3.2 - O perfil de temperatura

Os dados de temperatura do revestimento do painel experimental estão sendo coletados regularmente desde maio de 1978. Infelizmente, não podemos apresentar resultados de um ano de medições, porque tivemos problemas com o registrador, como já comentado.

Nas observações feitas, foi possível constatar as conclusões e comentários dos autores consultados, em sua maioria.

Infelizmente, não foi possível instalar nova série de termopares na parte menos espessa do revestimento, o que permitiria a comprovação do fato apresentado por alguns pesquisadores de que a espessura do revestimento não influi no perfil de temperatura. Mas isto será feito em breve, com a continuação da pesquisa.

Foi visto que o perfil de temperaturas com o tempo, tem uma tendência para um ciclo senoidal, em um período de vinte e quatro horas. A temperatura da superfície é que sofre as maiores variações diárias, apresentando os maiores máximos e os menores mínimos.

Como se pode ver pelas figuras 22 e 23, que apresentam dias típicos de sol, no inverno e no verão, a forma das curvas é a mesma, só variando os picos alcançados.

Há uma inversão total durante a noite, em relação às posições das curvas de temperatura versus tempo, a cada profundidade. Durante o dia a temperatura é maior na superfície de crescendo para baixo; durante a noite, a superfície se resfria mais que todas as outras profundidades, ficando próxima à temperatura do ar.

A temperatura da superfície responde quase que instantaneamente às variações das condições meteorológicas tais como insolação ou chuva, nuvens e ventos. Gradientes de  $10^{\circ}\text{C}/\text{hora}$  não são raros de ocorrer na superfície, enquanto as outras profundidades não respondem com tanta rapidez às variações (a cinco centímetros por exemplo, o máximo gradiente observado foi

de 5°C/hora).

Em um dia de chuva, as temperaturas permanecem como durante a noite, ou seja, mais frio na superfície e mais quente no fundo. Um dia típico de chuva é mostrado na figura 24, enquanto na figura 25, mostra-se um dia de sol que passa a nublado e logo após, chuva.

A superfície atinge seu máximo próximo às 13 horas normalmente, mas o revestimento, como um todo atinge o máximo entre 15 e 16 horas, quando toda a camada absorveu o calor da radiação solar, que está, então diminuindo.

Cada profundidade atinge, seu máximo em horas diferentes, defasadas da superfície tanto mais quanto mais profunda, sendo também seus picos menores em relação aos picos da superfície.

Os mínimos geralmente ocorrem mais próximos e antes um pouco do nascer do sol.

A radiação solar tem grande influência sobre os níveis de temperatura atingidos pelo revestimento. Se se compara dois dias com radiação solar diferente e mesma temperatura média do ar, nota-se que os perfis de temperatura serão diferentes para cada quantidade de radiação recebida.

No dia 14 de junho, a radiação solar recebida foi de 375 cal/cm<sup>2</sup>, para temperaturas do ar máxima e mínima de 25°C e 15°C, e as curvas de temperatura versus tempo estão na figura 26. Já o dia 18 de agosto teve máxima de 26°C e mínima de 14,5°C, com 469 cal/cm<sup>2</sup> de radiação solar, está mostrado na figura 26. Todos os níveis de profundidade atingiram temperaturas maiores no dia de maior radiação solar, sendo que a superfície e 5 cm de profundidade apresentaram temperaturas máximas 6°C maiores no dia 18 de agosto, em relação ao dia 14 de junho.

Nos perfis de temperatura versus profundidade pode-se notar como são acentuados os gradientes de temperatura que ocorrem no revestimento, numa mesma profundidade, com a variação do tempo, e em relação a cada profundidade, numa mesma hora.

A figura 27 mostra um dia de setembro no qual a superfície teve uma variação de 36°C entre as 6 e as 12 horas,

enquanto a vinte centímetros de profundidade, no mesmo período, a variação foi de  $7^{\circ}\text{C}$ , o que demonstra bem o gradiente interno de temperaturas a que está sujeita a camada de concreto asfáltico. Em um pavimento espesso, como é o caso do painel experimental isto é muito marcante. O amolecimento diferencial na camada ocorre fatalmente, nestas circunstâncias.

Nas tabelas 2 a 6 está mostrado um levantamento feito entre os registros de temperaturas obtidos no painel experimental da COPPE na tentativa de se agrupar os dados obtidos em 140 dias de observações (figuras 41a, b e c).

Os registros foram transportados para folhas de anotações do tipo apresentado como tabela 1, de onde se extrairam os dados para estas tabelas.

Apesar de se ter também dados de temperatura durante a noite estes não foram agrupados por não serem de grande interesse.

Contou-se as horas em que cada profundidade permanece entre determinados níveis de temperaturas, e calculou-se qual a porcentagem correspondente em relação ao número total de horas obtidos no registro.

Pode-se notar que a temperatura da superfície sofre as maiores variações, distribuindo-se desde  $10^{\circ}\text{C}$  até  $80^{\circ}\text{C}$ , sendo que permaneceu mais tempo entre 40 e  $50^{\circ}\text{C}$  (27,6%).

Nenhuma profundidade apresentou-se com temperaturas abaixo de  $10^{\circ}\text{C}$ , apesar das medições terem coberto exatamente a estação fria do ano. E também por esta razão, visto não se ter dados de um ano completo de observações, as grandes temperaturas não apresentam porcentagens significativas de permanência já que não se observou o verão.

A profundidade de 5 centímetros, na maior porcentagem de observações estava entre 30 e  $40^{\circ}\text{C}$  (41% dos dados); já prenunciando um aumento das temperaturas maiores, nos últimos tempos apresentou uma temperatura de  $61^{\circ}$  às 14 horas (dia 21/11/78).

A profundidade de 10 centímetros permaneceu, duran

te as observações, mais tempo entre as temperaturas 20 e 30°C (44,8%), mas também quase o mesmo tempo entre 30 e 40°C (43,6%) evidenciando o fato de que quanto maior é a profundidade, menores as variações térmicas.

A 15 centímetros, o concreto asfáltico ficou 54 por cento do tempo entre 20 e 30°C, e 42 por cento entre 30 e 40°C, ao contrário da profundidade de 20 centímetros, que teve sua maior permanência entre 30 e 40°C, onde esteve 66,8% do tempo. É a profundidade mais estável, a de 20 centímetros, e durante grande parte dos dias frios permanece a temperaturas maiores que a profundidade de 15 centímetros.

Infelizmente, como não se tem dados de pelo menos um ano de observações, nenhuma conclusão pode ser tirada sobre a propriedade de se fazer os ensaios de estabilidade Marshall a 60°C. Ou seja, não se pode concluir se níveis mais altos de temperaturas são atingidos em porcentagens significativa do tempo que justifique uma outra análise da estabilidade.

No entanto, pelos dados colhidos, nota-se perfeitamente a tendência de se obter temperaturas elevadas durante o verão, e em níveis de 60 a 70°C até a 5 centímetros de profundidade.

É necessário o prosseguimento da pesquisa aqui no painel experimental e em outros pontos do país, a fim de se definir realmente o perfil de temperaturas que ocorrem nos pavimentos betuminosos.

Regiões com elevadas porcentagens de insolação, como o Norte e Nordeste do país, por exemplo, devem atingir níveis elevados de temperatura nos revestimentos, com todas as consequências deste fato.

TABELA 1 - FOLHA DE ANOTAÇÃO DOS DADOS DE TEMPERATURA

## PAINEL EXPERIMENTAL - COPPE / UFRJ

## MEDIÇÕES DE TEMPERATURA

DIA: 23/06/78AR { MÁXIMA: 25.0°C  
MÍNIMA: 19.5°C

°C

PROF. HORA	AR	SUP.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
00	21.0	22.5	25.0	26.0	27.0	31.0
1.0	20.5	22.5	24.5	26.0	26.5	30.5
2.0	20.5	22.0	24.5	25.5	26.5	30.5
3.0	20.0	21.5	24.0	25.0	26.0	30.0
4.0	20.0	21.5	24.0	25.0	26.0	30.0
5.0	20.0	21.5	24.0	25.0	25.5	29.5
6.0	20.5	21.0	23.5	25.0	25.5	30.0
7.0	20.5	21.0	23.5	25.0	25.5	30.0
8.0	21.5	24.5	23.5	24.5	25.5	29.5
9.0	23.0	31.5	25.5	25.5	25.5	29.5
10.0	23.0	37.0	28.0	26.0	25.5	29.0
11.0	24.0	42.0	31.5	28.5	27.0	30.0
12.0	25.0	46.0	34.5	31.5	28.5	31.5
13.0	25.0	44.5	36.5	33.0	30.0	31.5
14.0	24.5	42.5	37.5	34.0	31.0	32.0
15.0	23.0	37.0	36.5	34.0	32.0	32.5
16.0	24.5	35.0	37.0	36.0	34.0	35.0
17.0	22.0	28.5	33.0	33.0	32.0	33.0
18.0	21.0	26.0	30.5	31.5	31.0	33.0
19.0	21.0	25.0	29.0	30.0	30.0	33.0
20.0	21.0	24.5	28.0	29.5	29.5	32.5
21.0	21.0	24.0	27.5	29.0	29.0	32.5
22.0	21.0	24.0	27.0	29.0	29.0	32.5
23.0	21.0	23.0	26.5	28.5	28.5	32.5
24.0	19.5	21.5	25.0	26.5	27.0	31.0
MÁX.	25.0	46.0	37.5	36.0	34.5	35.0
MÍN.	19.5	20.5	23.5	24.5	25.0	29.0

OBS: Sol. Céu limpo com algumas nuvens à tarde

**TABELA 2** - Porcentagem do tempo em que a superfície per  
manece entre as temperaturas.

(Maio a Novembro)

Hora	0+10	10+20	20+30	30+40	40+50	50+60	60+70	70+80	nº HORAS (Dias)	%
6	-	53	33	1	-	-	-	-	87	5.5
7	-	44	40	2	1	-	-	-	87	5.5
8	-	15	56	18	2	1	-	-	92	5.9
9	-	5	54	50	19	5	1	-	134	8.6
10	-	2	20	62	43	5	3	1	136	8.7
11	-	3	9	39	54	26	7	1	139	8.8
12	-	-	12	19	60	40	4	5	140	8.9
13	-	1	9	12	62	46	7	3	140	8.9
14	-	1	9	15	74	36	3	2	140	8.9
15	-	1	10	35	82	10	2	-	140	8.9
16	-	2	13	87	30	5	-	-	137	8.7
17	-	2	33	66	4	-	-	-	105	6.7
18	-	5	65	22	2	-	-	-	94	6.0
TOTAL	-	134	363	428	433	174	27	12	1571	100
%	-	8.5	23.1	27.2	27.6	11.1	1.7	0.8	100	

**TABELA 3** - Porcentagem do tempo em que a profundidade de 5cm permanece entre as temperaturas.  
(Maio a Novembro)

Hora	0+10	10+20	20+30	30+40	40+50	50+60	60+70	70+80	nº HORAS	%
6	-	14	71	2	-	-	-	-	87	5.5
7	-	15	70	2	-	-	-	-	87	5.5
8	-	11	77	3	1	-	-	-	92	5.9
9	-	8	94	29	3	-	-	-	134	8.6
10	-	2	83	46	4	1	-	-	136	8.7
11	-	1	47	78	11	2	-	-	139	8.8
12	-	-	24	78	33	5	-	-	140	8.9
13	-	-	14	74	45	7	-	-	140	8.9
14	-	-	12	64	56	7	1	-	140	8.9
15	-	-	12	61	59	8	-	-	140	8.9
16	-	-	13	71	50	3	-	-	137	8.7
17	-	-	11	71	21	2	-	-	105	6.7
18	-	-	23	64	7	-	-	-	94	6.0
TOTAL	-	51	551	643	290	35	1	-	1571	100
%	-	3.3	35.0	40.9	18.5	2.2	0.1	-		

**TABELA 4** - Porcentagem do tempo em que a profundidade de 10 cm permanece entre as temperaturas.

(Maio a Novembro)

Hora	0+10	10+20	20+30	30+40	40+50	50+60	60+70	70+80	nºHORAS	%
6	-	3	82	2	-	-	-	-	87	5.5
7	-	4	81	2	-	-	-	-	87	5.5
8	-	4	84	4	-	-	-	-	92	5.9
9	-	6	115	12	1	-	-	-	134	8.6
10	-	3	95	36	2	-	-	-	136	8.7
11	-	1	86	48	4	-	-	-	139	8.8
12	-	-	56	77	7	-	-	-	140	8.9
13	-	-	35	88	15	2	-	-	140	8.9
14	-	-	18	90	29	3	-	-	140	8.9
15	-	-	13	91	33	3	-	-	140	8.9
16	-	-	13	89	32	3	-	-	137	8.7
17	-	-	11	75	18	1	-	-	105	6.7
18	-	-	15	71	8	-	-	-	94	6.0
TOTAL	-	21	704	685	149	12	-	-	1571	100
%	-	1,3	44.8	43.6	9.5	0.8	-	-	100	

**TABELA 5 -** Porcentagem do tempo em que a profundidade de 15cm permanece entre as temperaturas.

(Maio a Novembro)

Hora	0+10	10+20	20+30	30+40	40+50	50+60	60+70	70+70	nº HORAS	%
6	-	1	83	3	-	-	-	-	87	5.5
7	-	1	83	3	-	-	-	-	87	5.5
8	-	1	87	4	-	-	-	-	92	5.9
9	-	2	120	12	-	-	-	-	134	8.6
10	-	2	112	20	2	-	-	-	136	8.7
11	-	-	94	41	4	-	-	-	139	8.8
12	-	-	83	53	4	-	-	-	140	8.9
13	-	-	59	74	7	-	-	-	140	8.9
14	-	-	42	91	7	-	-	-	140	8.9
15	-	-	28	102	10	-	-	-	140	8.9
16	-	-	23	101	13	-	-	-	137	8.7
17	-	-	17	80	8	-	-	-	105	6.7
18	-	-	18	73	3	-	-	-	94	6.0
TOTAL	-	7	849	675	58	-	-	-	1571	100
%	-	0.5	54.0	41.8	3.7	-	-	-	100	

**TABELA 6** - Porcentagem do tempo em que a profundidade de 20 cm permenece entre as temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ )

(Maio a Novembro)

Hora	0+10	10+20	20+30	30+40	40+50	50+60	60+70	70+80	nº HORAS	%
6	-	-	37	49	1	-	-	-	87	5.5
7	-	-	41	45	1	-	-	-	87	5.5
8	-	-	47	44	1	-	-	-	92	5.9
9	-	-	71	60	3	-	-	-	134	8.6
10	-	-	63	71	2	-	-	-	136	8.7
11	-	-	57	78	4	-	-	-	139	8.8
12	-	-	45	91	4	-	-	-	140	8.9
13	-	-	33	102	5	-	-	-	140	8.9
14	-	-	22	111	7	-	-	-	140	8.9
15	-	-	19	113	8	-	-	-	140	8.9
16	-	-	14	114	9	-	-	-	137	8.7
17	-	-	8	90	7	-	-	-	105	6.7
18	-	-	6	82	6	-	-	-	94	6.0
TOTAL	-	-	463	1050	58	-	-	-	1571	100
%	-	-	29.5	66.8	3.7	-	-	-	100	

### 3.3. - O efeito da temperatura nas deflexões

A metodologia empregada para se pesquisar o efeito da temperatura nas deflexões recuperáveis medidas com a viga Benkelman foi a de se fazer uma série de ensaios, em um mesmo ponto do pavimento, durante um dia.

Foi feita uma série de ensaios, no painel experimental da COPPE, e uma série de ensaios na pista experimental de Santa Catarina, em duas seções.

É evidente que não são dados suficientes para se obter qualquer conclusão definitiva, mas objetiva-se somente recolocar a questão da influência da temperatura nas deflexões.

Na pesquisa bibliográfica comentada em capítulo anterior, as opiniões são controvertidas.

A literatura brasileira sobre o tema é muito restrita e faz-se necessário realmente que o assunto seja retomado em uma pesquisa ampla, principalmente agora que avaliação e projetos de reforço estão na ordem do dia.

No painel experimental da COPPE, as deflexões foram elevadas, mas explica-se pelo fato de que este está muito deformável por ter sido pouco compactado devido às suas dimensões e por não receber tráfego.

Os resultados desta medição estão nas figuras 28 e 29, onde também aparece o fator de correção "f", definido por Southgate.

O fator "f" é calculado através da relação entre a deflexão à temperatura padrão e a deflexão a uma temperatura qualquer de ensaio.

A temperatura padrão foi tomada igual a 21°C para efeito de comparação entre os resultados obtidos e as correções citadas pelo método DNER-ME 24-75 e pelo Instituto do Asfalto dos Estados Unidos.

A deflexão à temperatura padrão foi calculada através da reta de regressão linear obtida com os pontos de medição.

A figura 29 mostra o ajustamento dos fatores de correção calculados para os dados do painel com a curva "B" do Instituto do Asfalto, que é usada para pavimentos com 4" ou mais de revestimento asfáltico e/ou subleito fraco. No caso do painel, o revestimento no ponto de ensaio com a viga Benkelman tem 10 centímetros de concreto asfáltico.

As medições feitas na pista experimental de Santa Catarina estão apresentadas nas figuras 31 a 36.

As seções estudadas na pista experimental tem revestimento de 5 centímetros de concreto asfáltico. A chamada seção 3 tem base de areia-cal-cinza volante e a seção 11 tem base granular.

Dos 20 pontos estudados (10 em cada seção, 5 em cada trilha de roda), quatro não apresentaram nenhuma correlação e os outros tiveram coeficientes de correlação variando de 0,51 a 0,95.

Os fatores de ajustamento "f" calculados com os dados da seção 3, mostrados na figura 37 mostram que estes variam mais em torno da curva "B" do Instituto do Asfalto, do que da curva "A", como seria o esperado.

Os fatores de ajustamento "f" calculados para a seção 11, mostrados na figura 38, tem uma variação entre as curvas "A" e "B", mais próximas de "A", mostrando um comportamento mais plausível.

Como já foi comentado, os dados são muito poucos para se tirar alguma conclusão.

Mas, reafirma-se mais uma vez, a necessidade de uma pesquisa ampla sobre o tema que conduza a resultados possíveis de fornecerem elementos melhores para um julgamento adequado do problema, e que conduza a soluções tanto do fator de correção quanto a maneira de se considerar a influência da temperatura no dimensionamento.

Calculou-se também, com os dados obtidos nas campanhas de medições, o fator de ajustamento das deflexões com a temperatura conforme o processo da Argentina, definido no capítulo anterior e apresentado no trabalho de Petroni e outros (1977).

Neste trabalho é definida uma expressão de correção das deflexões da forma:

$$D_{20} = \frac{D_t}{K \cdot e \cdot (t-20) + 1}$$

onde:

$D_{20}$  - deflexão a  $20^{\circ}\text{C}$ , temperatura tomada como padrão,  $10^{-2}$  mm

$D_t$  - deflexão a temperatura qualquer  $t$  de ensaio

$K$  - fator de correção

$e$  - espessura total de asfalto (incluindo base estabilizada com asfalto, se houver)

O fator de ajustamento "K" é obtido empiricamente como uma média dos valores obtidos em diversas medições e baseado na equação:

$$C_t = K \cdot D_{20} \cdot e$$

onde:

$C_t$  - coeficiente angular da reta de regressão obtida com dados de deflexão versus temperatura.

$K$  - coeficiente de proporcionalidade

$D_{20}$  e  $e$  - como definidos anteriormente

Alguns exemplos de cálculo deste coeficiente  $K$  a parecem no trabalho e mostram que a média dos valores encontrados na Argentina é de  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ .

Para os dados do painel experimental da COPPE obtêm-se:

$$\ell = 10 \text{ cm}$$

$$D_{20} = 180 (10^{-2} \text{ mm}) \quad K = 3,7 \times 10^{-3} / \text{cm}^{\circ}\text{C}$$

$$C_t = 6,73$$

Para os dados de Santa Catarina, os cálculos aparecem na tabela 7, e podemos tirar dois valores médios, um para

a seção 3 e outro para a seção 11.

A seção 3 apresenta um valor médio do fator de correção  $K = 1,6 \times 10^{-2}$  e a seção 11 apresenta um valor médio de  $K = 2,3 \times 10^{-3}$ .

São valores bastante diferenciados, e com grandes coeficientes de variação.

Mais uma vez, nenhuma conclusão sobre o valor da correção pode ser feita, visto que os dados são poucos e variados.

A título de exemplo, tomou-se valores imaginários para observar a influência da correção da deflexão com a temperatura no dimensionamento de reforço de um pavimento.

Supondo que a deflexão de um pavimento seja  $92 \times 10^{-2}$  mm, a  $30^{\circ}\text{C}$ , e que a deflexão admissível de projeto seja  $50 \times 10^{-2}$  mm, considerando a fórmula de Ruiz para cálculo do reforço, tem-se para três tipos de correção:

a) Correção pela curva "A" do Instituto do Asfalto:

$$T = 30^{\circ}\text{C} \quad f = 0,94$$

$$D_c = 92 \times 0,94 = 87$$

$$H = \frac{R}{0,434} \log \frac{D_c}{D}$$

$$H = 6,7 \text{ cm}$$

b) Correção pela curva "B" do Instituto do Asfalto

$$T = 30^{\circ}\text{C} \quad f = 0,76$$

$$D_c = 92 \times 0,76 = 70$$

$$H = 4,0 \text{ cm}$$

c) Correção pelo fator "K"

$$K = 10^{-3} \quad D_c = 84$$

$$H = 6,2 \text{ cm}$$

d) Sem correção de efeito de temperatura

$$D_c = 92$$

$$H = 7,3 \text{ cm}$$

Como se vê, a correção do efeito da temperatura influi no dimensionamento do reforço e deve portanto ser pesquisada, definida e usada corretamente.

Tabela 7 - Valores do fator de ajustamento K para os dados da pista Experimental.

SEÇÃO	$C_t$ $10^{-2} \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$	$D_{20}$ $10^{-2} \text{ mm}$	e cm	$K = \frac{C_t}{D_{20}^e}$ $\text{cm}^{-1}/^{\circ}\text{C}$	K médio	
3.1E	0,35	5.7	5	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	
3.2E	-	7.8	5	-		
3.3E	0,32	6.4	5	$1,0 \times 10^{-2}$		
3.4E	0,59	5.8	5	$2,0 \times 10^{-2}$		
3.5E	0,25	9.0	5	$0,6 \times 10^{-2}$		
MTE	0,29	6.9	5	$0,8 \times 10^{-2}$		
3.1i	0,41	6.2	5	$1,3 \times 10^{-2}$		
3.2i	0,69	3.0	5	$4,6 \times 10^{-2}$		
3.3i	-	8.2	5	-		
3.4i	0,33	4.0	5	$1,7 \times 10^{-2}$		
3.5i	0,43	5.2	5	$1,7 \times 10^{-2}$		
MTi	0,35	5.1	5	$1,4 \times 10^{-2}$		
11.1E	0,48	57.7	5	$1,7 \times 10^{-3}$		$2,3 \times 10^{-3}$
11.2E	0,78	58.0	5	$2,7 \times 10^{-3}$		
11.3E	0,42	55.3	5	$1,5 \times 10^{-3}$		
11.4E	0,97	53.0	5	$3,7 \times 10^{-3}$		
11.5E	1,24	37.7	5	$6,6 \times 10^{-3}$		
MTE	0,78	52.4	5	$3,0 \times 10^{-3}$		
11.1i	0,39	63.0	5	$1,2 \times 10^{-3}$		
11.2i	-	69.4	5	-		
11.3i	0,44	61.2	5	$1,4 \times 10^{-3}$		
11.4i	0,78	59.9	5	$2,6 \times 10^{-3}$		
11.5i	-	64.0	5	-		
MTi	0,31	63.3	5	$1,0 \times 10^{-3}$		

#### IV - Métodos de previsão da temperatura

Entre os métodos encontrados na bibliografia sobre estimativa dos perfis de temperatura, dois foram estudados, com especial interesse visto serem os mais práticos, exigirem dados de entrada razoavelmente fáceis de serem obtidos e não necessitem muita sofisticação de cálculo.

São os processos de Barber (1957) e Southgate (1967) já citados e que agora são vistos à luz dos dados experimentais obtidos nas medições do painel experimental.

##### 4-1 - Processo de Barber

A teoria de Barber para previsão do perfil de temperaturas em pavimentos é baseada em equação de transmissão de calor e usa diversos dados de entrada, tanto características do revestimento quanto das condições climáticas locais.

Foi deduzida para ser usada para o cálculo das temperaturas máximas do dia, a cada profundidade.

Na tese de mestrado de Previtera (1974), esta teoria foi bem estudada e empregada para cálculo de influência da temperatura nas deflexões. Porém não existem dados experimentais de confirmação desta, a não ser os citados na literatura estrangeira.

Neste mesmo trabalho existe um programa em linguagem Fortran, para cálculo das temperaturas do revestimento através da fórmula de Barber, bem como a definição e dedução matemática das horas 1 e 2 de cálculo.

A "Hora 1" é a designação da hora do dia na qual o revestimento apresenta a maior quantidade de calor na massa de concreto asfáltico, ou seja, o revestimento está mais aquecido, como um todo.

A "Hora 2" é a designação da hora do dia na qual a temperatura é máxima na superfície do revestimento.

As deduções matemáticas se encontram no Apêndice II da tese de *Previtera (1974)* e não cabe aqui refazê-las, portanto, somente se apresenta a forma como calcular estas horas, através dos elementos já definidos na fórmula de Barber:

$$H_1 = t_0 + \frac{\alpha \operatorname{arc} \operatorname{tg} (C/C + H)}{0,262}$$

onde:

$$H_1 = \text{Hora 1}$$

$$t_0 = \text{hora considerada como origem}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{e^{-CZ_0} (\operatorname{sen} C z_0 - \operatorname{cos} C z_0) + 1}{e^{-CZ_0} (\operatorname{sen} C z_0 + \operatorname{cos} C z_0) - 1}$$

$$C = \sqrt{0,131/c}$$

$$H = h/K$$

$$z_0 = \text{espessura do revestimento}$$

$$H_2 = t_0 + \frac{\pi/2 + \operatorname{arc} \operatorname{tg} (C/C + H)}{0,262}$$

Através da observação dos dados de temperatura obtidos, vê-se que as Horas 1 e 2, ocorrem entre, respectivamente as 15 e 16 horas e as 13 e 14 horas, em dias normais de nebulosidade e insolação. A hora 1, que corresponde àquela na qual o pavimento se acha mais aquecido como um todo, ocorre mais tarde justamente por causa do "atraso" que as outras profundidades tem de atingir o máximo, em relação à superfície.

Para os cálculos de perfis de temperatura com a fórmula de Barber necessita-se conhecer os dados da radiação solar do dia e local do pavimento em estudo.

Os dados usados provêm de um piranômetro colocado próximo ao painel. A tabela 8 apresenta alguns dados de radiação solar bem como temperatura média do ar e variação da temperatura para os mesmos dias, e que foram usados nos cálculos com a fórmula de Barber.

Alguns exemplos de perfis calculados com a fórmula e as correspondentes temperaturas medidas, estão dados na tabela 9.

Para todos os cálculos com a equação de Barber considerou-se os valores das características térmicas do revestimento apresentados em tabelas ou citações de autores a respeito, e provavelmente daí provêm as discrepâncias entre as temperaturas medidas e calculados.

Os valores adotados para as propriedades térmicas do revestimento em estudo foram:

$$K = \text{coeficiente de transmissão térmica} = 1,042 \text{ Kcal/m.h.}^{\circ}\text{C}$$

$$h = \text{coeficiente de transmissão térmica superficial} = 17,581 \text{ (Kcal/m}^2\text{.h.}^{\circ}\text{C)}$$

$$S = \text{Calor específico} = 0,220 \text{ Kcal/Kg}^{\circ}\text{C}$$

$$b = \text{coeficiente de absorção solar} = 0,95$$

$$p = \text{coeficiente de perda por re-irradiação} = 0,67$$

Os valores medidos, em cada caso são:

$$I = \text{radiação solar}$$

$$T_a = \text{temperatura média do ar}$$

$$T_r = \text{variação diária da temperatura do ar}$$

$$\omega = \text{peso específico} = 2150 \text{ Kg/m}^3$$

Pode ser observado, pelos valores apresentados na tabela 9 que a fórmula de Barber dá boa aproximação para os valores calculados para a Hora 1, principalmente, embora a temperatura da superfície seja sempre um pouco menor que a medida.

Para a hora 2, caso em que a temperatura da superfície é máxima, as discrepâncias entre os valores medidos e calculados são maiores (sempre o calculado menor) mas as outras profundidades dão boa concordância o que, em termos de temperatura média é significativo.

A fim de se observar o comportamento da fórmula de

Barber para o cálculo das temperaturas em todas as horas do dia modificou-se o programa apresentado na tese de *Previtera* (1974) e calcularam-se algumas curvas temperatura versus profundidade, para todas as horas do dia. Um exemplo deste cálculo é dado na figura 39, nota-se que existe grandes discrepâncias entre temperaturas medidas e calculadas, sendo variações positivas ou negativas conforme a hora.

Outros exemplos são apresentados nas tabelas 10 a 13, o que confirma que a fórmula de Barber não dá tão boa aproximação em todas as horas do dia conforme dá para as horas de máximo, para o qual foi deduzida.

Mesmo assim, pode ser usada como aproximação em caso de estudos teóricos de temperaturas de pavimentos, quando se deseja uma aproximação do que poderá ocorrer no revestimento em termos de gradientes térmicos.

Foi feita também uma análise de sensibilidade dos elementos da fórmula conforme é mostrado a seguir.

\* \* \*

#### 4.1.1 - Análise de sensibilidade da fórmula de Barber

Para se fazer um estudo de influência dos elementos que aparecem na fórmula de Barber optou-se por uma análise de sensibilidade somente nas horas 1 e 2, visto serem estas as que dão melhor ajuste entre os valores medidos e calculados.

Portanto as observações aqui feitas são válidas para estas horas de cálculo, já definidas anteriormente.

Variaram-se o coeficiente de transmissão térmica superficial, a condutividade térmica, o peso específico, o coeficiente de absorção solar e a radiação solar.

##### 1) Coeficiente de transmissão térmica superficial.

O coeficiente de transmissão térmica superficial,  $h$ , é também chamado por alguns autores de coeficiente de convecção, é influenciado pela velocidade do vento e expressa a parcela de condução de calor que se faz através da convecção das correntes de ar na superfície do pavimento.

Segundo Barber, o valor de " $h$ " é expresso por:

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

onde  $v$  é a velocidade do vento em milhas/hora.

A tabela seguinte mostra a variação dos valores de  $h$  com a velocidade do vento.

v Milhas/h	v Km/h	h BTU/ft <sup>2</sup> h <sup>0</sup> F	h Kcal/m <sup>2</sup> h <sup>0</sup> C
0	0	1,30	6,348
1	1,609	1,92	9,375
2	3,218	2,34	11,426
4	6,436	3,05	14,892
6	9,654	4,05	19,775
8	12,872	4,25	20,752
10	16,090	4,78	23,340
12	19,308	5,29	25,830
14	22,526	5,78	28,222
16	25,744	6,26	30,566
18	28,962	6,72	32,812
20	32,180	7,16	34,961

Para a análise de sensibilidade tomou-se  $h = 6,348$ ; 11,426; 14,892; 17,581 e 19,775.

O valor tomado como referência foi  $h = 17,581$ , também citado por Barber como o valor médio a ser empregado, quando não se tem dados sobre a velocidade do vento.

Em todos os exemplos estudados, os valores de temperatura calculados com este valor de  $h$  foram os mais próximos dos valores medidos, em todas as profundidades em geral. Considerando porém, só a temperatura da superfície, nota-se que o melhor ajuste entre valores medidos e calculados se faz ora com valores de  $h$  menores, ora maiores que este, especialmente para a hora 2, que corresponde à hora de maior temperatura na superfície.

Para a hora 2, quanto maior a temperatura medida na superfície, melhor ajuste com menor valor de  $h$ , mas maiores discrepâncias nas outras profundidades.

Em geral, as temperaturas em todas as profundidades variam inversamente com o valor de  $h$ , quanto maior o coeficiente de transmissão térmica superficial, menores as temperaturas, principalmente na superfície.

A influência de  $h$  é variável conforme o nível de temperatura calculado, porém, uma variação média é mostrada na figura 40. Indicou-se nestes gráficos a diferença entre os valores calculados com cada valor de  $h$  e as temperaturas medidas, a cada profundidade, no eixo das ordenadas.

No eixo das abcissas aparecem os coeficientes de transmissão térmica superficial.

## 2) Condutividade térmica

Tomou-se como referência o valor de condutividade térmica  $K = 0,70 \text{ BTU/ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}$  citado por Barber (1957) em seu trabalho e também por Willianson (1971).

Em unidades coerentes com o sistema empregado, este valor de referência  $K$  é igual a  $1,042 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Variou-se o valor de  $K$  de  $0,5$  a  $0,9 \text{ BTU/ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}$  que corresponde a  $0,744$  a  $1,340 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Para os casos estudados (10 dias) notou-se pequena influência da variação da condutividade térmica nas temperaturas calculadas.

Para a superfície a tendência é se ter maiores temperaturas quanto menor o valor da condutividade térmica, numa variação máxima de  $2^\circ\text{C}$ , entre valores calculados com  $K = 0,744$  (maiores) e  $K = 1,340$  (menores), para as horas 1 e 2.

Para as profundidades de  $0,05$ ,  $0,10$  e  $0,15$  metros, a tendência foi permanecer constante o valor da temperatura, para os valores de condutividade térmica analisados, observando-se no máximo  $1^\circ\text{C}$  de diferença, mas agora ao contrário, quanto maior  $K$ , maior a temperatura.

Para a profundidade de  $0,20\text{m}$  a tendência continua a de maior temperatura para maiores valores de condutividade térmica, sendo a diferença máxima encontrada de  $2^\circ\text{C}$ .

## 3) Peso específico

Como já foi mencionado, o nosso painel experimen-

tal não está bem compactado, visto que, por causa de suas pequenas dimensões, foi compactado com rolo muito leve.

Foram retirados três corpos de prova com sonda rotativa e obteve-se em laboratório a massa específica de 2150.

Portanto o peso específico básico para os cálculos com a fórmula de Barber é  $w = 2150 \text{ Kgf/m}^3$ , para o painel experimental da COPPE.

Variou-se o peso específico para  $2310 \text{ Kgf/m}^3$  e  $1990 \text{ Kgf/m}^3$ , para se avaliar sua influência na obtenção da temperatura pela fórmula de Barber.

Tanto para a Hora 1 como para a Hora 2, a tendência é se obter valores maiores de temperatura quanto menor for o peso específico, para todas as profundidades. Porém as diferenças não foram além de  $1^\circ\text{C}$ , nos casos estudados, o que não é significativo, embora o peso específico varie de  $\pm 10\%$ .

#### 4) Coeficiente de absorção solar.

O coeficiente de absorção solar adotado foi de 0,95, e o estudo de sensibilidade da fórmula foi feito para coeficientes de absorção solar de 1,00 a 0,80.

É grande a influência do coeficiente de absorção solar nas horas mais quentes e de maior insolação.

Nos exemplos estudados, a variação da temperatura com o coeficiente de absorção solar foi diretamente correlacionada, ou seja, quanto maior o coeficiente de absorção solar, maior a temperatura, para todas as profundidades.

A razão de variação pode ser expressa por:

Prof. (m)	Razão = $\Delta T / \Delta b$
0,00	$1^\circ\text{C}/0,05$
0,05	$0,8^\circ\text{C}/0,05$
0,10	$0,6^\circ\text{C}/0,05$
0,15	$0,5^\circ\text{C}/0,05$
0,20	$0,4^\circ\text{C}/0,05$

## 5) Radiação Solar

O valor da radiação solar, medido com um piramômetro Eppley em local próximo ao painel experimental, foi variado em mais ou menos dez por cento em relação ao valor medido em cada dia. Obteve-se uma variação de  $1,8^{\circ}\text{C}$  para a superfície,  $1,5^{\circ}\text{C}$  para cinco centímetros de profundidade,  $1,2^{\circ}\text{C}$  para dez centímetros de profundidade,  $0,9^{\circ}\text{C}$  para quinze centímetros de profundidade e  $0,7^{\circ}\text{C}$  para vinte centímetros de profundidade, para mais ou menos do valor base, conforme a radiação solar fosse mais ou menos 10% da medida.

\* \* \*

**TABELA 8 - Dados de Radiação Solar e Temperatura do Ar**

DIA	RÁDIAÇÃO SOLAR Cal/cm <sup>2</sup>	TEMP. MEDIA AR °C	VARIAÇÃO DA T. AR °C
12.5.78	469	22.0	10.0
15.5.78	429	25.5	15.0
16.5.78	415	26.5	11.0
24.5.78	388	20.5	9.0
12.6.78	393	20.5	9.0
15.6.78	362	19.5	9.0
19.6.78	371	22.0	10.0
23.6.78	361	22.3	5.5
28.6.78	373	22.5	9.0
10.7.78	375	22.0	10.0
14.7.78	363	21.0	8.0
19.7.78	406	22.0	6.0
5.8.78	443	21.5	9.0
8.8.78	453	24.5	11.0
10.8.78	426	25.5	11.0
11.8.78	435	25.0	16.0
18.8.78	469	20.3	11.5

TABELA 9 - Valores de Temperatura Medidos e Calculados pela Fórmula de Barber.

Profundidade (m)	Dia 28/6/78				Dia 10/8/78			
	Hora 1		Hora 2		Hora 1		Hora 2	
	M	C	M	C	M	C	M	C
0.00	40.0	40.0	47.5	42.1	44.0	45.6	56.0	48.2
0.05	37.0	37.5	37.0	37.0	43.0	43.0	42.5	42.2
0,10	34.0	34.5	33.0	33.0	38.5	39.0	36.5	37.3
0,15	32.0	31.8	30.0	30.0	35.5	36.0	33.5	34.0
0,20	31.5	30.0	31.0	28.0	34.5	34.0	33.5	32.0

Profundidade (m)	Dia 11/8/78				Dia 18/8/78			
	Hora 1		Hora 2		Hora 1		Hora 2	
	M	C	M	C	M	C	M	C
0.00	49.0	47.0	54.5	50.0	45.0	42.0	50.0	45.
0.05	44.0	44.0	42.0	43.0	41.0	39.0	38.0	38.
0.10	38.0	40.0	36.0	38.0	36.0	35.0	33.0	33.
0.15	34.5	36.0	33.0	34.0	32.0	32.0	30.0	30
0.20	34.0	34.0	33.0	32.0	31.5	29.5	29.0	27.

**TABELA 10 - Valores de temperatura medidos e calculados pela fórmula de Barber**

Dia 17 Junho 1978

HORA	SUPERFÍCIE		5 cm		10 cm		15 cm		20 cm	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
8	18.5	27.9	18.0	23.4	19.5	21.6	21.0	21.5	25.5	22.1
9	24.0	31.3	19.5	25.9	20.0	23.2	21.0	22.3	25.0	22.4
10	31.0	34.2	22.5	28.2	21.0	24.8	21.5	23.2	25.0	22.9
11	36.0	36.5	25.5	30.4	23.0	26.4	22.5	24.3	25.0	23.5
12	41.0	38.0	30.0	32.1	25.5	28.0	24.0	25.4	26.5	24.2
13	42.0	38.6	32.5	33.4	28.0	29.3	25.5	26.5	27.0	24.9
14	41.0	38.3	34.0	34.1	29.5	30.4	27.0	27.5	28.0	25.7
15	35.5	37.1	34.0	34.2	30.5	31.0	28.0	28.3	28.5	26.4
16	30.0	35.0	32.5	33.7	31.0	31.3	29.0	28.9	29.5	27.0
17	25.0	32.3	30.0	32.5	30.0	31.1	29.0	29.2	30.0	27.5

**TABELA 11 - Valores de temperatura medidos e calculados pela fórmula de Barber.**

Dia 19 Junho 1978

HORA	SUPERFÍCIE		5 cm		10 cm		15 cm		20 cm	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
8	18.0	30.7	21.0	26.0	22.5	24.1	23.5	24.0	27.5	24.6
9	27.0	34.2	22.5	28.5	22.5	25.7	23.0	24.8	27.0	24.9
10	34.5	37.3	26.0	31.0	24.5	27.4	24.5	25.8	28.0	25.4
11	40.0	39.7	29.5	33.2	26.5	29.1	25.4	26.9	29.5	26.0
12	45.0	41.2	33.0	35.1	29.5	30.7	27.5	28.1	29.5	26.8
13	47.0	41.9	36.0	36.4	31.5	32.1	29.0	29.2	30.0	27.8
14	44.0	41.5	37.0	37.2	33.5	33.2	30.0	30.3	30.0	28.4
15	39.0	40.2	37.5	37.3	34.0	33.9	31.5	31.1	31.5	29.1
16	33.5	38.1	36.0	36.7	34.5	34.2	32.0	31.7	32.0	29.7
17	28.5	35.2	33.0	35.5	32.0	34.0	31.5	32.0	32.5	30.2

**TABELA 12 - Valores de temperatura medidos e calculados pela fórmula de Barber**

28 de Junho de 1978

HORA	SUPERFICIE		5 cm		10 cm		15 cm		20 cm	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
9	26.5	31.2	23.0	26.6	23.0	24.7	23.5	24.6	28.0	25.2
10	34.0	34.6	26.0	29.0	24.5	26.3	24.5	25.4	28.5	25.5
11	40.0	37.6	29.5	31.5	27.0	27.9	26.0	26.4	29.5	26.0
12	45.0	39.9	33.0	33.6	30.0	29.6	27.5	27.5	30.0	26.6
13	47.5	41.5	36.5	35.5	32.0	31.2	29.5	28.6	31.0	27.3
14	44.5	42.1	37.5	36.8	33.0	32.6	30.5	29.7	31.0	28.1
15	40.5	41.0	37.0	37.5	34.0	33.6	31.0	30.7	31.5	28.9
16	34.0	40.5	36.0	37.6	34.0	34.3	32.0	31.6	32.5	29.6
17	29.0	38.4	33.5	37.0	33.5	34.6	32.0	32.1	33.0	30.2

**TABELA 13 - Valores de temperatura medidos e calculados pela fórmula de Barber**

19 de Julho de 1978

HORA	SUPERFICIE		5 cm		10 cm		15 cm		20 cm	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
9	27.5	34.6	22.5	29.0	22.5	26.3	23.0	25.4	27.0	25.5
10	36.0	37.6	26.0	31.5	24.5	28.0	24.5	26.4	28.5	26.0
11	41.0	40.0	30.0	33.7	26.0	29.6	25.5	27.5	28.5	26.6
12	44.5	41.5	33.0	35.5	29.0	31.2	26.5	28.6	29.0	27.3
13	47.5	42.1	36.5	36.8	31.0	32.6	28.5	29.7	30.0	28.1
14	46.0	41.8	38.0	37.5	33.0	33.7	30.0	30.7	30.5	28.9
15	42.5	40.5	39.0	37.6	34.5	34.3	31.5	31.6	32.0	29.6
16	38.5	38.4	38.5	37.0	35.0	34.6	32.5	32.2	32.5	30.2
17	31.5	35.6	36.5	35.9	45.0	34.4	33.0	32.5	32.5	30.7

#### 4.2 - Processo de Southgate

O processo de Southgate para a previsão de perfis de temperaturas nos pavimentos asfálticos consiste em se obter retas de correlação entre valores da temperatura da superfície somados à média das temperaturas médias do ar dos cinco dias anteriores ao da medição que se quer, e os valores das temperaturas a cada profundidade.

As temperaturas a cada profundidade são obtidas de curvas empíricas que expressam a relação temperatura-profundidade, para uma dada hora através uma equação polinomial, cujos coeficientes são determinados pelo método dos mínimos quadrados.

Segundo Southgate para profundidades até 2 polegadas (5 cm) a melhor estimativa se faz usando-se para correlação somente a temperatura da superfície, enquanto que para as profundidades maiores, a precisão da estimativa varia com o número de dias tomados para se obter a "historia da temperatura do ar", conforme a hora do dia. Após várias análises, Southgate adotou a média das temperaturas médias dos cinco dias anteriores.

Em nosso trabalho, não fizemos a transformação inicial dos dados medidos em curvas empíricas de temperatura-profundidade por julgarmos que seria mais correto obtermos as retas de previsão dos perfis de temperatura diretamente com os dados medidos e não com dados "tratados".

Por isso os coeficientes de correlação obtidos são menores que os apresentados por Southgate, mas os erros-padrão de estimativa não foram maiores.

Foram estudadas correlações entre as temperaturas a cada profundidade e a temperatura da superfície somada à média das temperaturas médias de 5,3 e 1 dias anteriores ao da previsão, e também são a temperatura da superfície.

Os resultados estão apresentados, para as diversas horas do dia, nas tabelas seguintes.

Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos, de uma maneira geral, para todas as profundidades, quando

se fêz a correlação entre a temperatura a cada profundidade com a temperatura da superfície somada à média das temperaturas médias do ar dos três dias anteriores.

Quanto maior a profundidade menores os coeficientes de correlação, o que é explicável pelo fato de que as maiores profundidades tem menores variações de temperaturas em relação à superfície.

Para este tipo de correlação, o erro padrão de estimativa varia entre 0,7 a 2,6<sup>o</sup>C, conforme a hora da estimativa.

Para esta análise, foram empregados todos os dados obtidos, quer dos dias de sol ou chuva, ou quaisquer outras condições meteorológicas; as correlações foram obtidas pelo processo de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, e, em média, usou-se cem pares de dados para cada hora a cada profundidade.

Por sua simplicidade e facilidade de obtenção dos dados de entrada, o processo de previsão de Southgate pode ser usado largamente, dando boa estimativa para os perfis de temperaturas dos revestimentos a cada hora do dia.

\* \* \*

- 6 HORAS -

Correlação	Profundidade (cm)	a	b	r	e
1	5	0.56	-0.52	0.886	1.1
	10	0.51	3.18	0.864	1.1
	15	0.51	4.79	0.843	1.2
	20	0.46	11.18	0.780	1.4
2	5	0.54	0.42	0.900	1.1
	10	0.50	3.90	0.883	1.1
	15	0.49	5.46	0.864	1.2
	20	0.45	11.80	0.798	1.4
3	5	0.47	3.43	0.818	1.4
	10	0.43	6.55	0.809	1.3
	15	0.43	7.98	0.797	1.4
	20	0.38	14.39	0.722	1.6
4	5	0.68	9.79	0.823	1.4
	10	0.60	12.99	0.777	1.4
	15	0.58	14.80	0.739	1.6
	20	0.51	20.59	0.658	1.7

- 7 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.51	0.67	0.958	0.8
	10	0.45	5.00	0.940	0.8
	15	0.45	6.42	0.933	0.9
	20	0.43	11.70	0.901	1.0
2	5	0.49	1.43	0.966	0.7
	10	0.44	5.55	0.953	0.7
	15	0.44	6.95	0.945	0.8
	20	0.41	12.24	0.912	1.0
3	5	0.49	1.80	0.946	0.9
	10	0.43	5.91	0.931	0.9
	15	0.43	7.33	0.925	0.9
	20	0.41	12.57	0.892	1.1
4	5	0.67	8.97	0.941	0.9
	10	0.58	12.42	0.911	1.0
	15	0.57	13.92	0.897	1.1
	20	0.53	19.01	0.852	1.3

- 8 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.44	2.67	0.921	1.2
	10	0.33	8.53	0.876	1.2
	15	0.32	10.46	0.873	1.3
	20	0.29	16.00	0.813	1.4
2	5	0.43	3.36	0.928	1.2
	10	0.32	8.96	0.888	1.1
	15	0.32	10.69	0.881	1.1
	20	0.28	16.43	0.818	1.3
3	5	0.42	4.00	0.907	1.3
	10	0.32	9.46	0.867	1.2
	15	0.30	11.42	0.860	1.2
	20	0.27	17.12	0.782	1.5
4	5	0.51	10.88	0.893	1.5
	10	0.38	14.86	0.861	1.4
	15	0.36	16.35	0.841	1.4
	20	0.31	21.87	0.731	1.6

- 9 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.45	1.68	0.914	1.6
	10	0.31	8.58	0.842	1.6
	15	0.29	10.60	0.815	1.6
	20	0.25	16.04	0.800	1.6
2	5	0.44	2.12	0.921	1.5
	10	0.31	8.38	0.852	1.5
	15	0.28	10.75	0.830	1.5
	20	0.25	16.05	0.808	1.5
3	5	0.39	4.89	0.854	2.1
	10	0.27	10.43	0.801	2.0
	15	0.24	12.61	0.763	1.8
	20	0.22	17.89	0.739	1.7
	5	0.50	10.06	0.892	1.8
	10	0.34	14.51	0.781	1.9
	15	0.29	16.56	0.739	1.9
	20	0.26	21.46	0.715	1.8

- 12 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.51	0.68	0.892	2.6
	10	0.34	8.08	0.826	2.3
	15	0.26	11.79	0.753	2.2
	20	0.17	19.18	0.652	2.0
2	5	0.54	-1.56	0.940	2.0
	10	0.36	6.38	0.881	2.0
	15	0.27	10.50	0.803	1.9
	20	0.19	18.02	0.730	1.8
3	5	0.52	0.32	0.929	2.2
	10	0.34	7.69	0.863	2.1
	15	0.26	11.42	0.785	2.2
	20	0.18	18.71	0.703	1.9
4	5	0.57	9.52	0.908	2.1
	10	0.36	14.47	0.809	2.1
	15	0.26	17.26	0.716	2.2
	20	0.17	23.11	0.578	2.2

- 13 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.60	-3.76	0.924	2.3
	10	0.41	4.87	0.840	2,5
	15	0.30	10.06	0.763	2.4
	20	0.20	18.02	0.643	2.2
2	5	0.60	-3.32	0.924	2.4
	10	0.41	4.93	0.848	2.5
	15	0.30	9.96	0.778	2.3
	20	0.20	17.86	0.662	2.2
3	5	0.54	0.33	0.906	2.6
	10	0.37	7.70	0.822	2.6
	15	0.27	12.14	0.748	2.5
	20	0.18	19.46	0.627	2.3
4	5	0.61	9.44	0.879	2.5
	10	0.41	14.33	0.800	2.4
	15	0.29	17.35	0.642	2.5
	20	0.18	23.41	0.563	2.3

- 14 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.63	-3.61	0.912	2.3
	10	0.46	3.66	0.852	2.7
	15	0.35	8.43	0.799	2.4
	20	0.24	16.29	0.713	2.2
2	5	0.62	-2.82	0.916	2.5
	10	0.45	4.05	0.861	2.5
	15	0.35	8.58	0.813	2.3
	20	0.24	16.25	0.731	2.1
3	5	0.56	1.22	0.907	2.7
	10	0.41	7.18	0.847	2.6
	15	0.31	11.13	0.794	2.4
	20	0.21	18.18	0.707	2.2
4	5	0.66	9.14	0.904	2.7
	10	0.47	13.44	0.826	2.8
	15	0.35	16.36	0.750	2.6
	20	0.23	22.29	0.637	2.4

- 15 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.72	-6.53	0.925	2.3
	10	0.55	0.98	0.858	2.6
	15	0.43	5.74	0.820	2.4
	20	0.30	14.52	0.723	2.2
2	5	0.71	-5.71	0.926	2.3
	10	0.54	1.47	0.863	2.6
	15	0.43	5.99	0.828	2.3
	20	0.30	14.75	0.737	2.2
3	5	0.64	-1.80	0.922	2.4
	10	0.49	4.56	0.856	2.6
	15	0.38	8.60	0.816	2.4
	20	0.26	16.57	0.717	2.2
4	5	0.77	7.55	0.916	2.5
	10	0.57	12.18	0.830	2.8
	15	0.43	15.15	0.766	2.6
	20	0.28	21.67	0.639	2.5

- 16 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0,75	-5,49	0,890	2,7
	10	0,63	0,75	0,868	2,5
	15	0,52	3,39	0,847	2,3
	20	0,38	12,22	0,777	2,1
2	5	0,73	-4,81	0,910	2,6
	10	0,62	-1,18	0,877	2,4
	15	0,51	3,69	0,861	2,1
	20	0,37	12,24	0,796	2,0
3	5	0,68	-1,89	0,902	2,5
	10	0,58	2,36	0,878	2,4
	15	0,48	5,92	0,857	2,2
	20	0,34	14,14	0,782	2,1
4	5	0,86	7,09	0,903	2,7
	10	0,70	10,46	0,860	2,5
	15	0,57	13,21	0,816	2,4
	20	0,39	20,08	0,709	2,3

- 17 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0,79	-6,66	0,899	2,1
	10	0,67	-0,81	0,864	2,1
	15	0,57	3,21	0,846	2,1
	20	0,43	11,57	0,773	2,1
2	5	0,78	-5,77	0,905	2,3
	10	0,66	-0,31	0,867	2,3
	15	0,57	3,21	0,860	2,0
	20	0,43	11,21	0,799	1,9
3	5	0,74	-4,14	0,899	2,3
	10	0,63	1,50	0,859	2,3
	15	0,53	5,32	0,836	2,2
	20	0,39	13,60	0,748	2,2
4	5	0,72	13,65	0,755	3,4
	10	0,58	17,17	0,693	3,3
	15	0,48	18,82	0,660	3,0
	20	0,33	24,20	0,552	2,7

- 10 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.45	1.87	0.901	1.9
	10	0.30	8.62	0.805	1.9
	15	0.24	12.10	0.732	1.9
	20	0.21	17.58	0.696	1.9
2	5	0.45	1.72	0.909	1.8
	10	0.30	8.32	0.822	1.9
	15	0.24	11.81	0.750	1.9
	20	0.21	16.95	0.735	1.9
3	5	0.40	4.32	0.887	2.0
	10	0.27	10.30	0.791	2.0
	15	0.21	13.48	0.717	2.0
	20	0.19	18.42	0.685	2.0
4	5	0.49	10.25	0.875	2.1
	10	0.32	14.69	0.754	2.1
	15	0.24	17.19	0.666	2.1
	20	0.20	22.30	0.615	2.1

- 11 HORAS -

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.49	0.51	0.939	1.8
	10	0.32	8.13	0.836	2.0
	15	0.27	9.96	0.734	2.5
	20	0.18	18.46	0.703	1.9
2	5	0.48	0.69	0.946	1.7
	10	0.31	8.02	0.852	2.0
	15	0.27	9.88	0.748	2.4
	20	0.19	18.27	0.723	1.8
3	5	0.46	2.13	0.940	1.8
	10	0.30	9.15	0.838	2.1
	15	0.25	11.11	0.723	2.5
	20	0.18	19.00	0.706	1.9
4	5	0.52	10.03	0.921	2.0
	10	0.33	14.90	0.790	2.3
	15	0.27	15.83	0.685	2.7
	20	0.17	23.00	0.611	2.1

Correlação	Profundidade	a	b	r	e
1	5	0.94	-13,40	0.878	2.1
	10	0.87	- 9.33	0.872	2.0
	15	0.81	- 7.08	0.888	1.7
	20	0.68	1.67	0.869	1.8
2	5	0.87	-10.01	0.859	2.3
	10	0.80	- 6.02	0.849	2.2
	15	0.75	- 4.14	0.869	1.9
	20	0.65	2.38	0.873	1.6
3	5	0.81	- 7.36	0.908	1.9
	10	0.74	- 3.11	0.887	1.9
	15	0.68	- 0.71	0.887	1.8
	20	0.55	6.91	0.827	1.9
4	5	1.25	- 0.79	0.937	1.6
	10	1.13	3.07	0.908	1.7
	15	1.01	5.41	0.895	1.7
	20	0.81	12.58	0.825	1.8

Regressão linear:  $y = ax + b$

$y$  = temperatura a cada profundidade

$x$  = correlação 1, 2, 3 e 4 = temperatura da superfície somada a média das temperaturas médias do ar dos 5, 3, 1 e 0 dias anteriores, respectivamente

$a$  = coeficiente angular das retas de regressão

$b$  = constantes das retas de regressão

$r$  = coeficiente de correlação

$e$  = erro padrão de estimativa

## V - CONCLUSÕES

Apesar de não termos obtido dados suficientes para uma conclusão quanto à influência da temperatura nas deflexões de um pavimento flexível, podemos apresentar as seguintes observações:

1) Verificamos que os termopares tem bom desempenho em instalações de campo para medições em pavimentos, são duráveis e estáveis ao longo do tempo, apresentando acurácia compatível com as medidas que se pretendem.

2) O registrador utilizado na pesquisa (marca Engro) mostrou-se bastante preciso nas medições com termopares. Seu sistema de compensação interno da temperatura ambiente possibilita o registro correto das diferentes temperaturas a qualquer hora, o que facilita a obtenção dos dados.

3) A temperatura da superfície responde quase que instantaneamente às variações das condições meteorológicas. As variações de temperatura na superfície são muito grandes e chegam muitas vezes a mais de  $40^{\circ}\text{C}$  em 6 horas. Uma razão de crescimento da temperatura da superfície de  $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$  foi observada algumas vezes.

Durante o dia, a temperatura da superfície segue uma distribuição normal de frequência, entre  $10$  e  $80^{\circ}\text{C}$ , sendo que durante o período de observação permaneceu o maior número de horas entre  $40$  e  $50^{\circ}\text{C}$  (27,6% das 1571 horas observadas).

4) As temperaturas a cinco centímetros de profundidade, e a profundidades maiores, não respondem tão rapidamente, às variações meteorológicas quanto a superfície. Quanto maior a profundidade maior o tempo gasto para se atingir a máxima temperatura daquele nível, bem como, a seguir, maior o tempo gasto para se chegar à mínima.

As variações de temperatura são menores, a medida que aumenta a profundidade.

Razões de  $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$  foram as maiores observadas a cinco centímetros de profundidade, sendo menores a maiores profundidades.

Embora as observações feitas tenham sido de maio a novembro, nenhuma profundidade atingiu temperaturas menores que  $10^{\circ}\text{C}$ , permanecendo a maior parte do tempo entre  $30$  e  $40^{\circ}\text{C}$  a to das as profundidades, menos ã superfície.

5) Com os dados obtidos de medições de temperatura e de deflexão, podemos dizer que existe alguma influência da temperatura nas de flexões, mas não temos elementos para quantificã-la nem para de cidir sobre o tipo adequado de correção a ser feito.

6) O método de Barber de previsão de temperaturas dá bons resultados para a estimativa das temperaturas somente na hora correspondente ã aquela em que o pavimento se acha mais aquecido como um todo. Para as outras horas do dia, em que o pavimento como todo está menos aquecido (pela manhã, por exemplo) as discrepâncias entre valores calculados e medidos são maiores.

7) Por sua simplicidade e facilidade de obtenção dos elementos de entrada, o processo de previsão de Southgate pode ser usado largamente, dando boa estimativa para os perfis de temperaturas dos revestimentos, a cada hora do dia.

\* \* \*

VI - SUGESTÕES

O prosseguimento da pesquisa poderia incluir o seguinte:

- 1 - Instalação de postos de medição de temperaturas nos pavimentos, em várias regiões do país.
- 2 - Medições de deflexões com viga Benkelman aliadas às medições de temperatura, a fim de se chegar a correlações entre temperaturas e deflexões.
- 3 - Comparação entre a temperatura do revestimento comumente determinada num furo com óleo e a temperatura determinada com termopares a várias profundidades ou através de método de predição de temperaturas.
- 4 - Análise dos dados de temperatura nos pavimentos quanto à escolha da temperatura mais conveniente nos ensaios de laboratório.
- 5 - Estudo das propriedades térmicas de vários tipos de materiais de pavimentação, principalmente no concreto asfáltico.

\*

\*

\*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHO ROAD TEST, HRB Special Report 61 E, Pavement Research Report 5
- ASTM - STP 470 (1973)  
"Manual on the use of thermocouples"
- ASTM US vol 252 (1959) STP  
"Bituminous paving materials"
- BARBER, E. S. (1957)  
"Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports"  
Boletim nº 168 - HRB
- BISSADA, A. F. (1972)  
"Asphalt pavement temperatures related to Kuwait climate"  
HRR - 404 pág 71-85
- BULMAN, J. N. (1972)  
"Strengthening of flexible roads in the tropics: the use of deflection measurements"  
TRRL Report LR 444
- CARNEIRO, F. B. L., (1966)  
"Viga de Benkelman - Instrumento auxiliar do Engenheiro de Conservação" - Cadernos de Engenharia Rodoviária nº 2 DER-RJ
- CGRA (1971) - "A guide to the structural Design of flexible and rigid pavements in Canadá - Roads and Transportation Association of Canadá"
- COFFMAN, B. S. and KRAFT, DC (1964)  
"A comparison of calculated and measured deflections for the AAHO Road Test"  
Proc. AAPT, vol 23

- COLONY, D.C., and R. KENNETH WOLFE (1978)  
"Initial cooling of asphaltic concret mats"  
Transportation Engineering Journal of ASCE - vol 104  
nº TE 3 - Maio 1978
- DICKINSON, E.J. (1965)  
"Recording the temperature environment of road surfacings"  
A.R.R. - vol 2 nº 5
- DICKINSON, E.J. (1969)  
"Temperature conditions in bituminous surfacings at a site  
near Sydney during a period of one year"  
A.R.R. vol 3 nº 9
- DICKINSON, E.J. (1969)  
"Temperature conditions in bituminous concrete surfacings at  
a site near Melbourne during a period of three years"  
A.R.R. vol 3 nº 9
- DICKINSON, E. J. (1971)  
"Temperature conditions in bituminous surfacings at a site  
near Peath during a period of one year"  
A.R.R. vol 4 nº 7
- DICKINSON, E.J. (1975)  
"Temperature conditions in bituminous concrete pavements at a  
site Near Brisbane during a period of one year"  
A.R.R. vol 5 nº 8
- DICKINSON, E.J. (1977)  
"Temperature conditions in bituminous concrete pavements at a  
site near Camberra during a period of eleven months"  
A.R.R. vol 7 nº 4
- DUNSTAN, D.G. (1967)  
"Temperature variations in a bituminous concrete surfacing a  
at a site near Melbourne"  
A.R.R. - vol 3 nº 3

- ELONKA, S.M.; PARSONS, A.R (1976)  
tradução: CURRLIN, E.N.  
"Manual de Instrumentação - Vol I - Sistemas de medição"  
Ed. Mc Graw-Hill do Brasil
- Evaluacion y Refuerzo de Estructuras de pavimentos flexíveis"  
4º Simpósio - Buenos Aires - 1972
- FANG, H. J (1969)  
"Influence of temperature and ther climatic factors on the  
performance of soil-paviment systems"  
H.R.B. - Special Report 103
- FINN, F.N. (1967)  
"Factors involved in the desing of Asphalt Pavement Surfaces"  
Nat. Cooper, H.R. Program Report 39
- GALLOWAY, J. W. (1968)  
"Temperature durations at vários depths in bituminous roads"  
RRL report nº L R 138
- HOLMAN, J.P. (1966)  
"Experimental Methods for engineers"  
Ed. Mc. G.H.
- HVEEM, F N, and SHERMAN, G.B. (1963)  
"Thickness of flexible pavements by the California formula  
compared to AASHO Road Test data" - 42nt Annual Meeting of the  
Highway Research Board - Washington, D.C.
- JOHNSTON, G.H. (1963)  
"Instructions for the fabrications of thermocouples cables  
for measuring ground temperatures" Technical paper nº 157 -  
Division of Building Research Council-Ottawa, Canadá
- JONES, G. M.; DARTER, M.I. and LITTLE LITTLEFIELD, G. (1968)  
"Thermal expansion - contraction of asphaltic concrete"  
AAPT - 1968

- KALLAS, B.F. (1966)  
"Asphalt pavement temperatures"  
HRR nº 150
  
- KALLAS, B.F. and RILEY, J.C. (1967)  
"Mechanical properties of asphalt pavement materials"  
IIQ I.C.S.D.A.P. - Proceedings - Michigan
  
- KENNEDY, C.K. e LISTER, N.W. (1978)  
"Prediction of pavement performance and the design of overlays"  
TRRL Laboratory Report 833
  
- KINGHAM, R.I. and RESEIGH, T.C. (1967)  
"A field experiment of asphalt - treated bases in Colorado"  
IIQ I.C.S.D.A.P. - 1967 - Michigan
  
- KIRK, J.M. (1967)  
"Analysis of deflection from the AASHO Road Test"  
IIQ I.C.S.D.A.P. - Proceedings, Michigan
  
- LNEC - "Estudo dum defletôgrafo de pavimentos"  
Serviço de Geotécnica - Divisão de Estradas e Aeródromos - Re-  
latório maio'1967
  
- LISTER, N.W. (1972)  
"Deflection criteria for flexible pavements"  
TRRL Report LR 375
  
- MANZ, G.P. (1966)  
"Study of temperature variation in hot - mix asphalt base,  
surface course and sub-grade"  
HRR - 150
  
- MONISMITH, C.L. SECOR, G.A. and SECOR, K.E. (1965)  
"Temperature induced stresses and deformations in asphaltic  
concrete"  
Proceedings AAPT, 34

- MOINSMITH, C.L; SEED H. B; MITRY F.G.; CHAN C.K. (1967)  
"Prediction of pavement deflections from laboratory tests"  
IIº I.C.S.D.A.P. - Proceedings; Michigan
- MEDINA, J. e FARAH, H. (1965)  
"Dados sobre a temperatura de um revestimento betuminoso"  
IPR - 1965
- NUNN. M.E. (1973)  
"Theoretical evaluation of the effect of temperature on the fatigue behaviour of bituminous road-bases"  
T.R.R.L. Report LR 594
- OLIVEIRA, S.T. e FABRÍCIO, J.M. (1968)  
"Variações mensais de deflexões medidas com Viga de Benkelman"  
Publicação 428 - IPR
- PETRONI, EBERTO e al. (1977)  
"Variacion con la temperatura de la deflexion Benkelman"  
2º Encontro sobre Asfalto - IBP
- PREVITERA Fº, J. (1974)  
"Efeito da temperatura na deformabilidade dos pavimentos as - fálticos"  
Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ
- PRZYBYCIEN, F.E. (1967)  
"Bituminous pavement temperature related to climate"  
Tese de Mestrado - Clarkson College of Technology  
Potsdam - NY
- QUEIRÓZ, C.A.V. e VISSER, A.T. (1978)  
"Uma investigação dos módulos de resiliência de revestimentos betuminosos brasileiros" - XIV Reunião Anual de Pavimentação da ABPv
- Revista "Controle e Instrumentação" (1977).  
nº 69 - ano 6 - "Os pirômetros monocromáticos industriais"  
nº 71 - ano 6 - "Medição de temperatura de superfícies por

contato"

- RICHARDS, B.G. (1969)  
"Pavement temperatures and their engineering significance in Australia"  
HRB Special Report 103
- ROBERTS, P.K. and RUSSAM, K. (1966)  
"Road Temperatures in the tropics"  
R.R. L. Report 29 - London
- RUMMEY, T.N. and JIMENEZ, R.A. (1970)  
"Pavement temperatures in the Southwest"  
University of Arizona - Tucson, Arizona
- SCALA, A.J. and DICKINSON (1967)  
"The use of asphalt pavement structures in the Australian Environment"  
IIQ I.C.S.D.A.P. Michigan
- SCHMIDT, R.J. (1974)  
"Effect of temperature, freeze-thaw and various moisture conditions on the resilient modulus of asphalt treated mixes"  
T.R.R. - série 515
- SIEMENS AG, Tradução: Steppat, G. (1976)  
"Instrumentação Industrial"  
Ed. Edgard Blücher
- SIGHIERI, L. e NISHINARI, A. (1976)  
"Controle Automático de processos industriais - Instrumentação"  
Ed. Edgard Blücher Ltda. 2ª Edição
- SOUTHGATE, H.F. (1968)  
"An evaluation of temperature distribution within asphalt pavements and its relationship to pavement deflection"  
Kentucky Department of Highway - Research Report

- SOUTHGATE, H.F. and DEEN, R.C. (1969)  
"Temperature distribution within asphalt pavements and its relationship to pavement deflection"  
H.R.R. 291
- SOUTHGATE, H.F. and DEEN, R.C. (1975)  
"Deflection behavior of asphaltic concrete pavements"  
Proceedings A.A.P.T. vol 44
- STILL, P.B. (1972)  
"Thermal stresses in bituminous flexible pavements"  
R.R. L. Report LR 433
- STRAUBB, A.L. ; SCHENCK JR. H.N. and PRZYBYCIEN, F.E. (1968)  
"Bituminous pavement temperature related to Climate"  
H.R.R. n° 256
- TROTT, J.J. (1963)  
"An apparatus for recording the duration of various temperatures in Roads"  
Roads and Road Construction 41, 491
- VENKATARAMAN T.S. and VENKATASUBRAMANIAN, V. (1977)  
"Temperature studies on bituminous pavements in the tropics"  
A.R.R. vol. 7 n° 1
- WALSH, H.R.J. (1973)  
"Temperature instrumentation for Indiana's thermally insulated test road"  
H.R.R. 429
- WILLIAMSON; R.H. (1971)  
"The calculation and simulation of temperature variations in pavements"  
National Institute for Road Research South Africa  
RP/1/71

- WILLIAMSON, R.H. (1971)  
"The simulation of pavement temperatures from finite difference considerations"  
National Institute for Road Research South Africa  
Internal Report - RP/20/71
  
- WILSON, A.H. (1976)  
"The distribution of temperature in experimental pavements at Alconbury by-pass"  
TRRL - Report Serie LR 719
  
- YANG, N.C. (1972)  
"Design of functional Pavements"  
Ed. Mc. Graw-Hill Book Company

\* \* \*

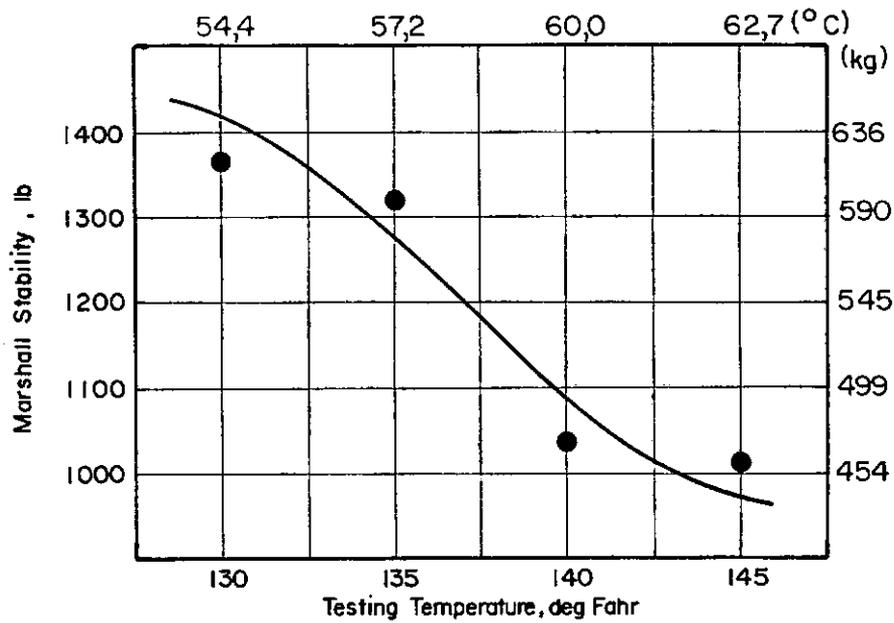


FIG.2 — Estabilidade x temperatura. (ASTM-STP 252)

kg/cm<sup>2</sup>

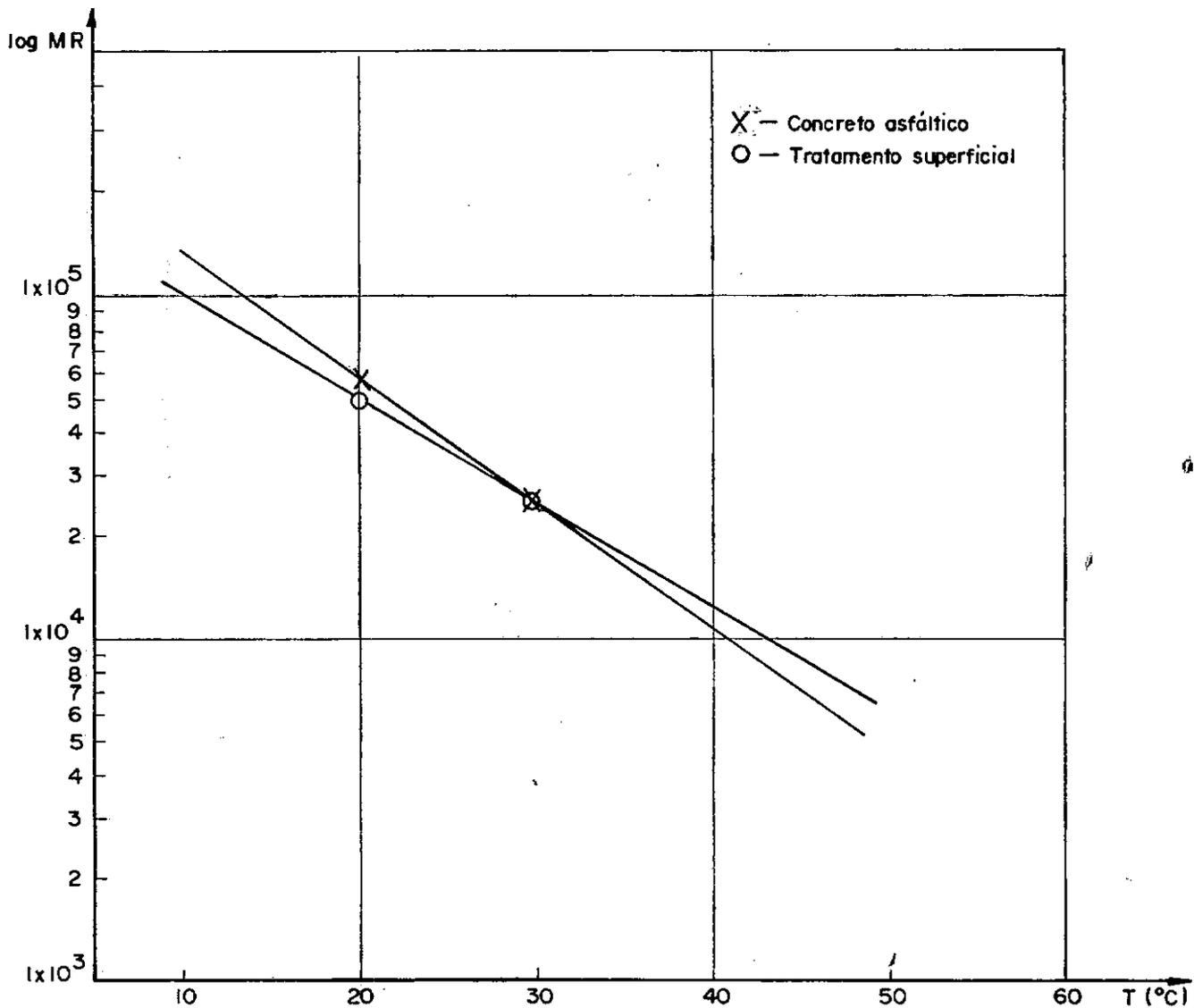


FIG.1 — Módulo resiliente x temperatura. (Queiroz e Visser, 1978)

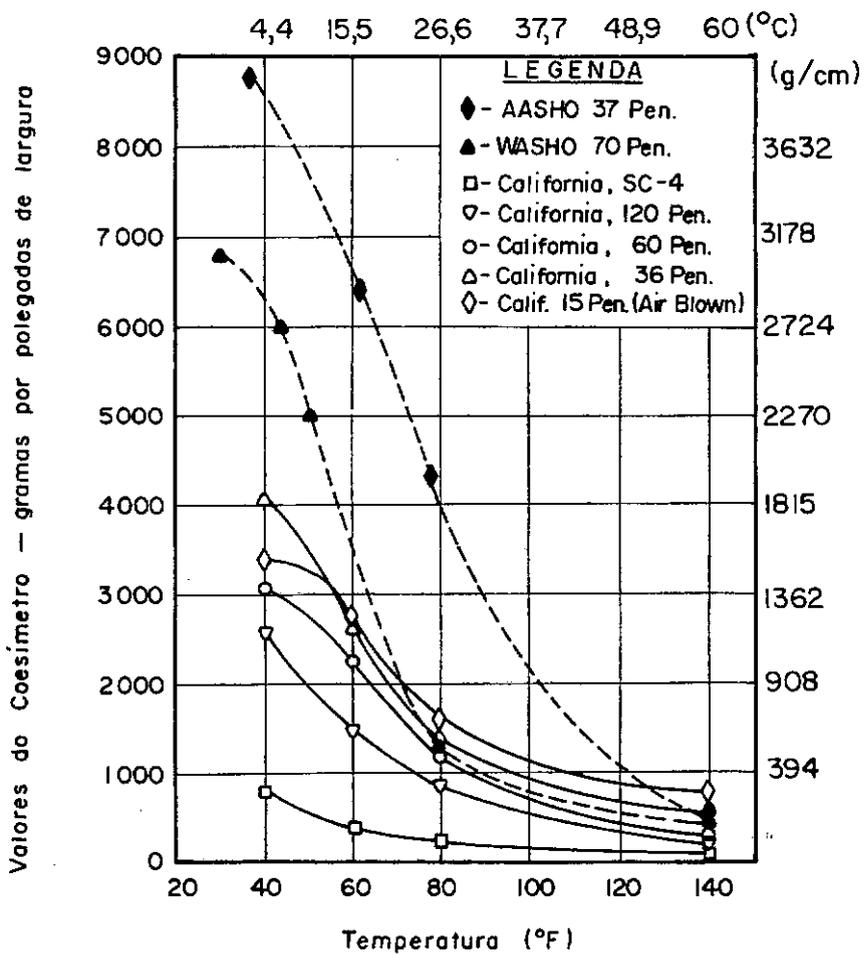


FIG. 3 — Variação da coesão com a temperatura (Hveem e Sherman, 1963)

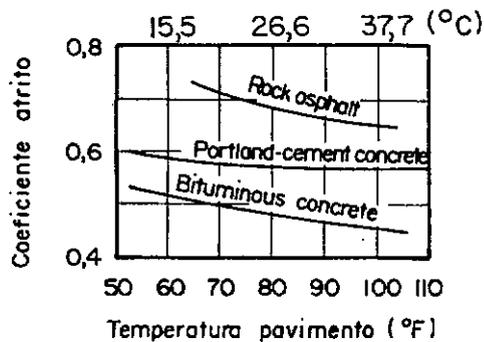


FIG. 4 — Influência da temperatura na resistência à derrapagem (atrito) (Yang, 1972)

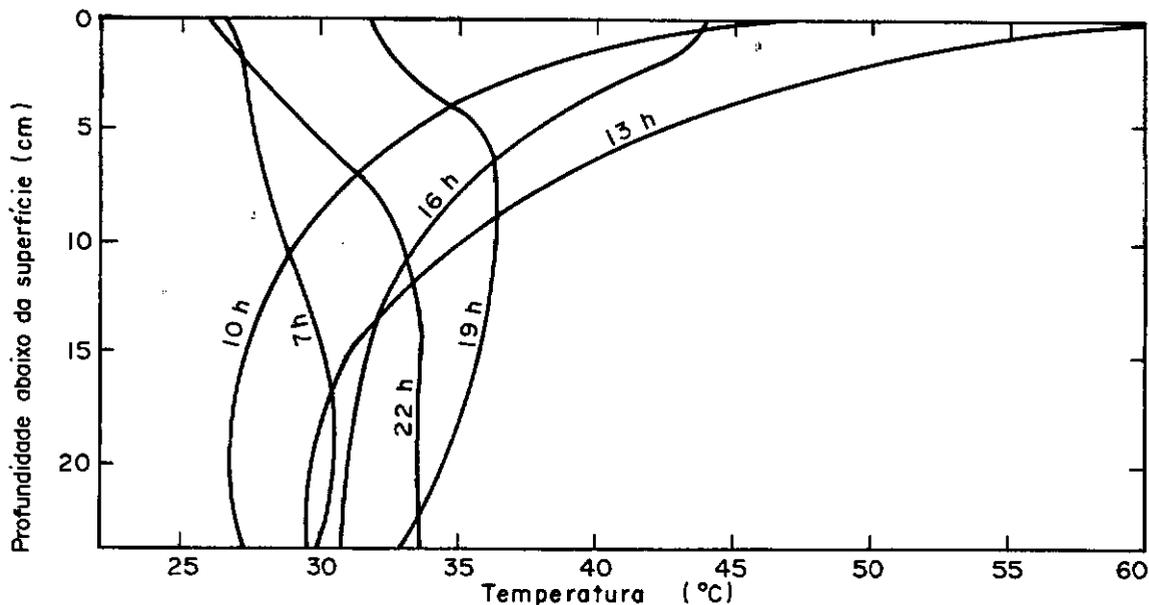


FIG. 6 — Gradientes de temperatura no pavimento em 1/4/1975 (Venkataraman e outros,77)

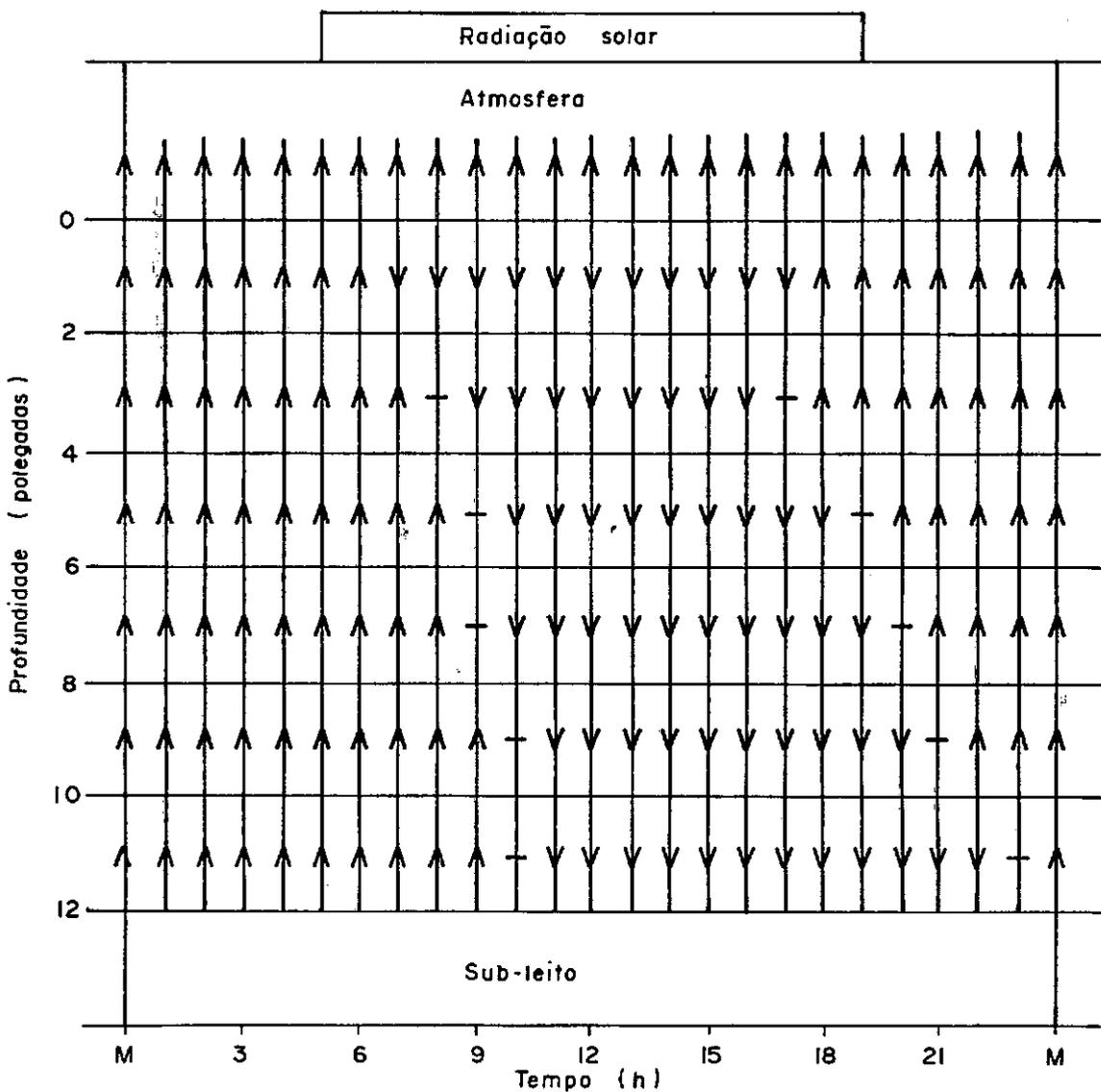


FIG. 5 — Esquema típico de fluxo de calor em pavimentos asfálticos para um dia de verão; as setas indicam a direção do fluxo (segundo Rumney e Jimenez, 1970)

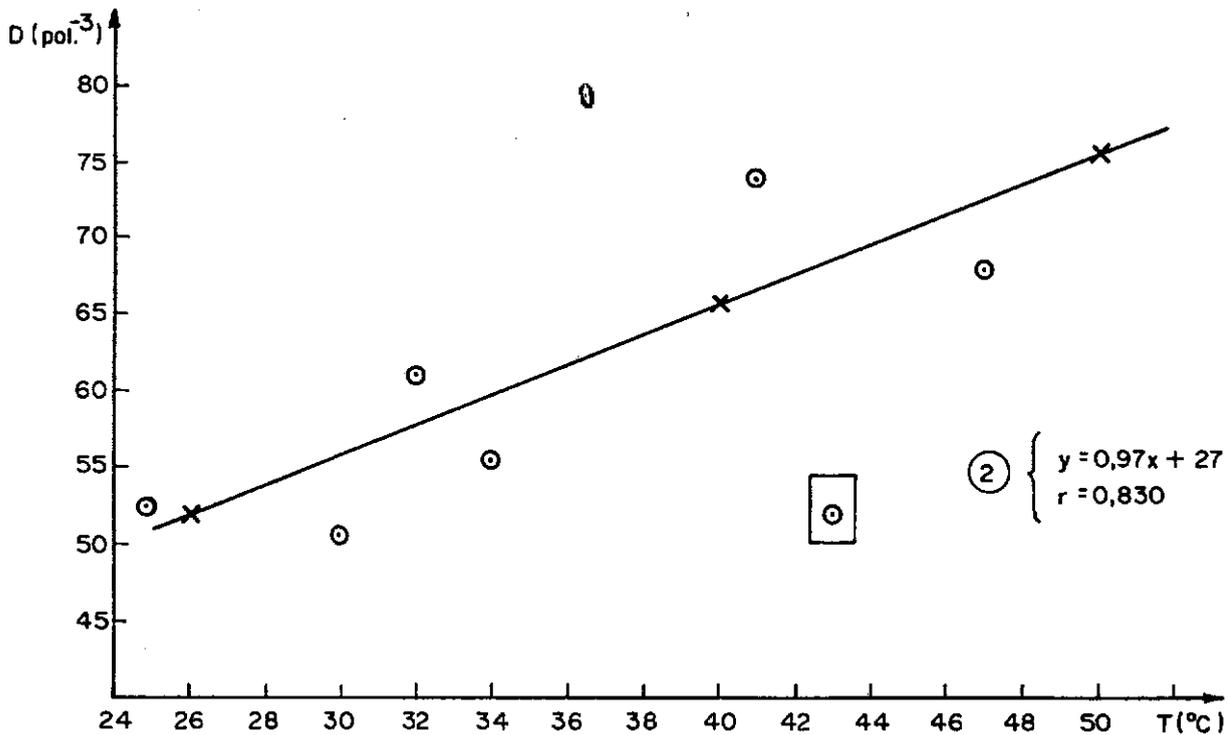


FIG. 7 — Temperatura versus deflexão (Oliveira e Fabrício) Estação 18.

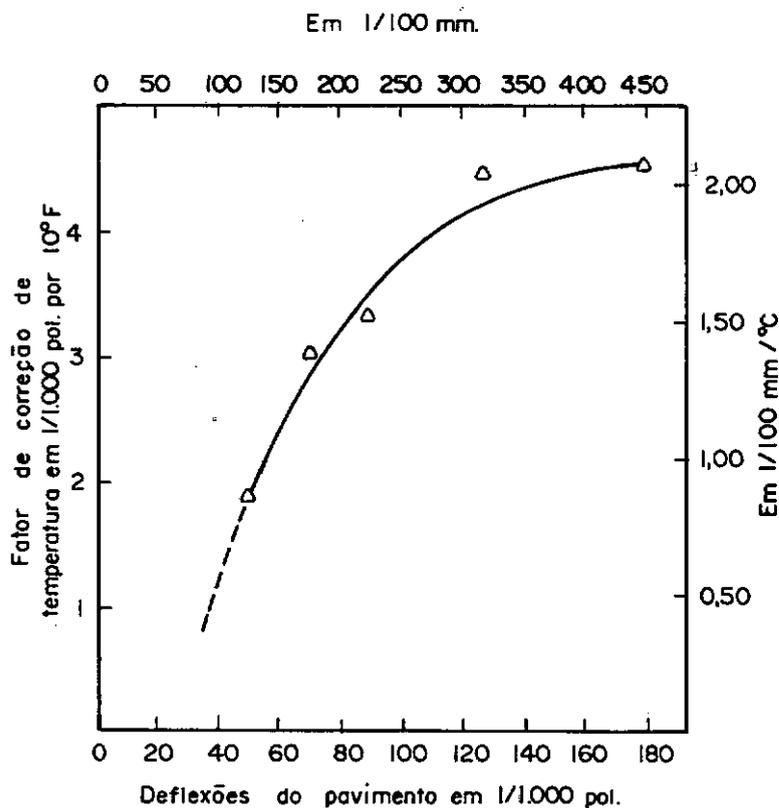


FIG. 8 — Variação do fator de correção de temperatura com a deflexão do pavimento (Carneiro, 1966)

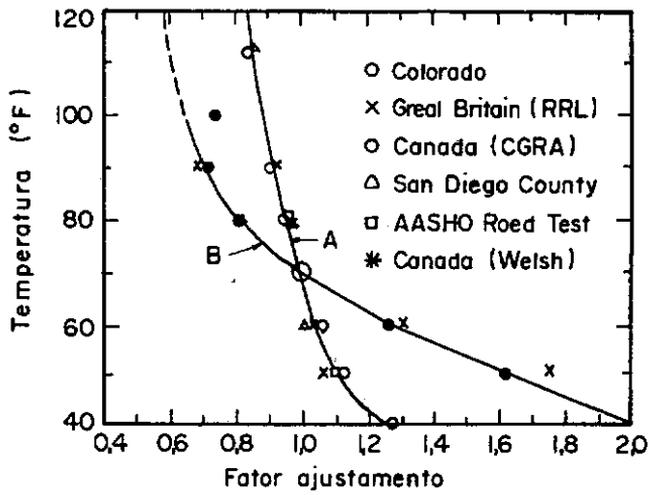


FIG. 9 – Curvas "A" e "B" do Instituto do Asfalto, com dados experimentais (Southgate e Deen, 1969)

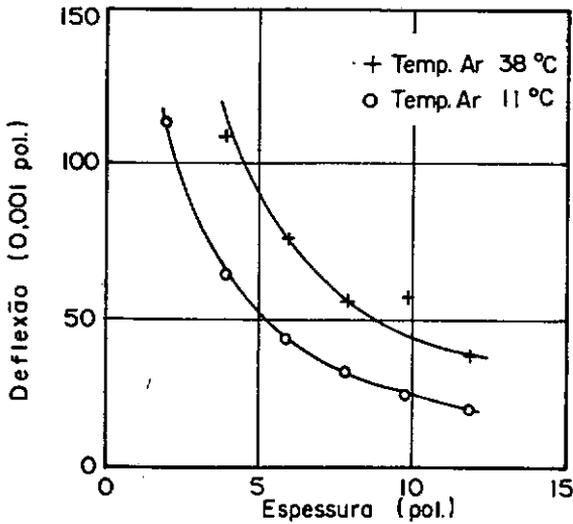


FIG. 10 – Efeito da temperatura e da espessura do pavimento nas deflexões (Scala e Dickinson 1967)

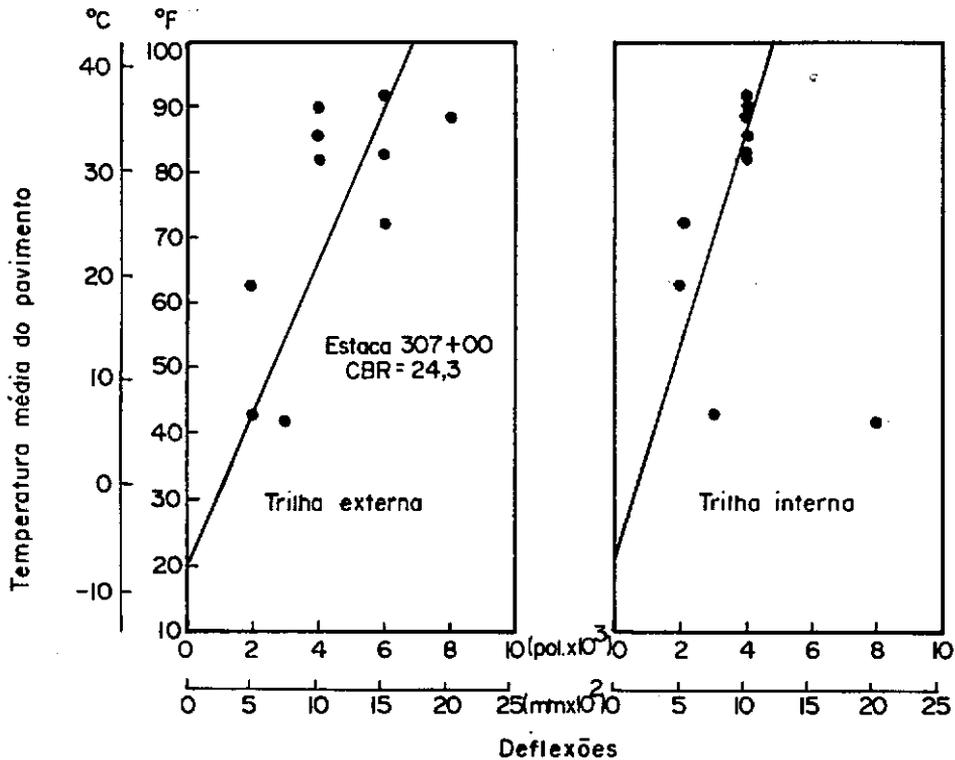


FIG. 11 – Variação das deflexões com a temperatura, relacionada ao CBR (Southgate e Deen, 1975)

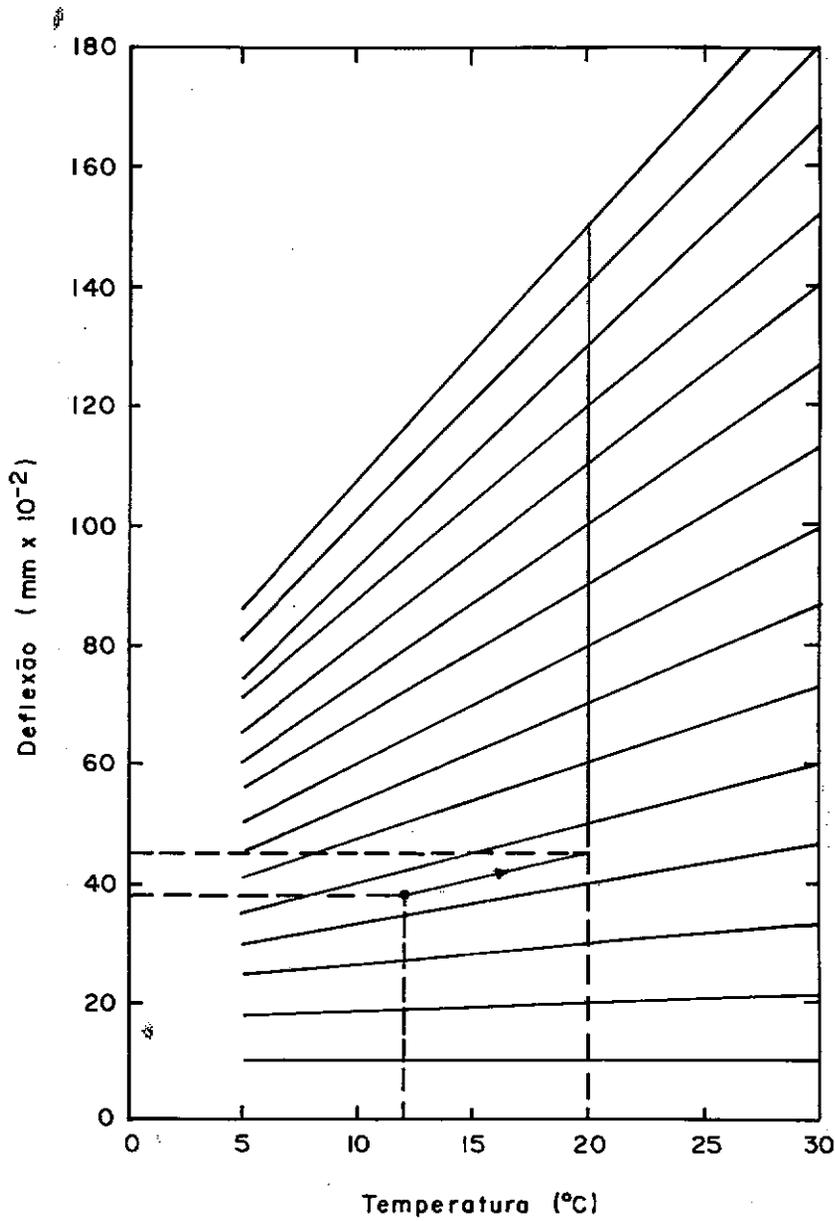


FIG.12 — Relação entre deflexão e temperatura para pavimentos com 135-195 mm de material betuminoso, no qual menos que 75 mm é de material betuminoso denso. (Kennedy e Lister, 1978)

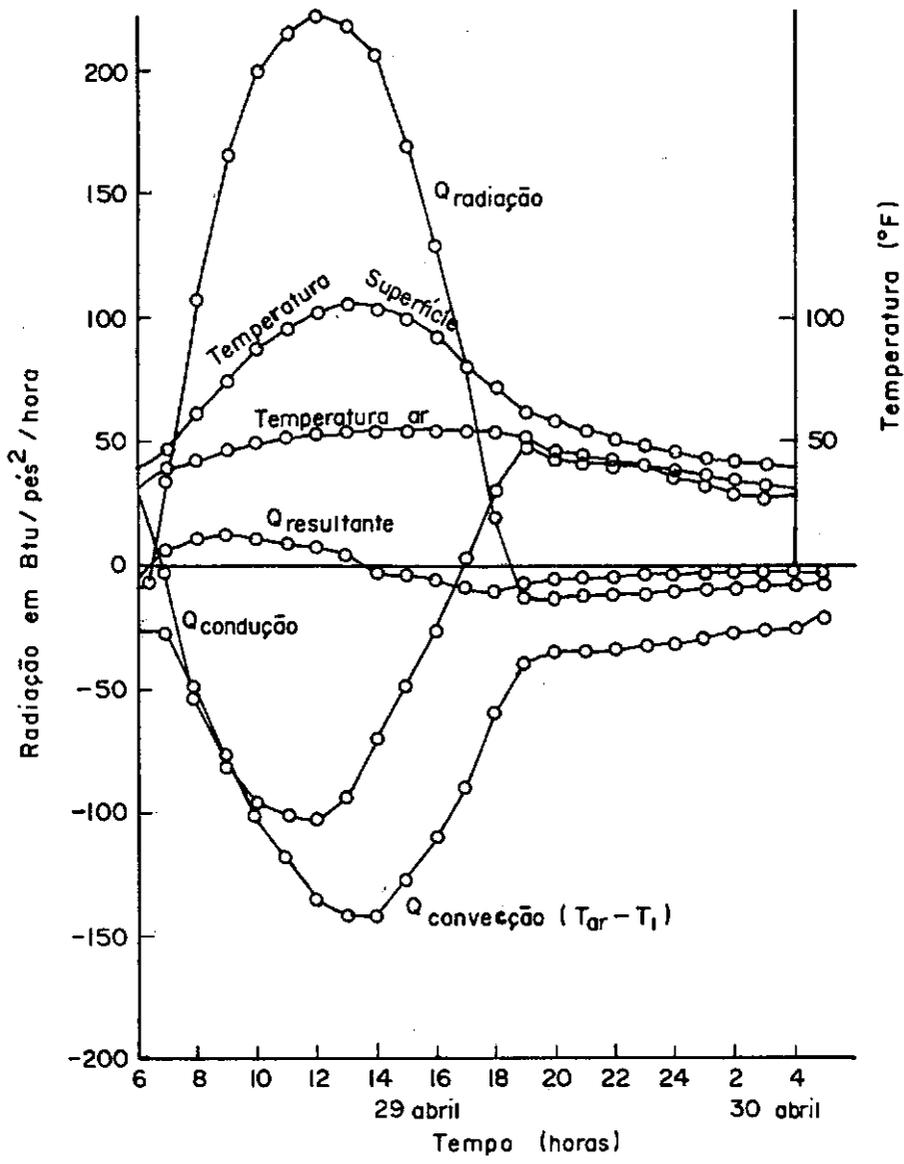


FIG. 13 — Análise de transferência de calor na superfície (Przybycien, 1967)

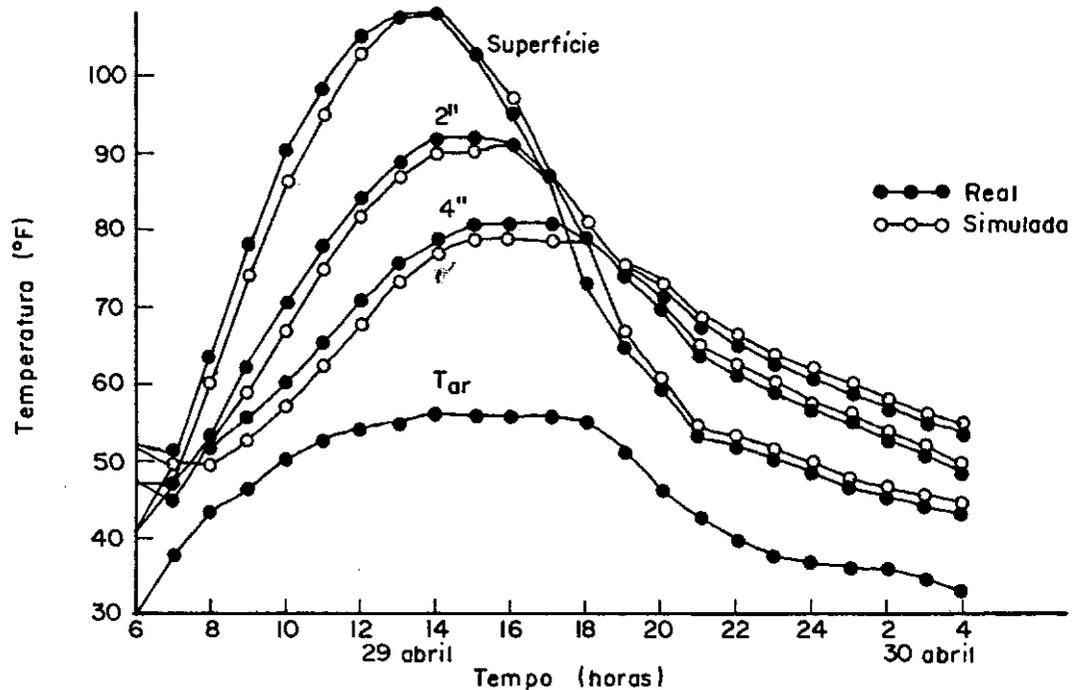


FIG. 14 — Comparação entre valores calculados e observados (Przybycien, 1967)

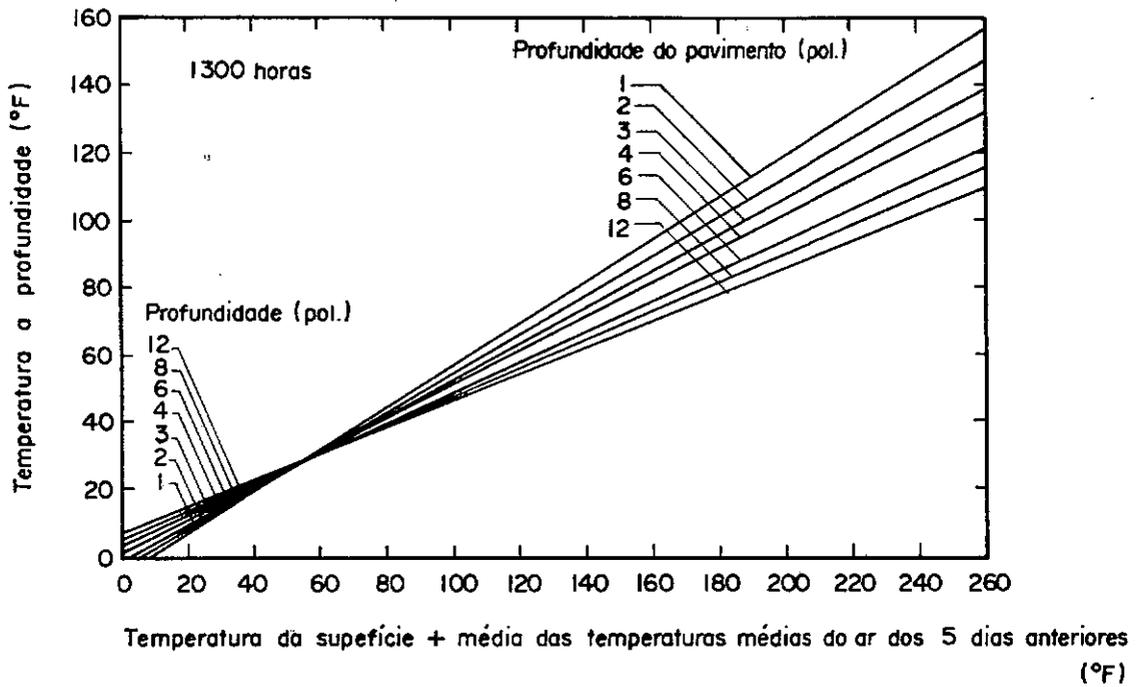


FIG. 15 — Gráfico de previsão de temperaturas para pavimento com mais de 2 polegadas (5,08cm) — (Southgate, 1968)

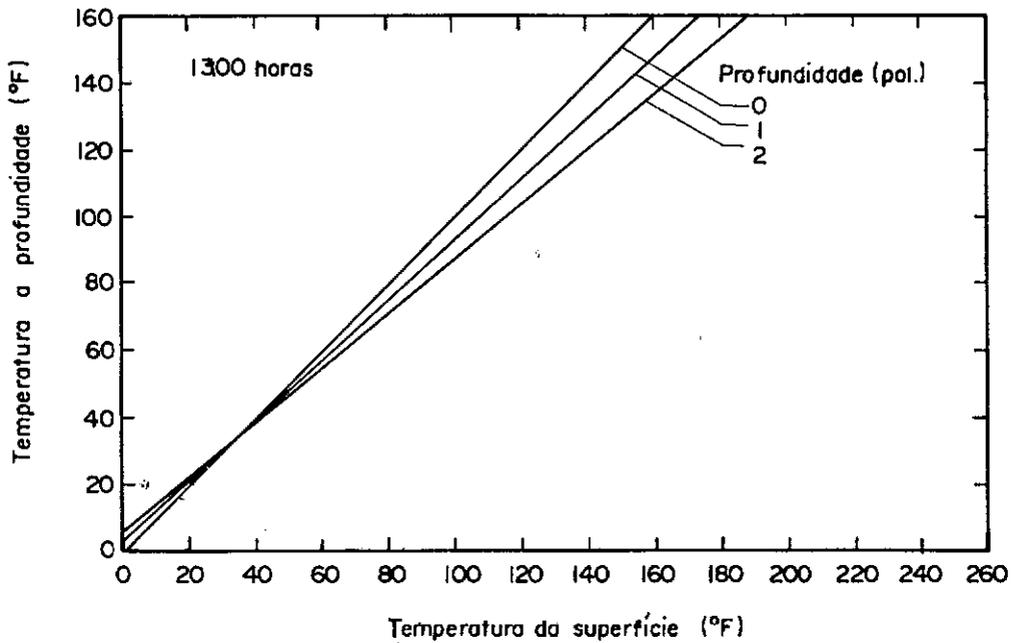


FIG. 16 — Gráfico de previsão de temperatura para pavimentos com até 2" (5,08cm) de espessura (Southgate, 1968)

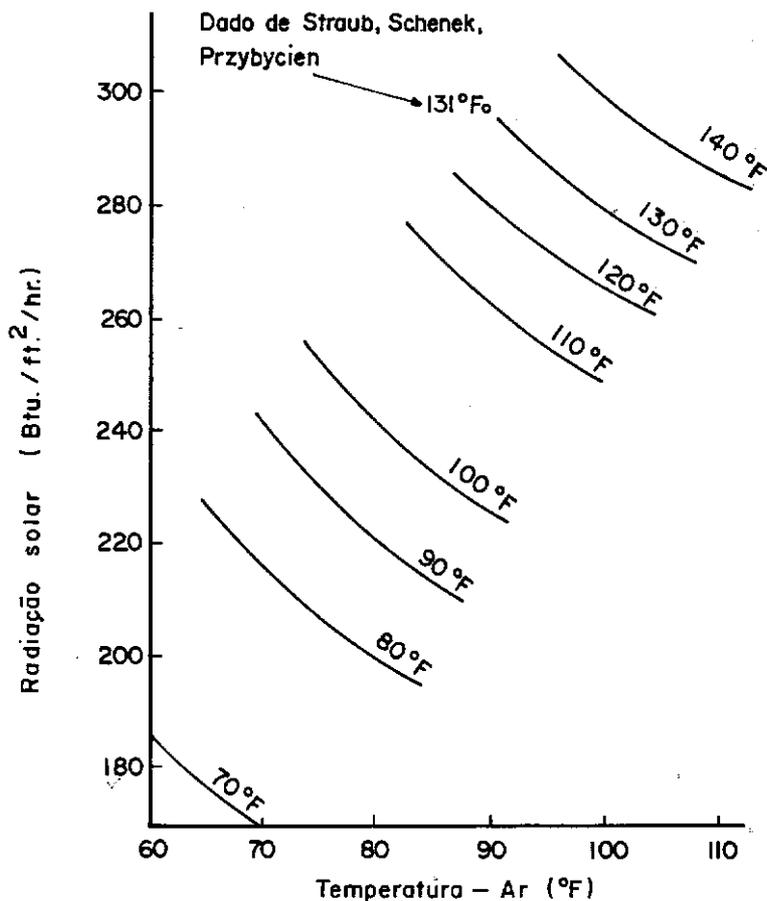


FIG. 17 — Previsão do nível máximo de temperaturas para 2" (5,08 cm) em dias claros, usado radiação solar e temperatura do ar. (Rumney e Jimenez, 1970)

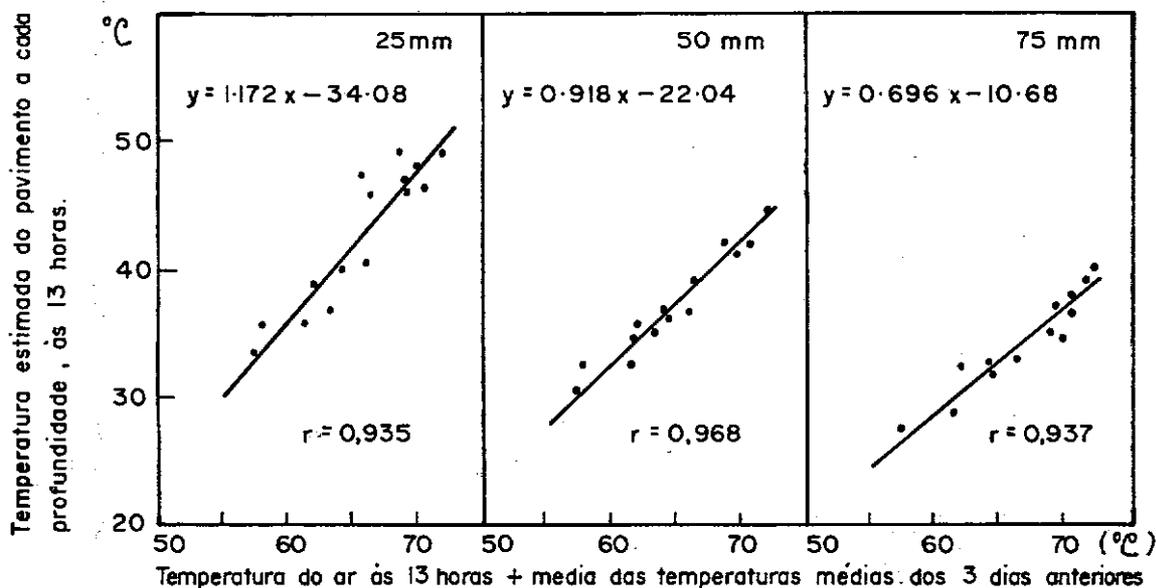


FIG. 18 — Temperaturas do pavimento calculadas para 13 horas, a diversas profundidades, através da temperatura do ar (Uenkataraman, 1977)

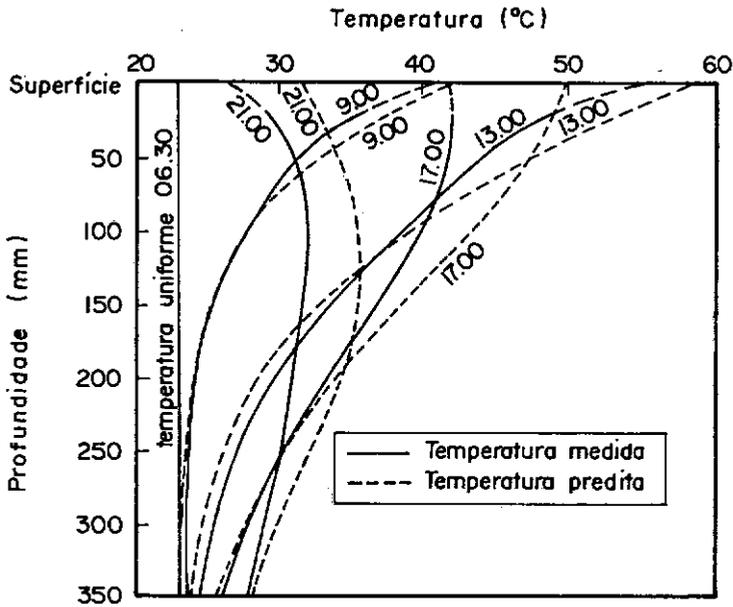


FIG. 19 — Período quente : comparação entre gradientes de temperatura medido e predito através de considerações teóricas, em um dia de sol constante. ( Wilson, 1976 )

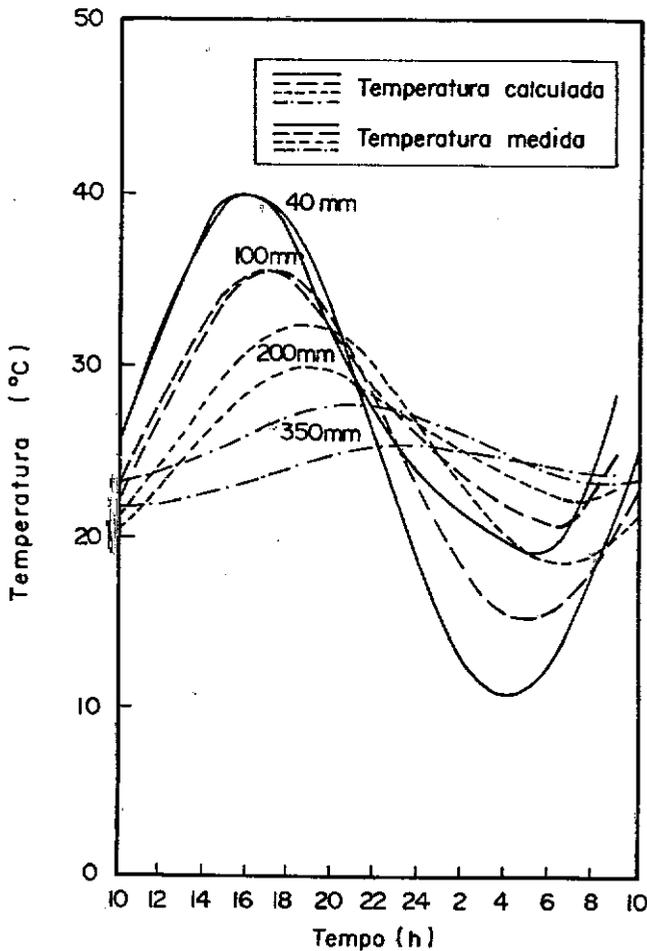


FIG. 20 — Comparação entre temperaturas medida e calculada através de relação empírica, para um período de 24 horas. ( Wilson, 1976 )

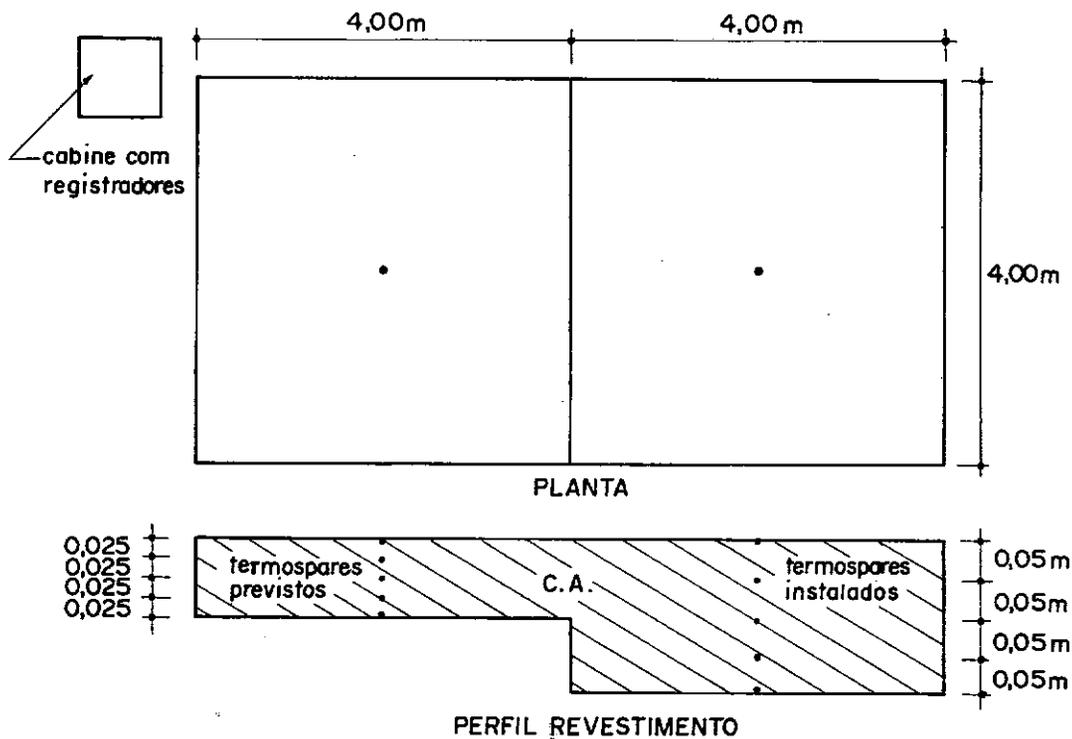


FIG. 21a— Esquema do painel experimental da COPPE / UFRJ.

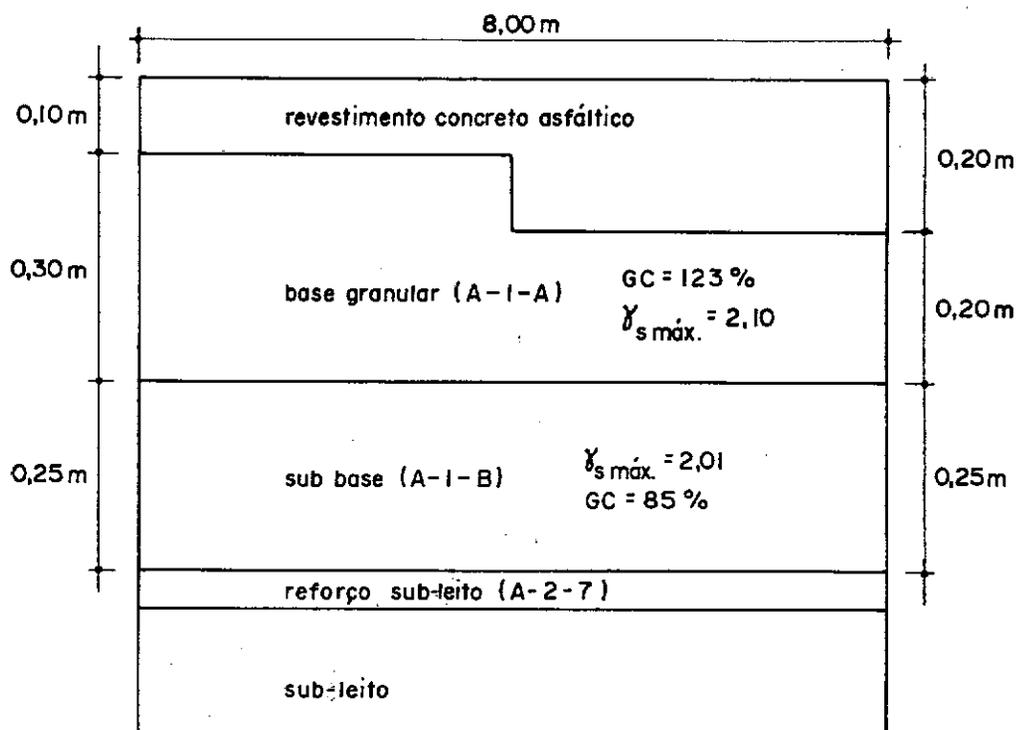


FIG. 21b— Esquema do perfil vertical do painel experimental.

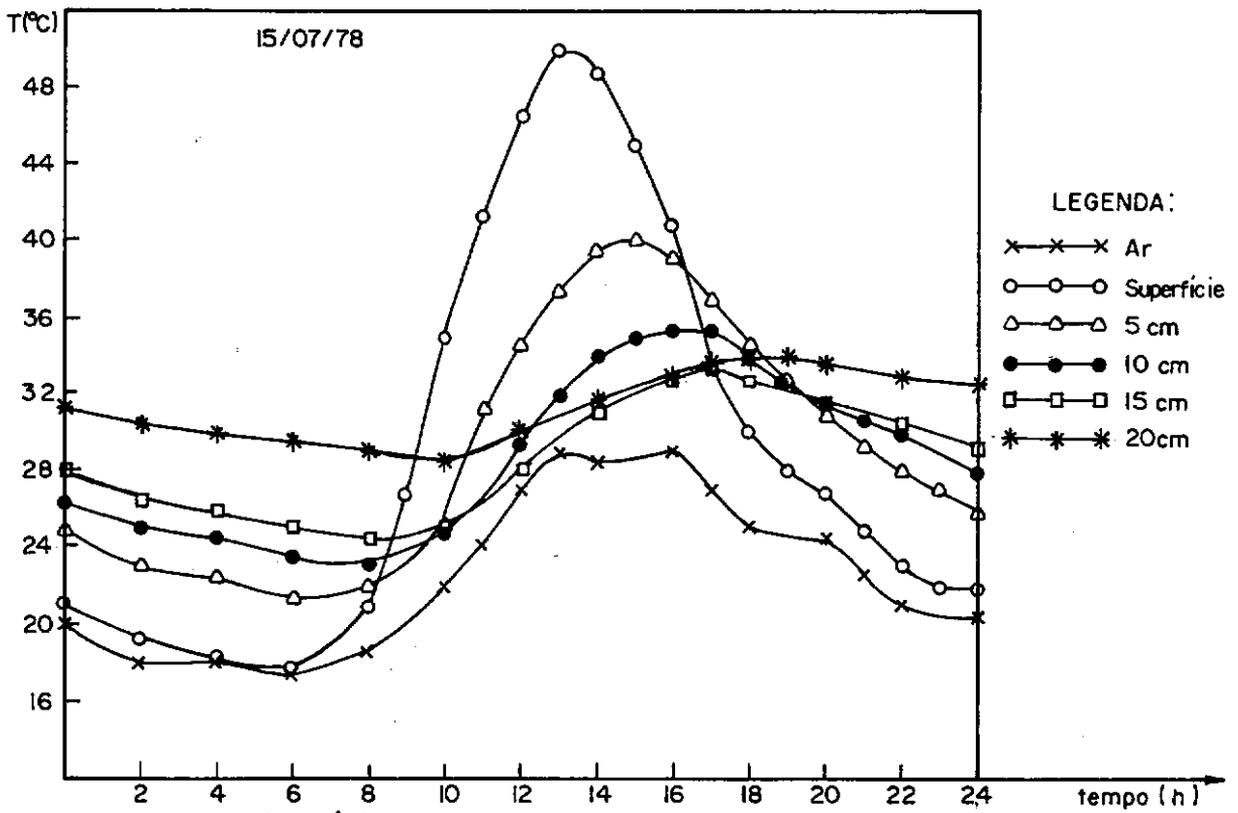


FIG. 22 — Um dia típico de sol — inverno

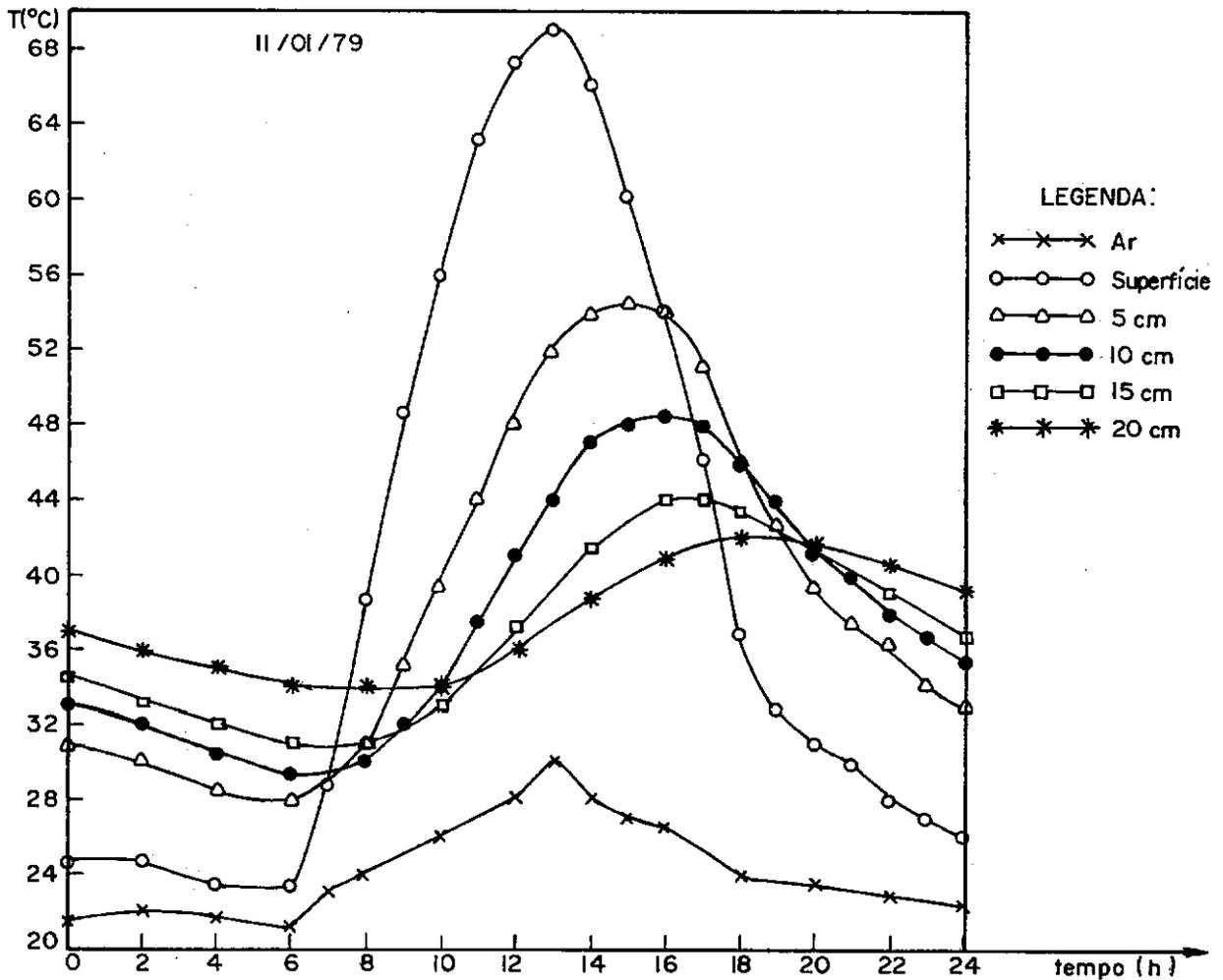


FIG. 23 — Um dia típico de sol — verão

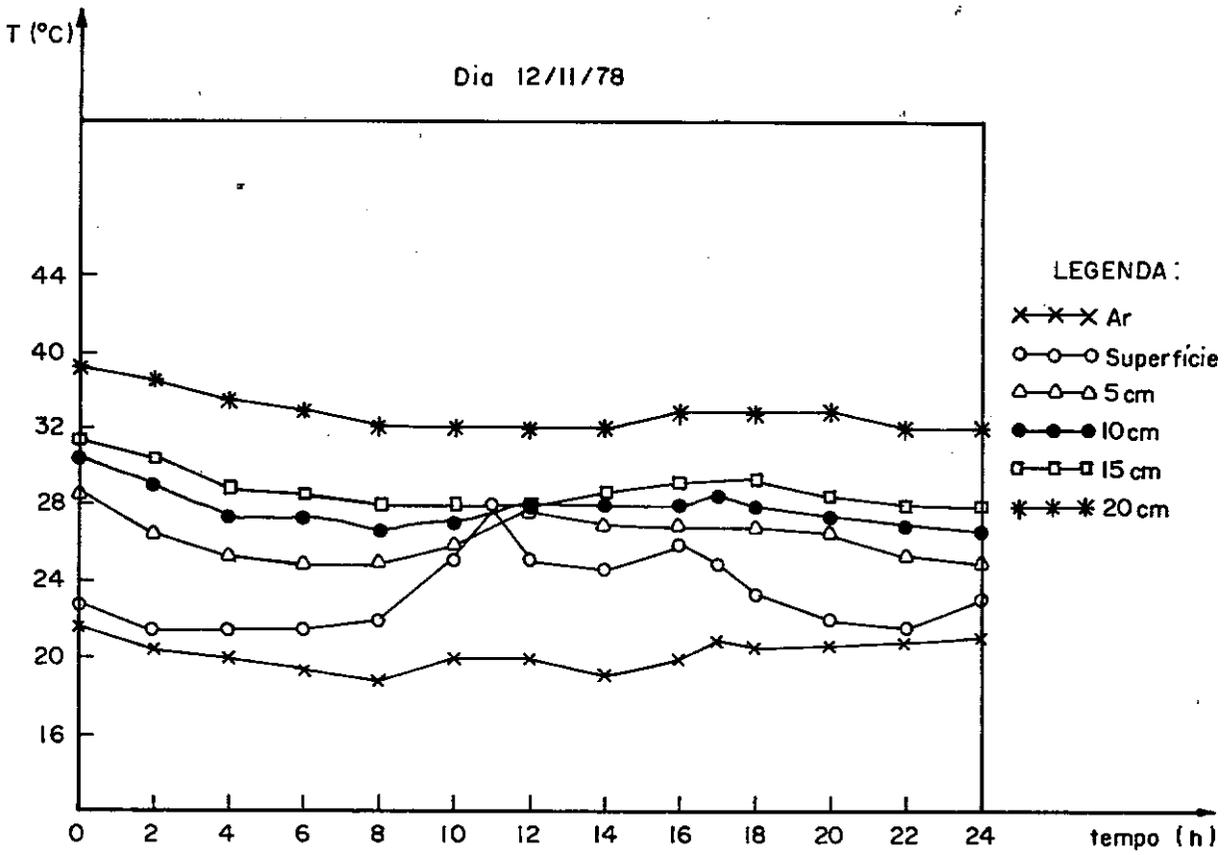


FIG. 24 - Um dia típico de chuva

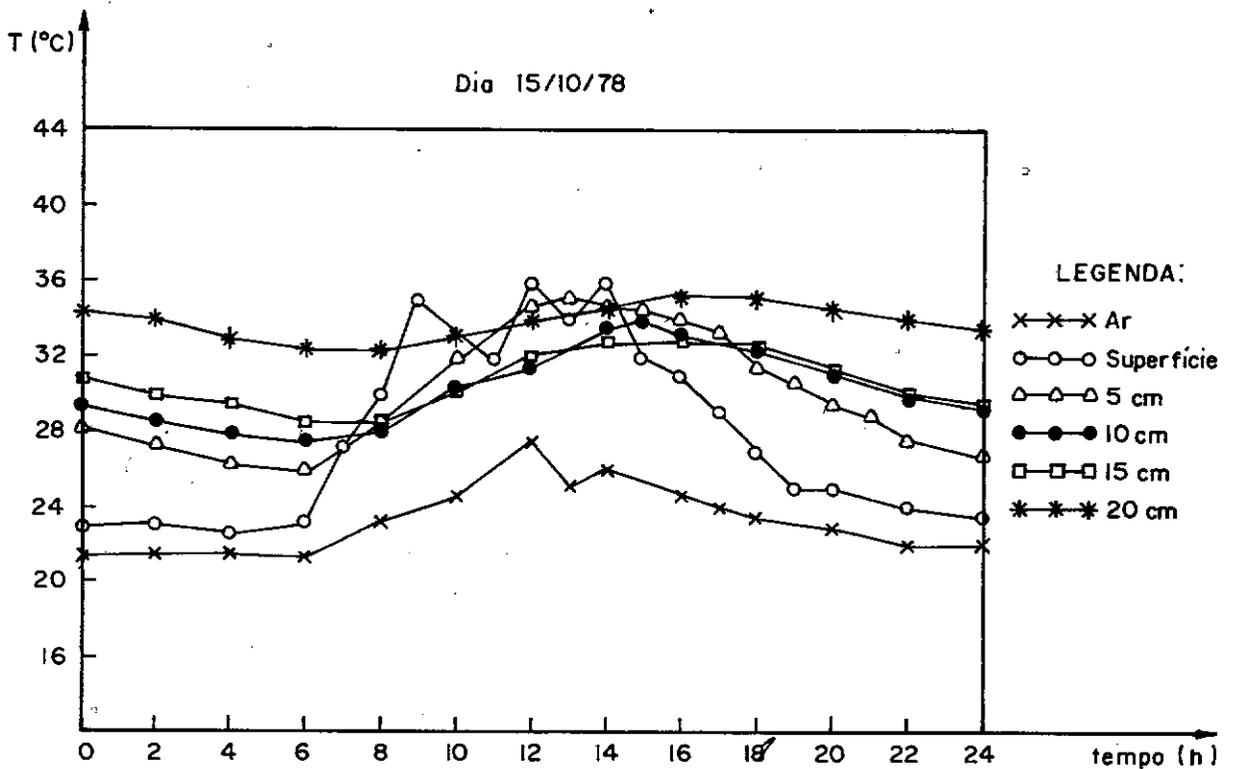


FIG. 25 - Um dia típico de sol/chuva

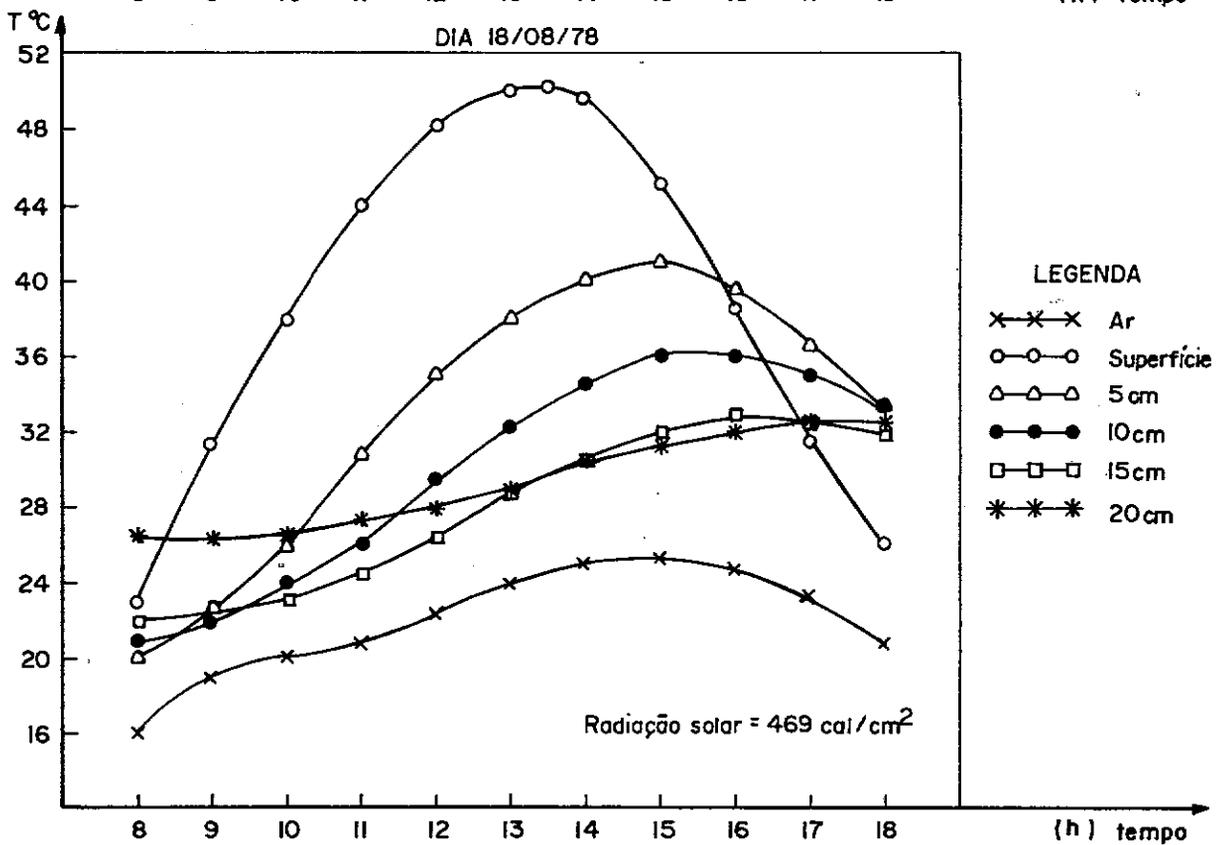
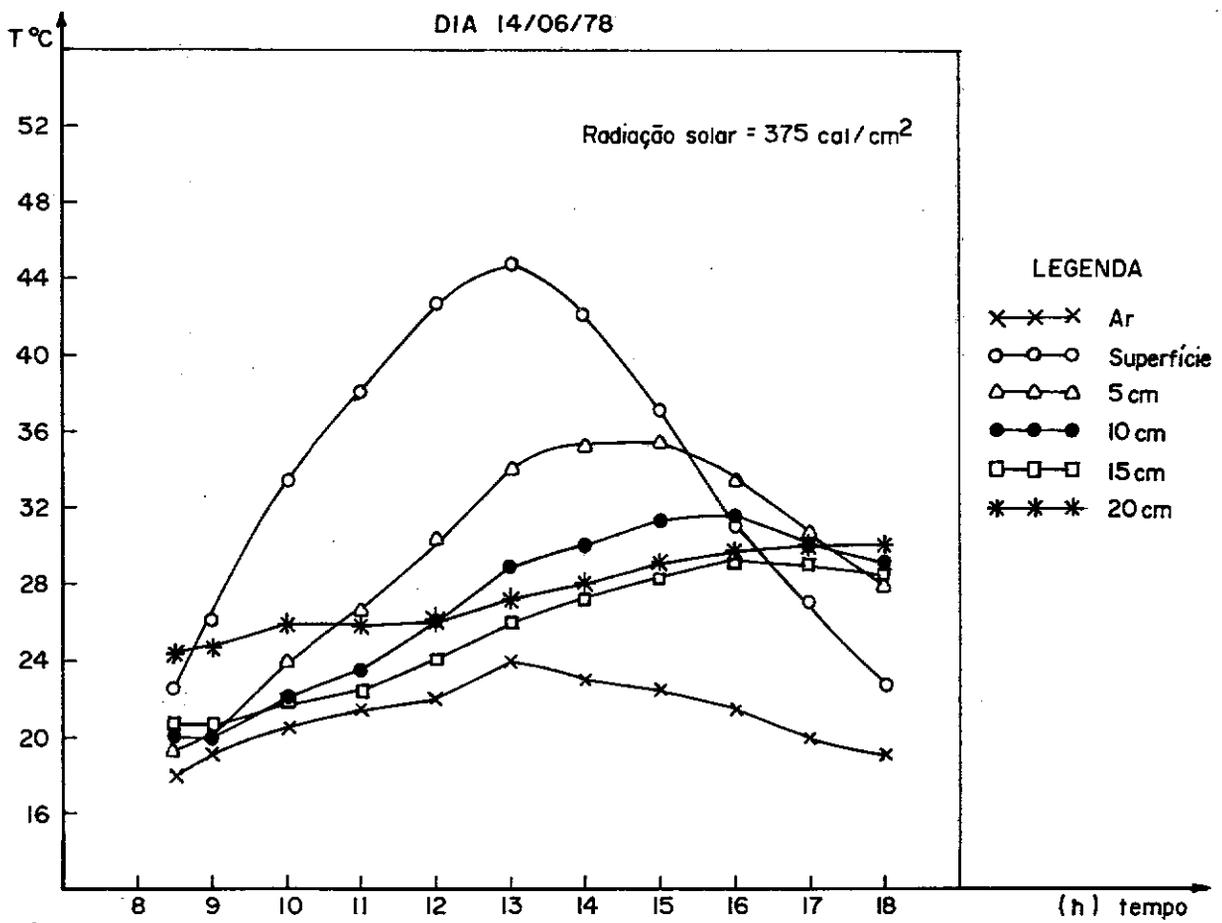


FIG. 26 — Comparação entre níveis de temperatura atingidos em dias de radiação solar diferente.

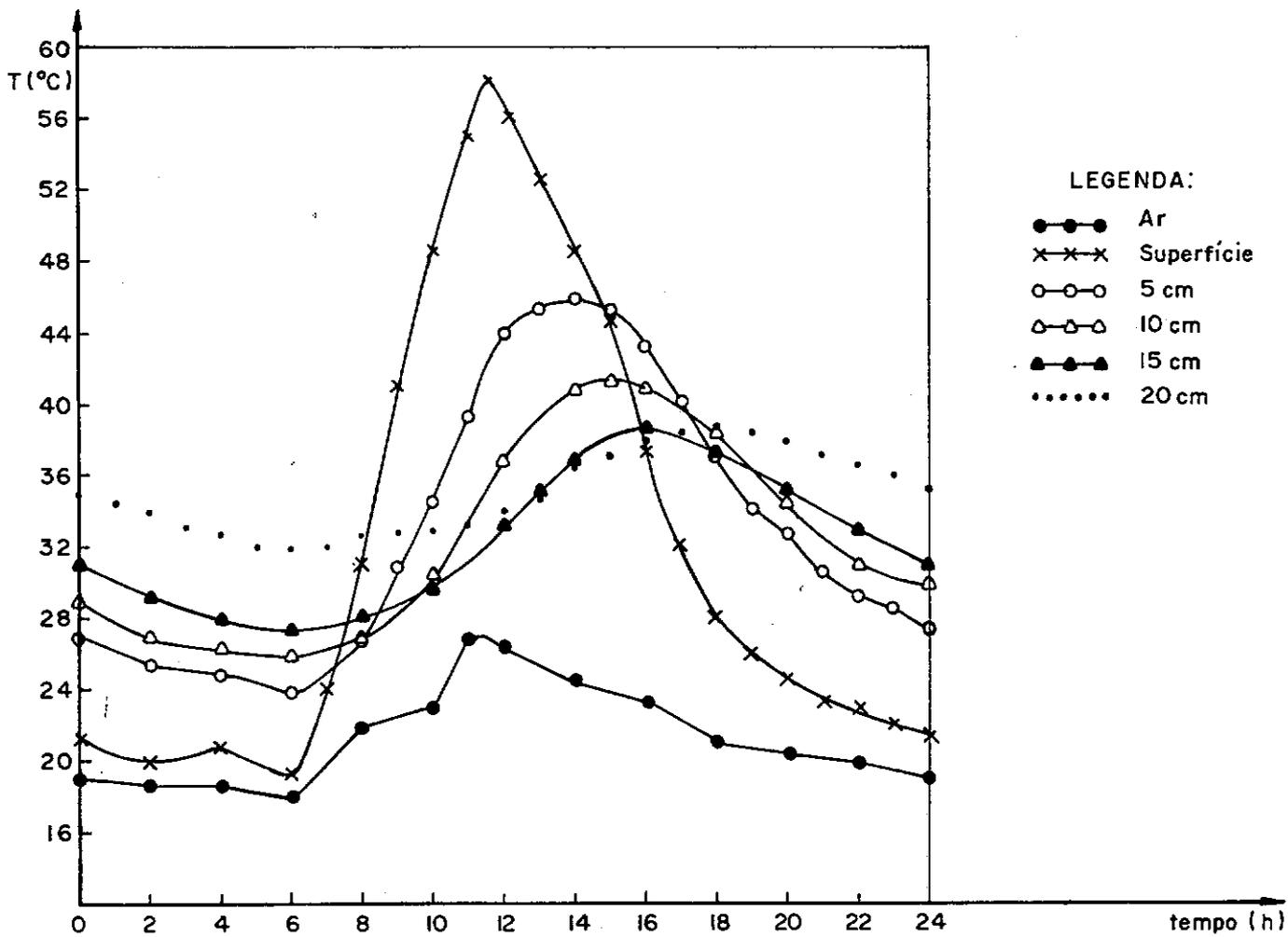


FIG.27 <sup>A</sup> Temperatura versus tempo, diversas profundidades. (Dia típico de sol — 24/09/78)

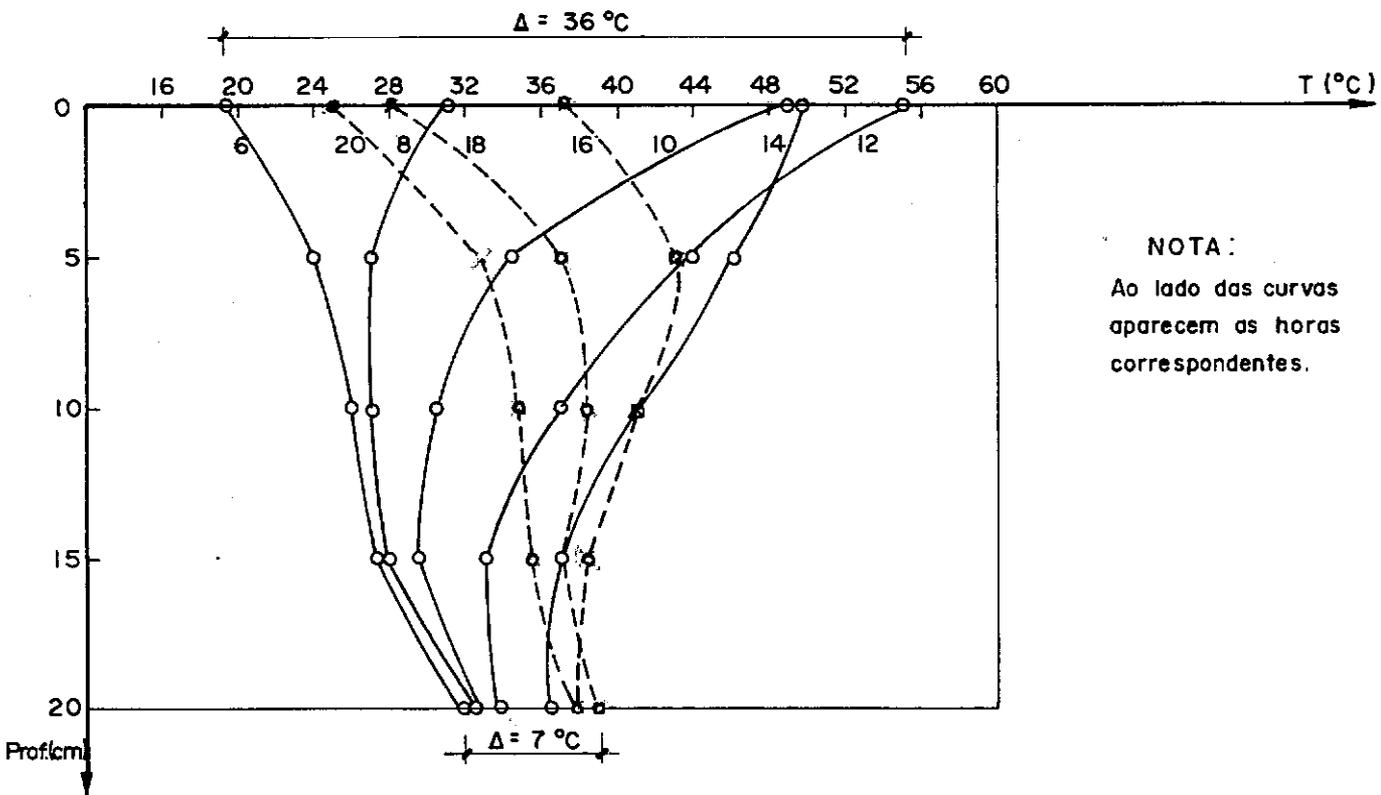


FIG.27 <sup>B</sup> Temperatura x profundidade, a cada 2 horas. (Dia 24/09/78)

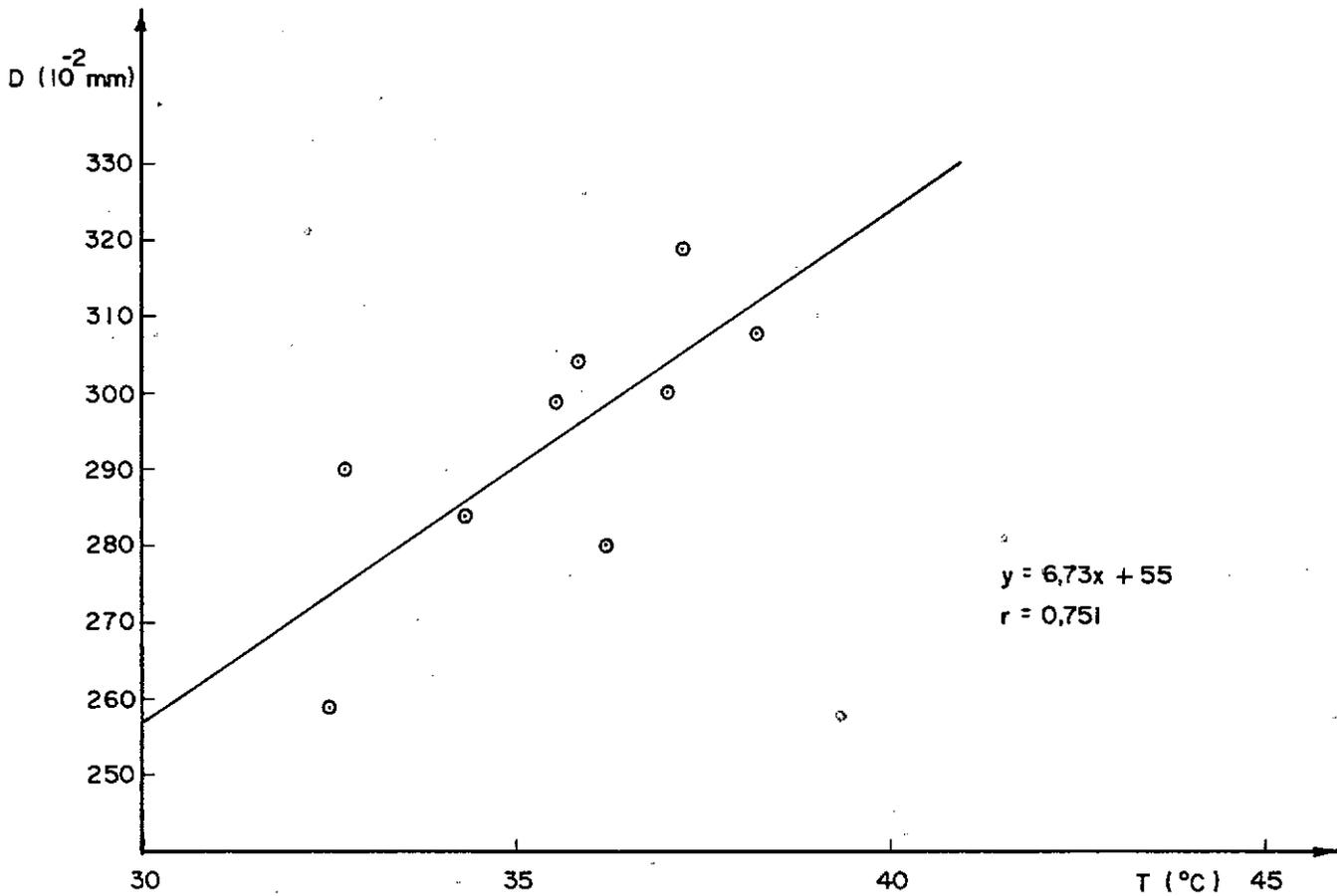


FIG.28 — Deflexões versus temperatura média — Painel experimental. (23/06/78)

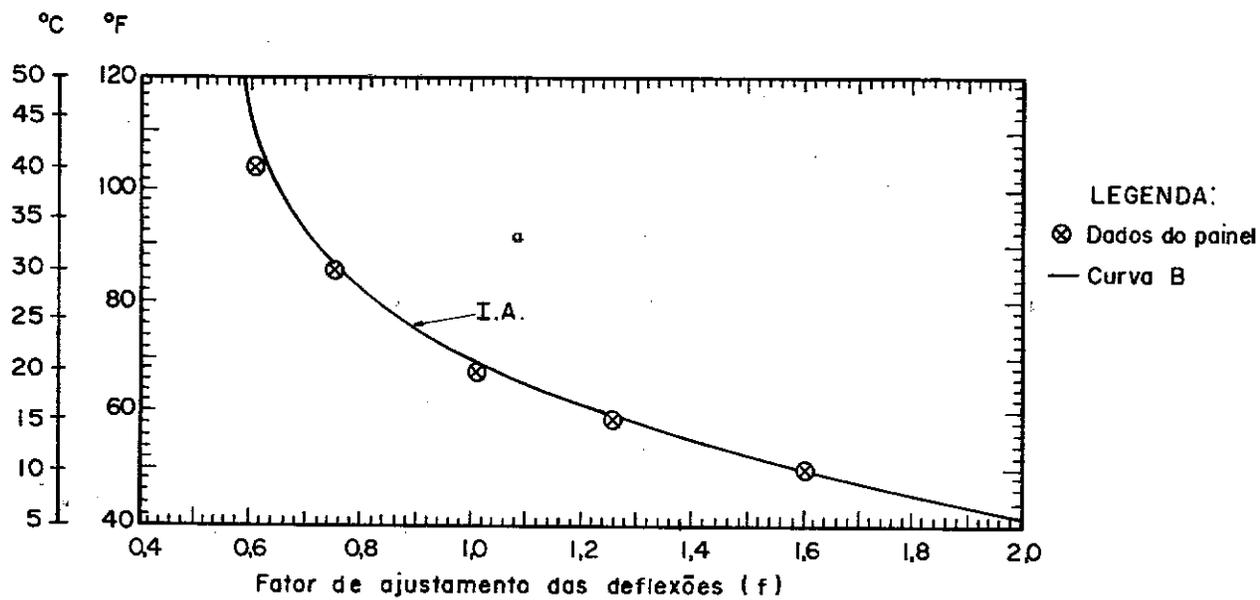


FIG.29 — Fator de ajustamento das deflexões versus temperatura média.

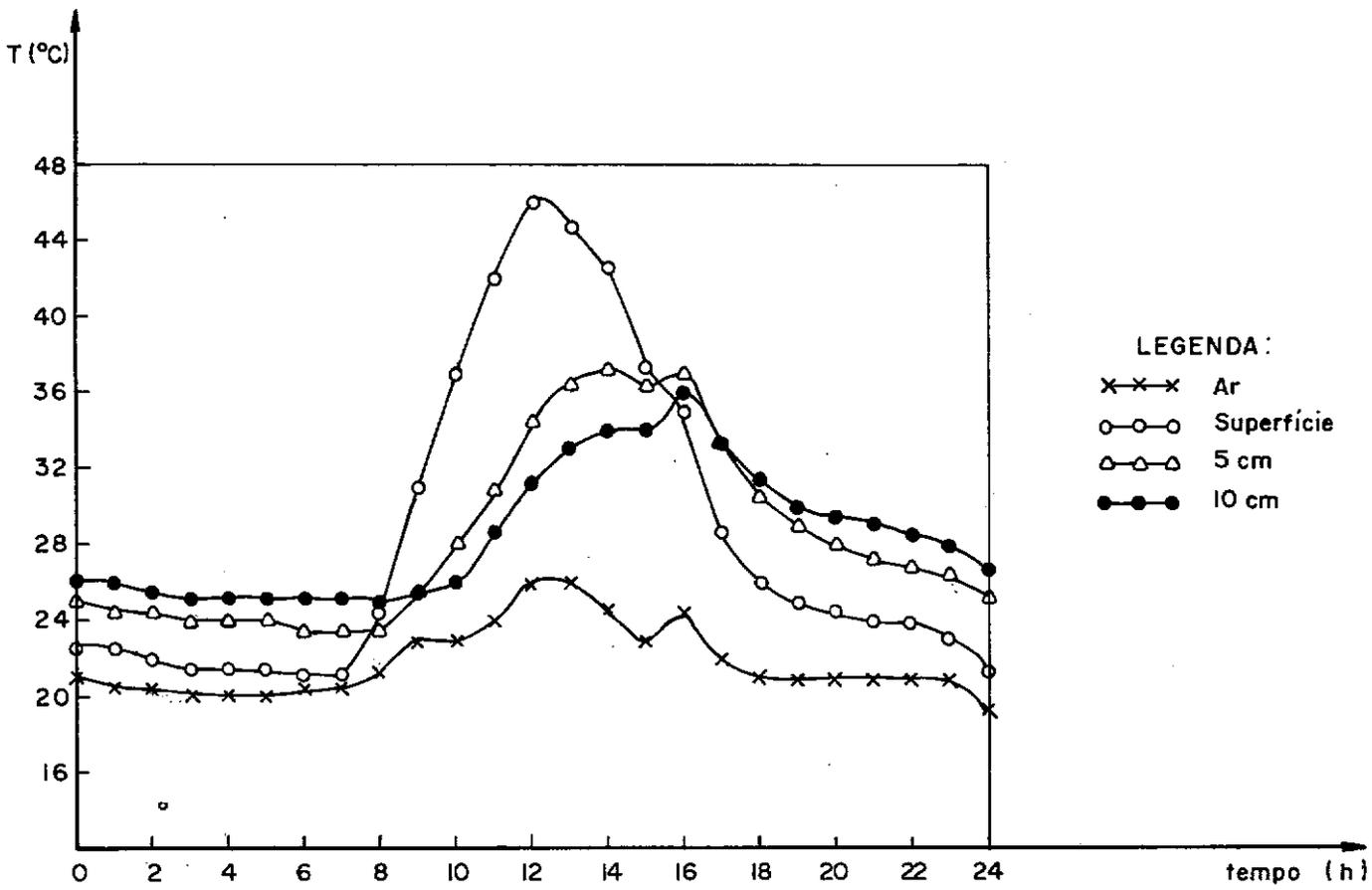


FIG.30 <sup>A</sup> Temperatura versus tempo. (Dia 23/06/78)

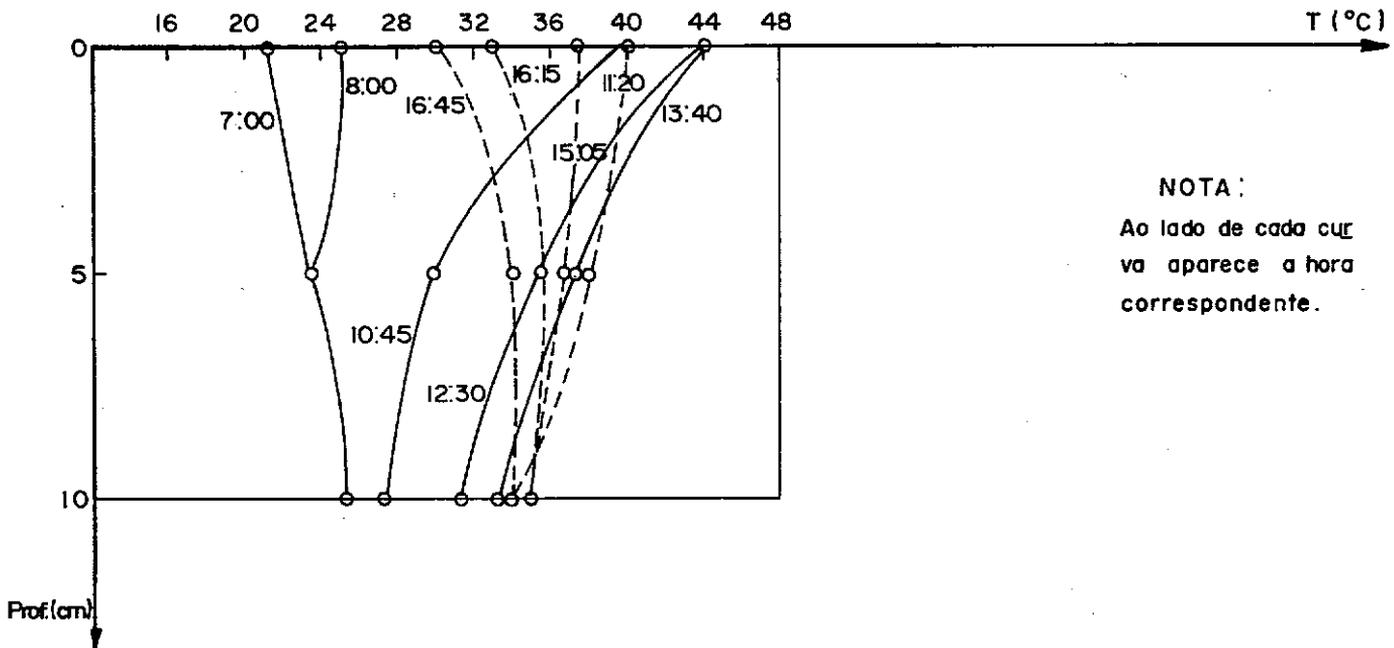


FIG.30 <sup>B</sup> Perfis de temperatura. (Dia 23/06/78)

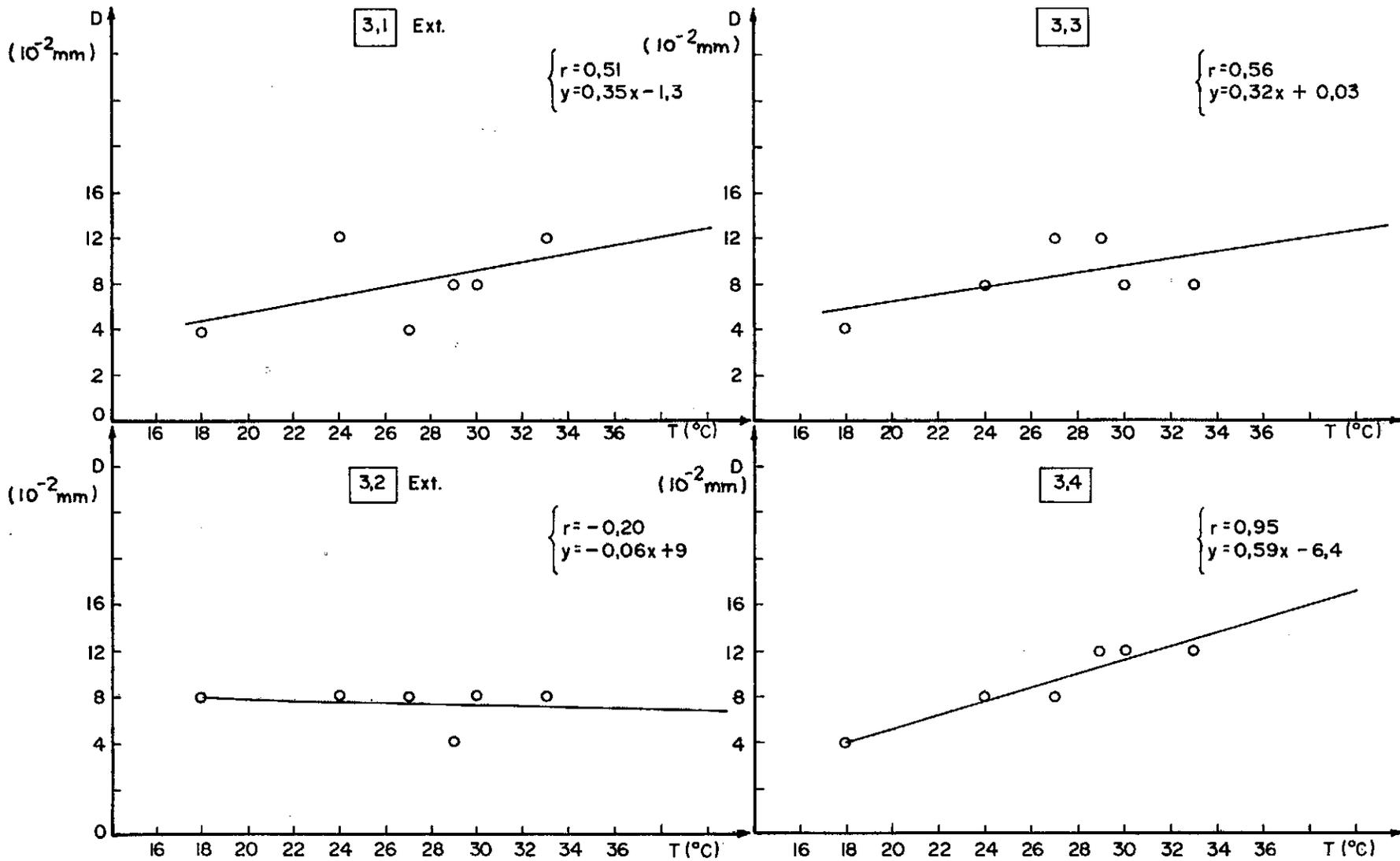


FIG. 31 — Deflexões versus temperatura — Pista experimental Santa Catarina — Seção 3

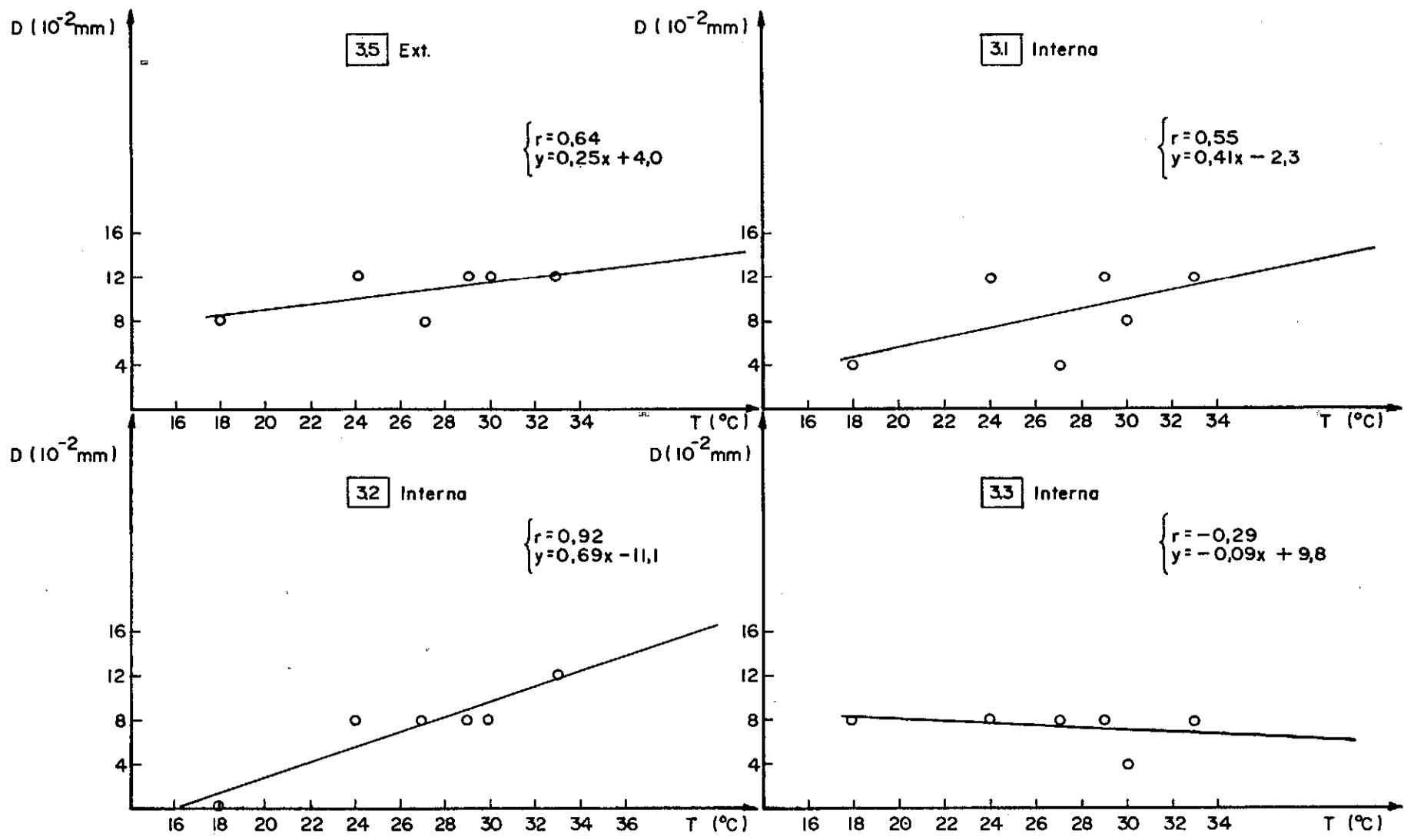


FIG. 32 — Deflexões versus temperatura — Pista experimental Santa Catarina — Seção 3

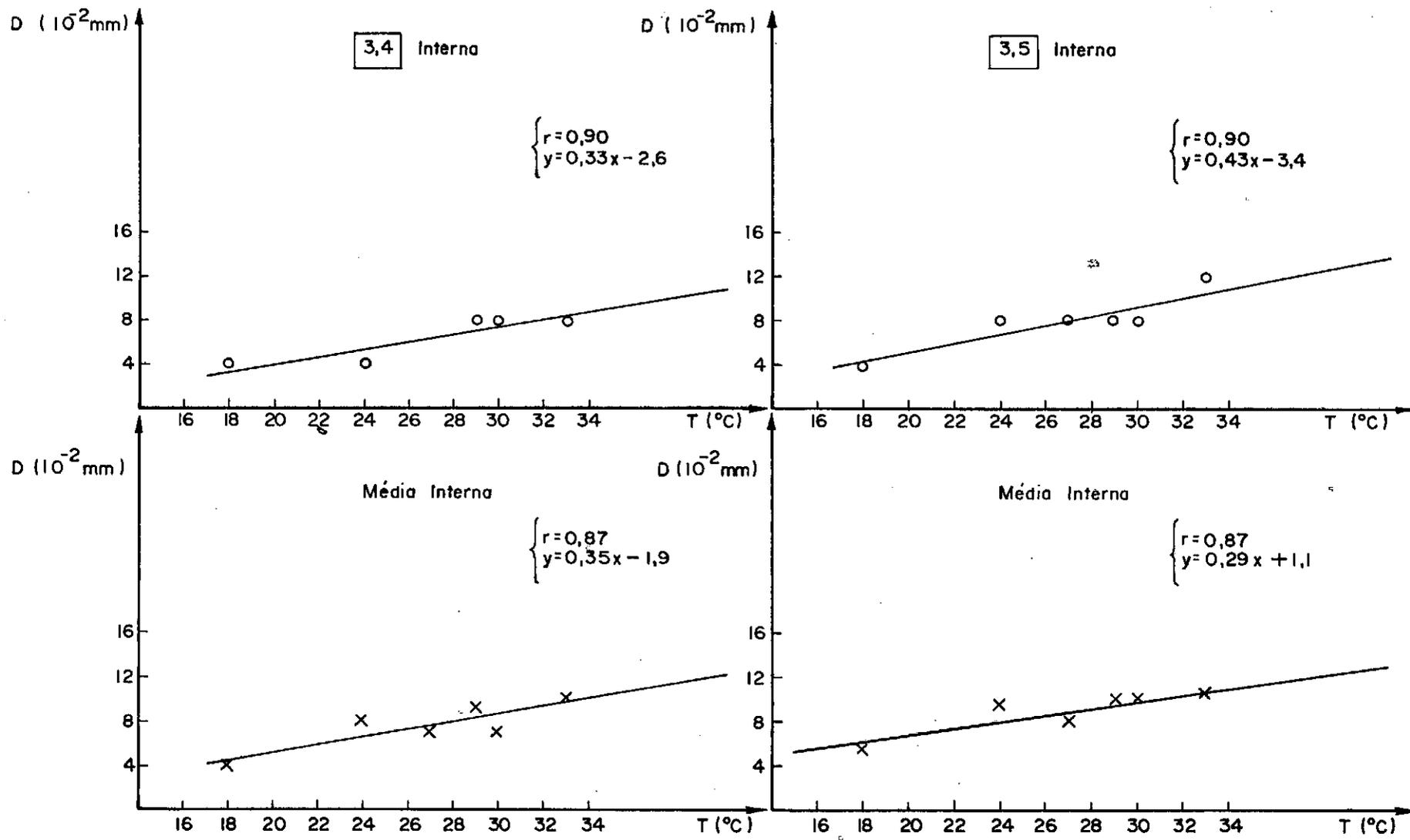


FIG. 33 — Deflexões versus temperatura — Pista experimental Santa Catarina — Seção 3

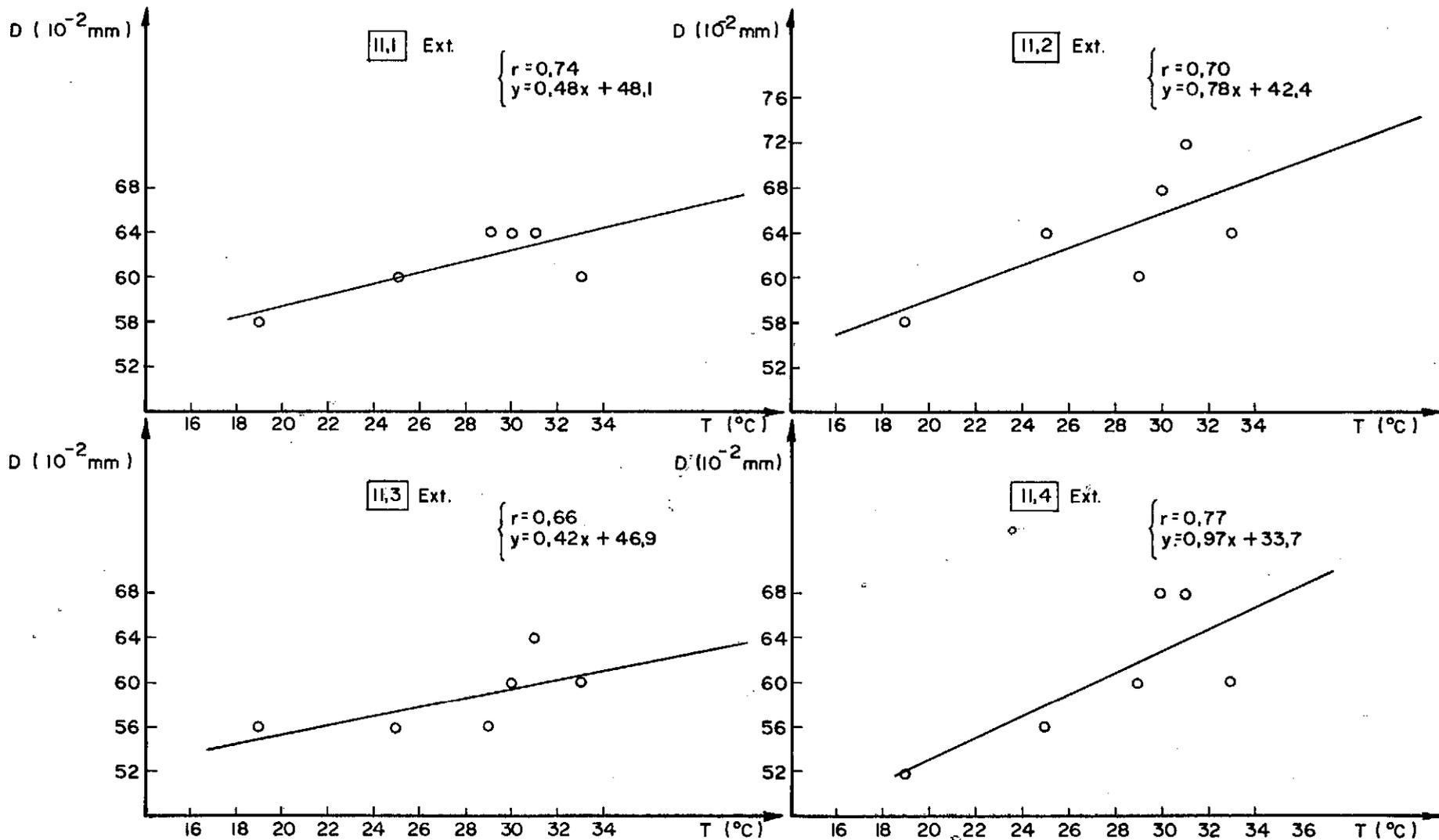


FIG. 34 — Deflexões versus temperatura — Pista experimental Santa Catarina — Seção II

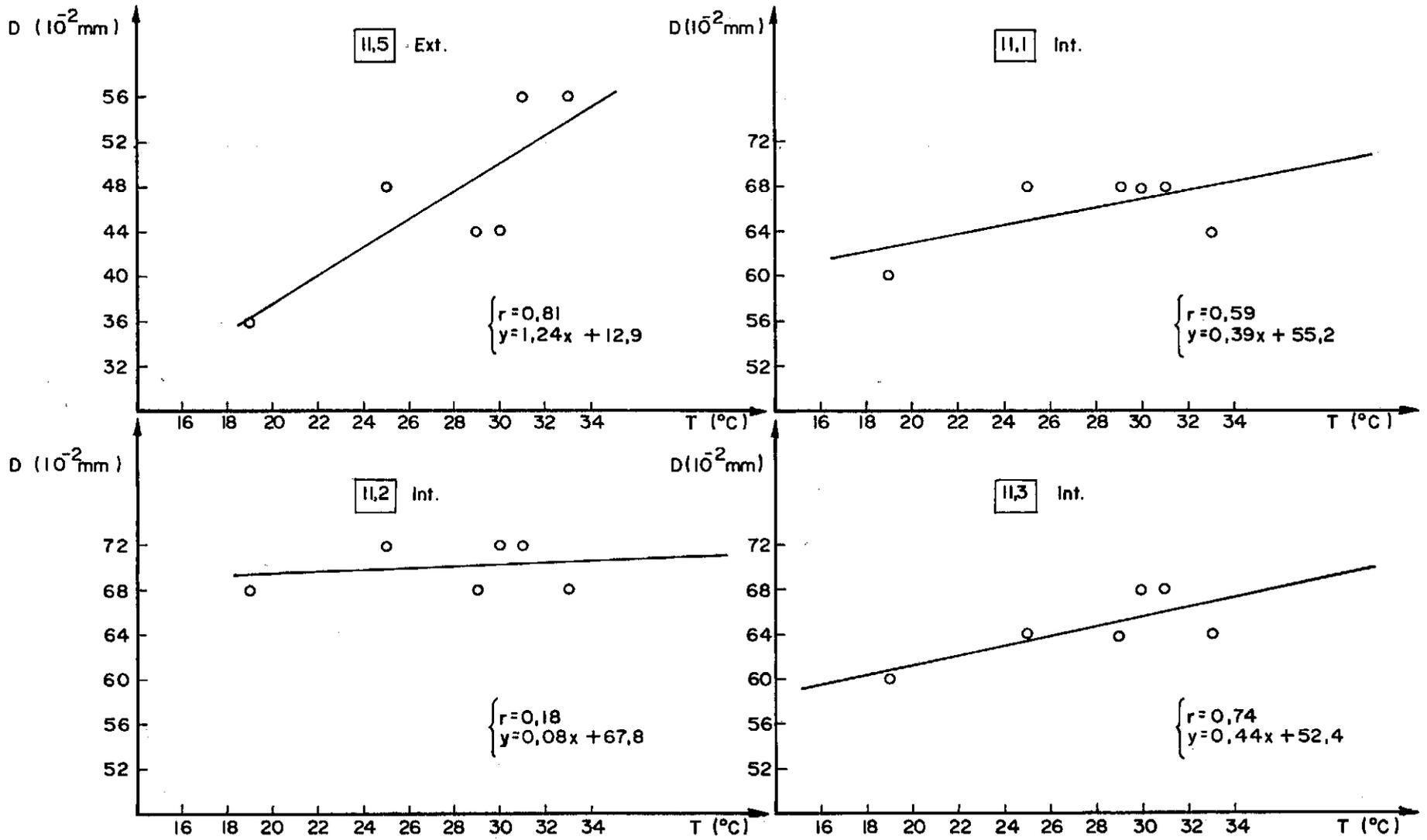


FIG. 35 — Deflexões versus temperatura — Pista experimental Santa Catarina — Seção II

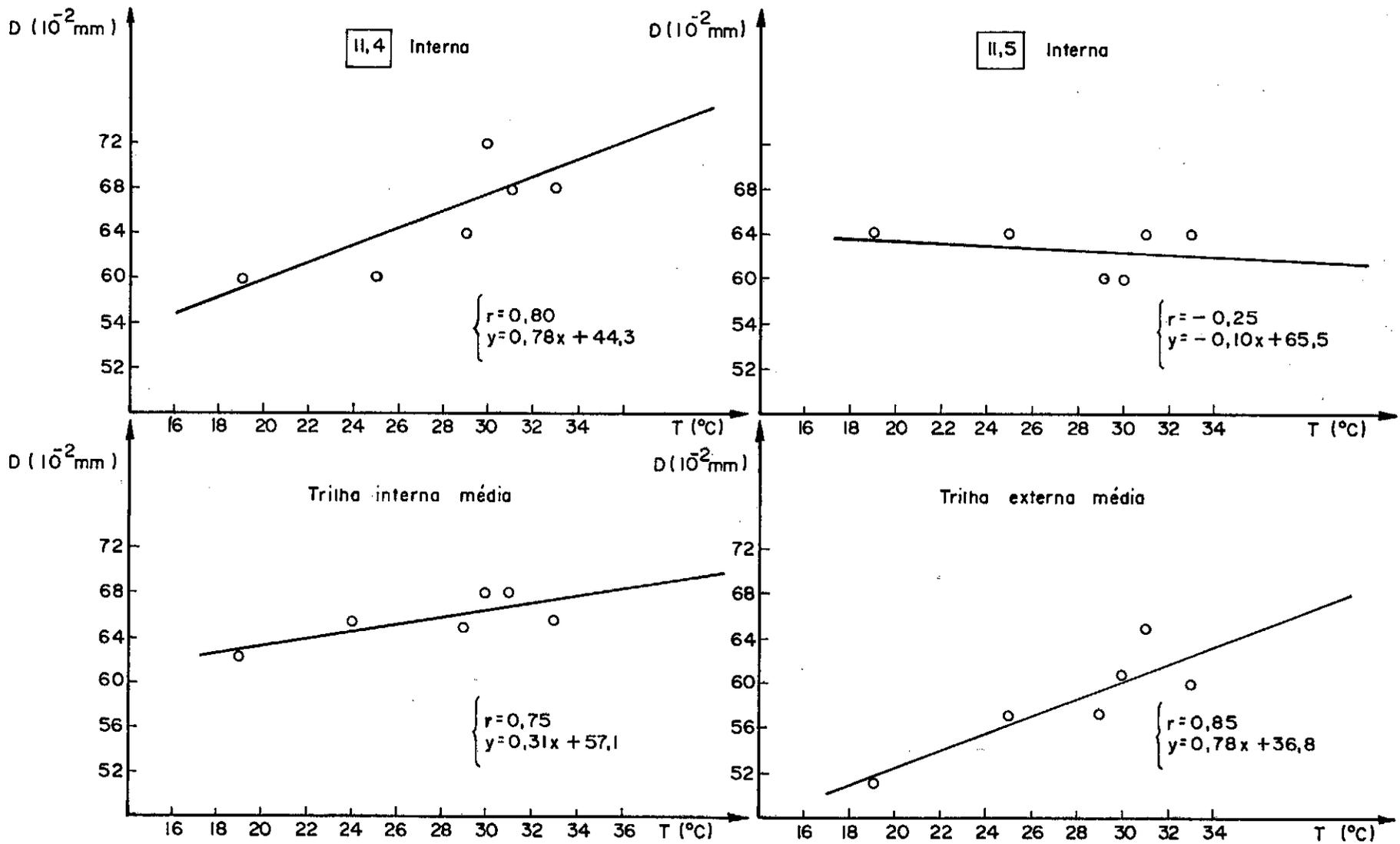


FIG. 36 — Deflexões versus temperatura — Pista experimental Santa Catarina — Seção II

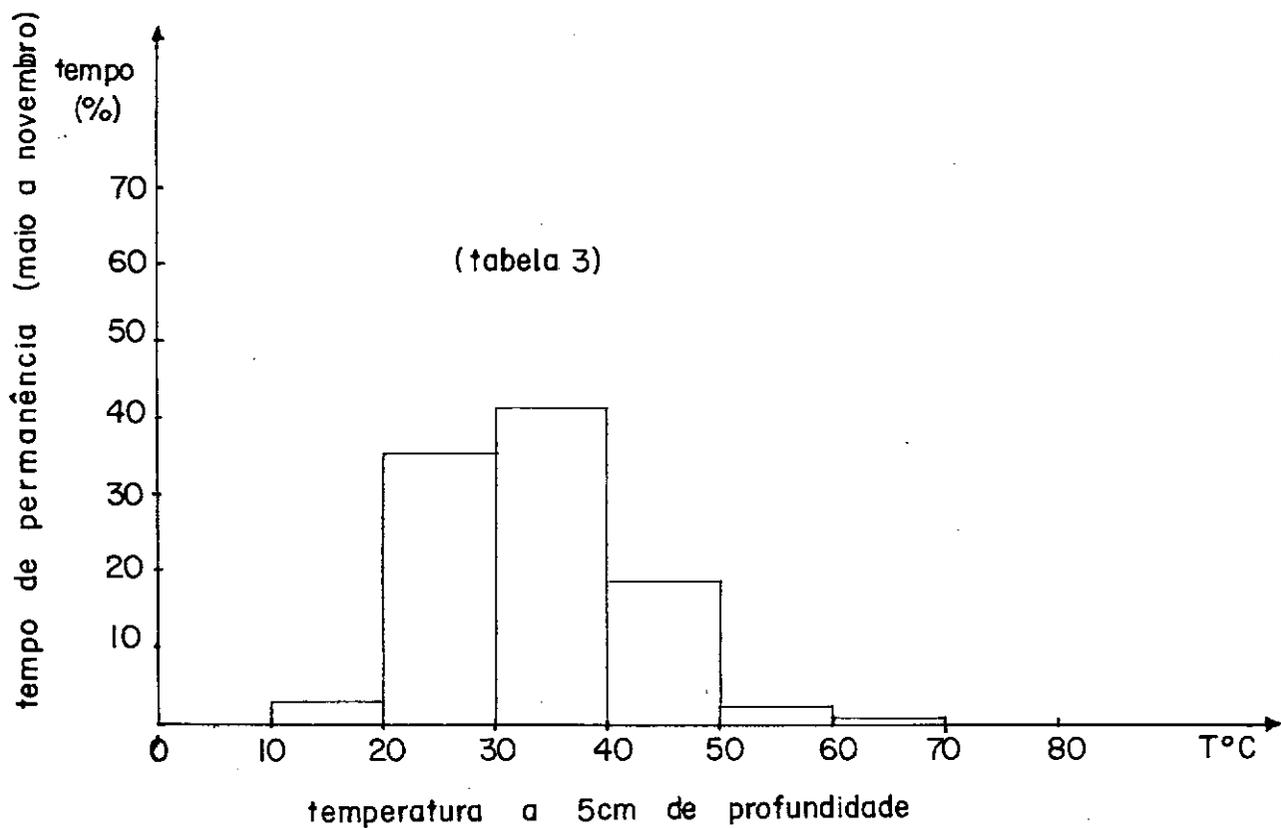
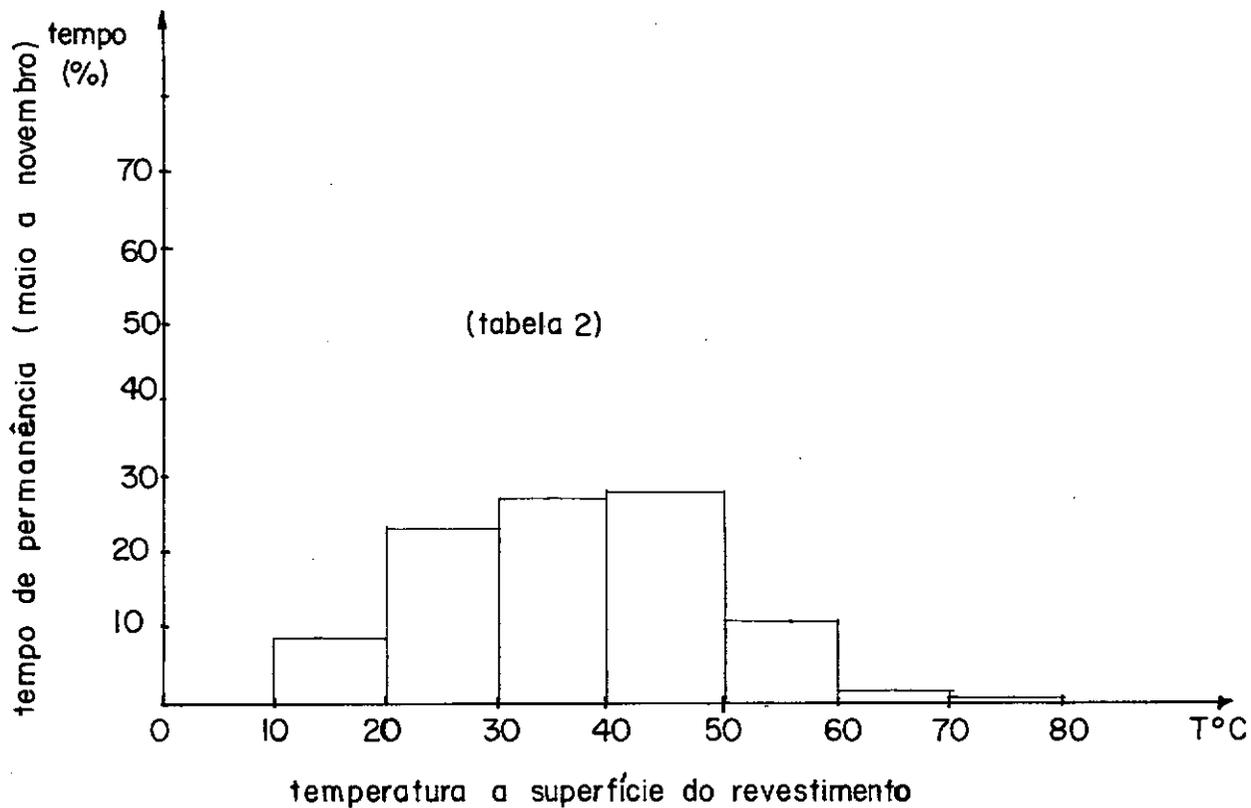
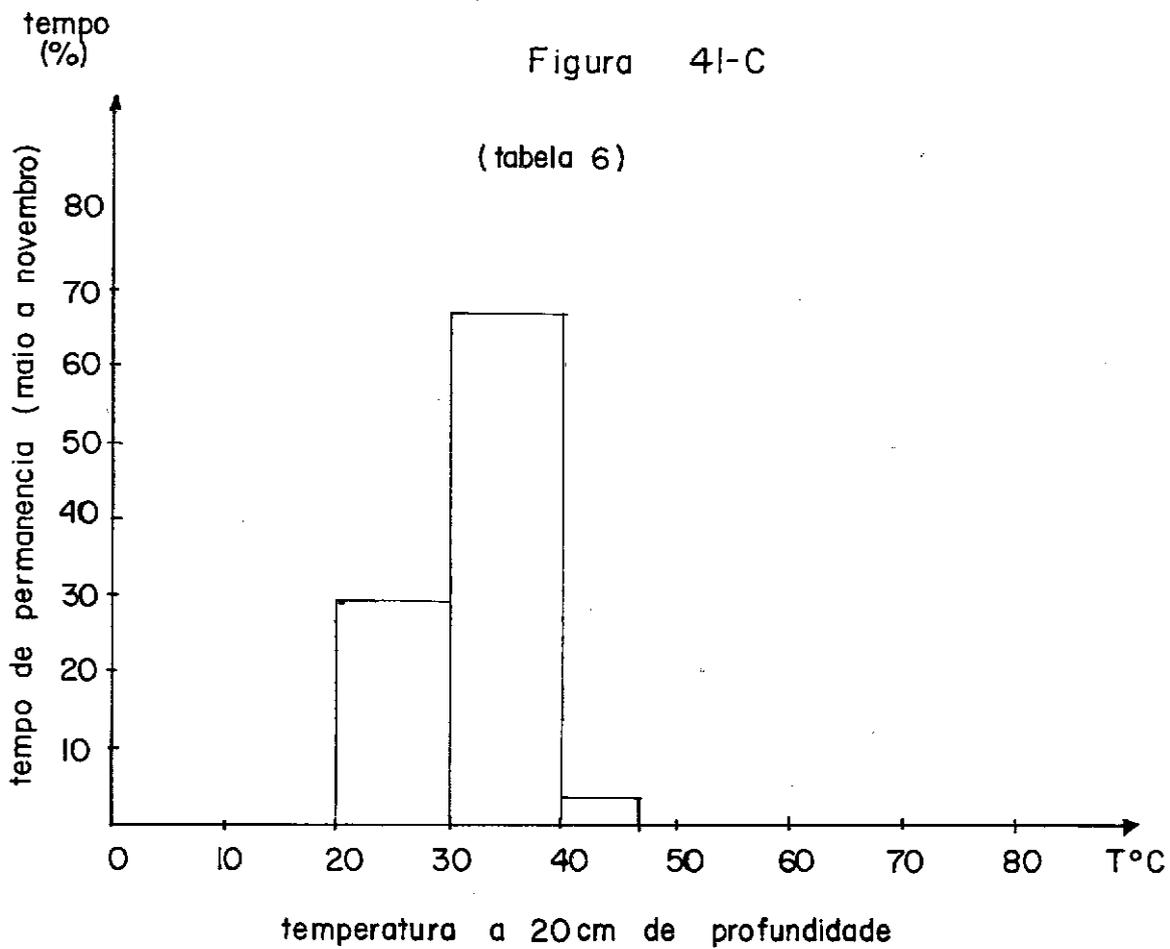


Figura 41(a)

Figura 4I-C

(tabela 6)



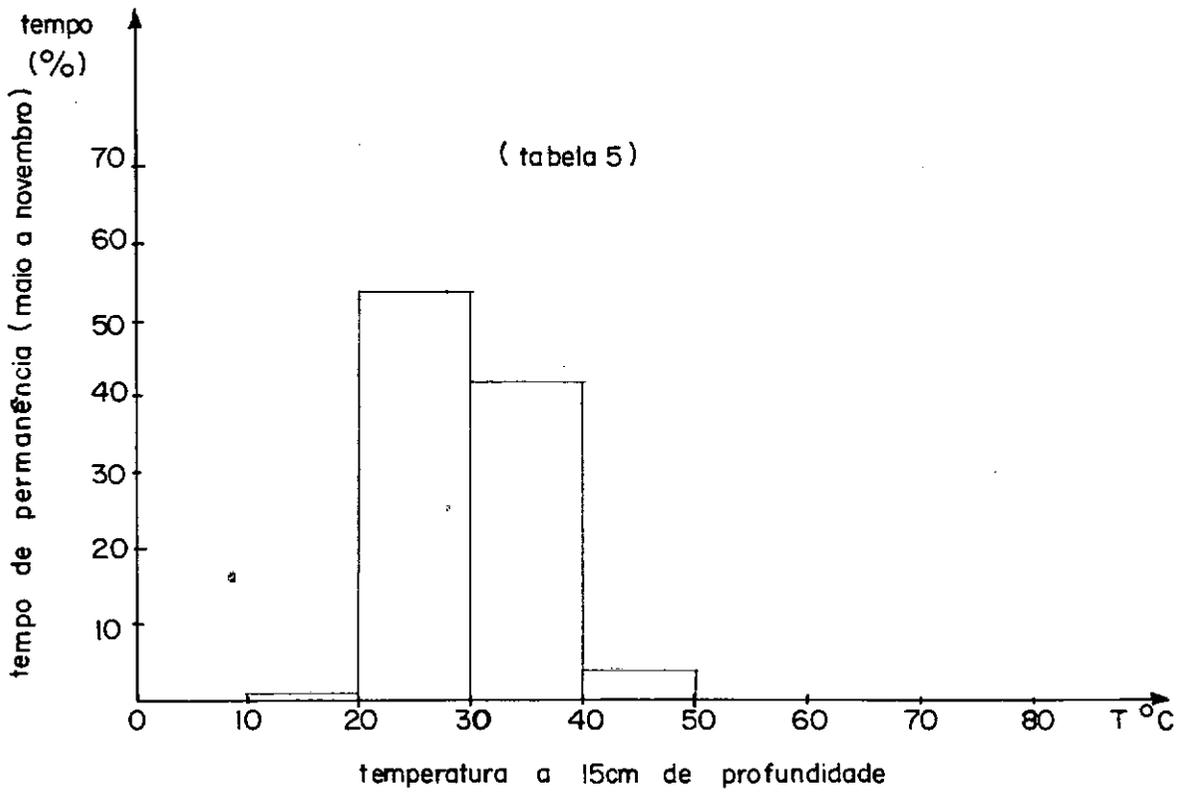
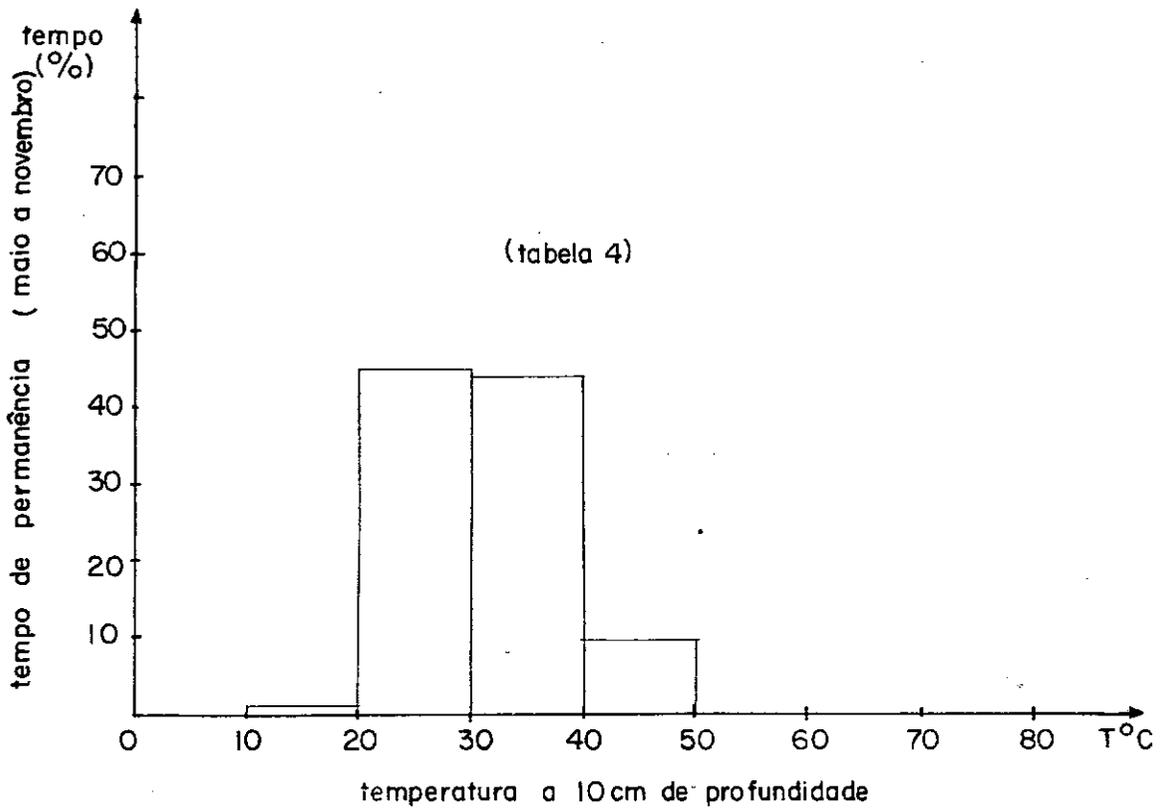


Figura 41(b)

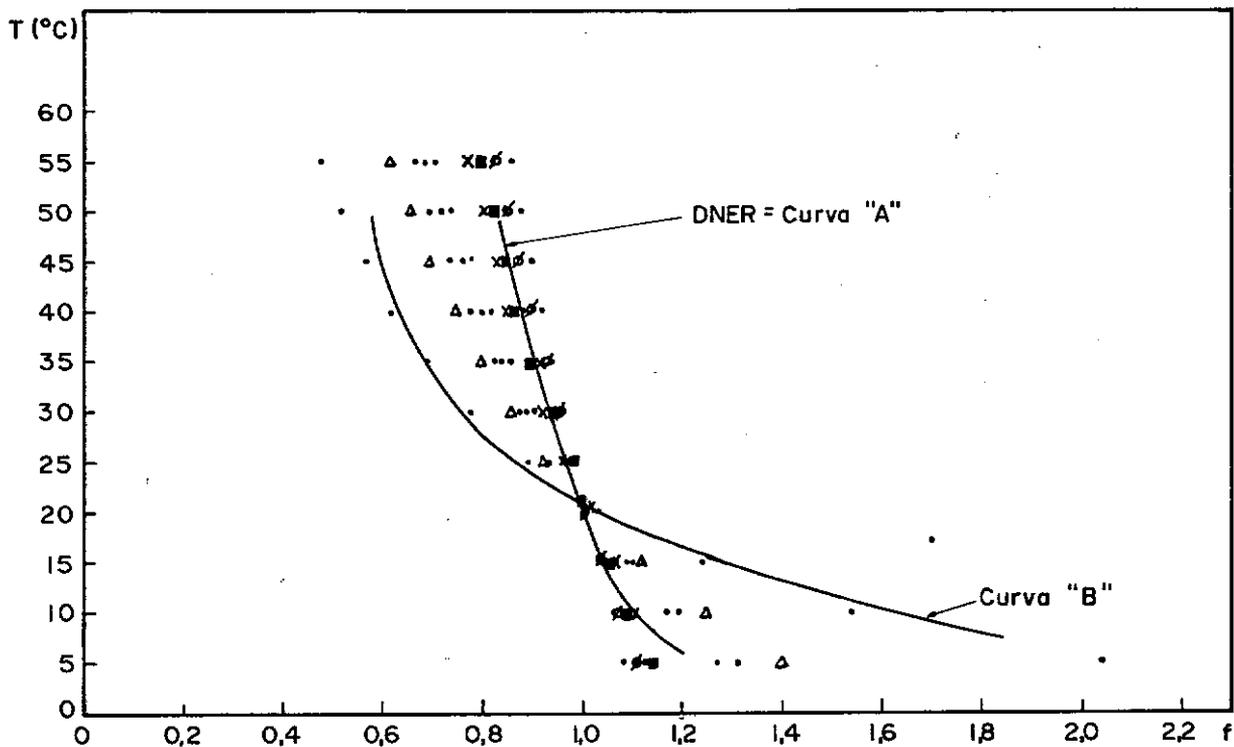


FIG. 38 — Fator de ajustamento das deflexões com a temperatura — Seção II — Pista Experimental

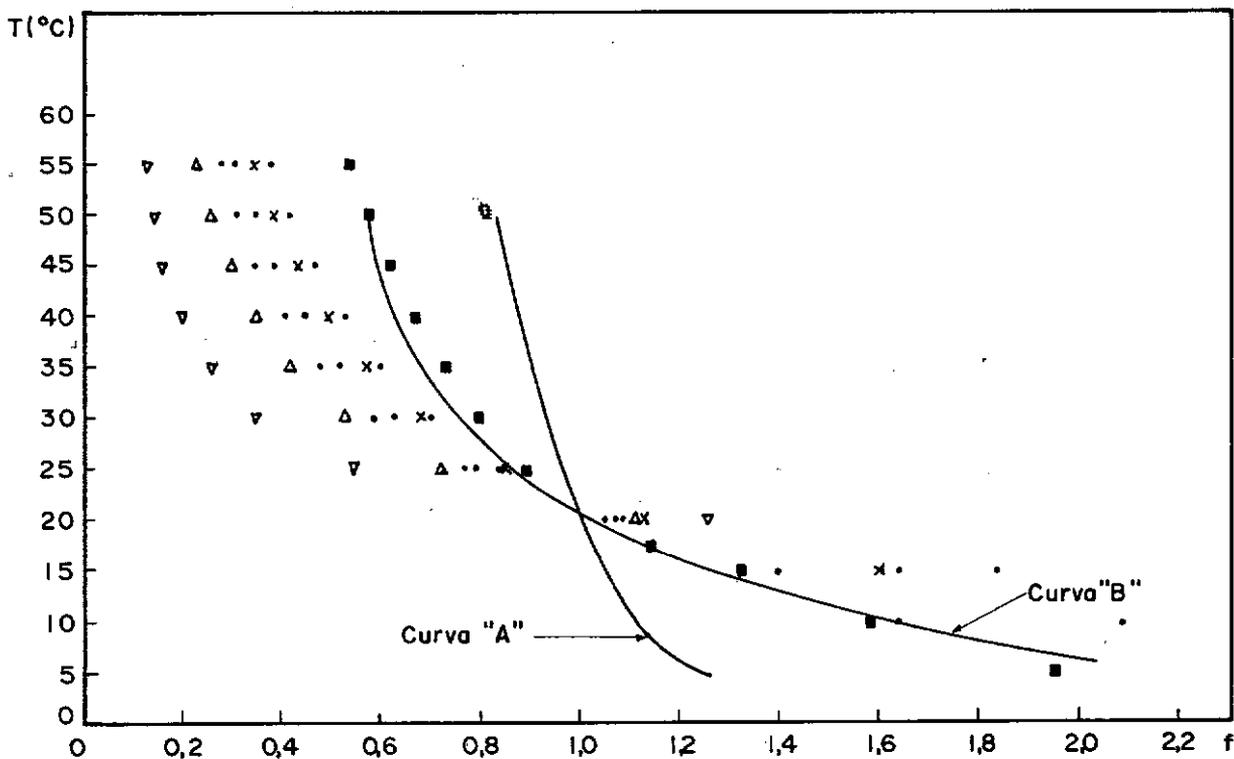


FIG. 37 — Fator de ajustamento das deflexões com a temperatura — Seção 3 — Pista Experimental

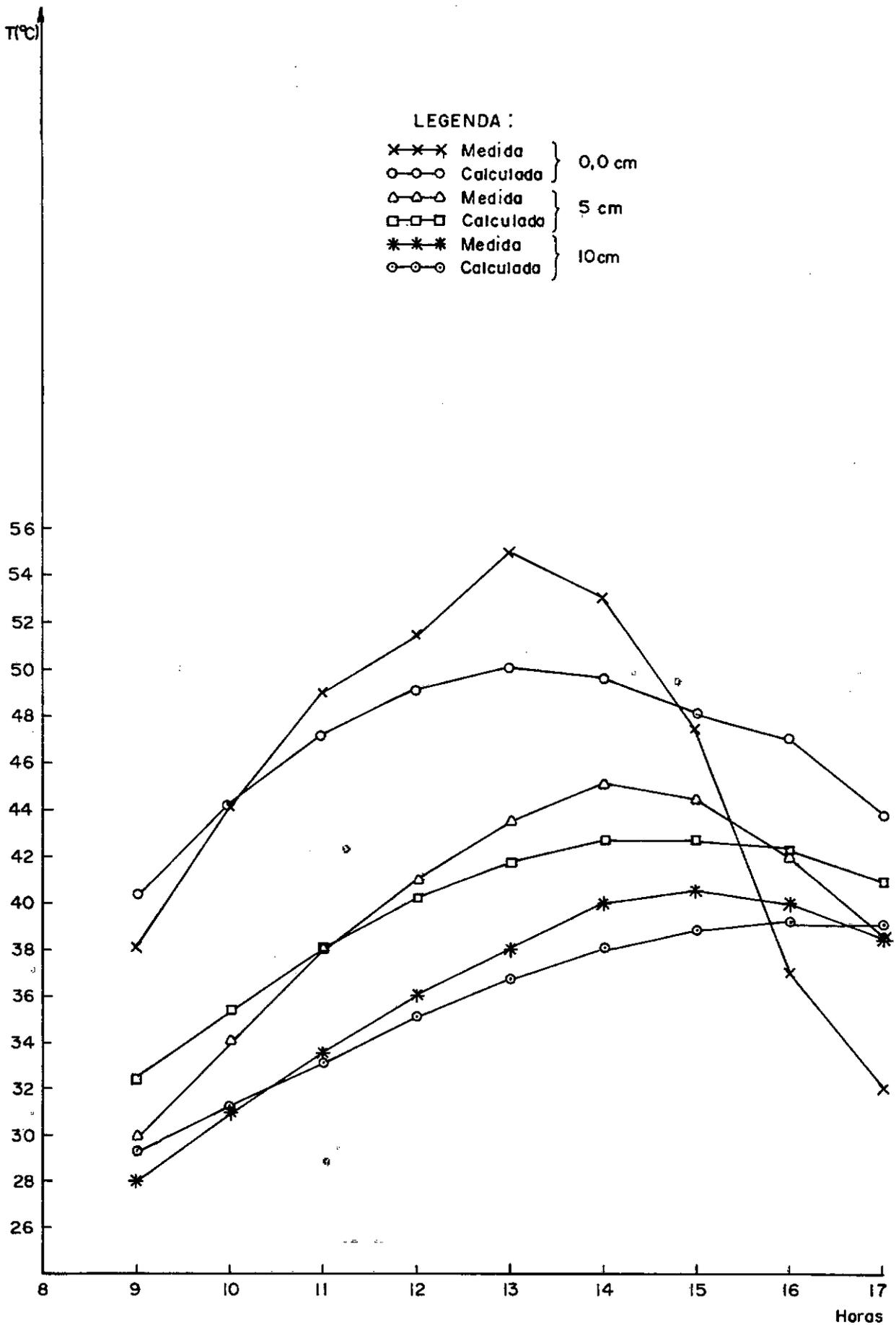


FIG. 39 — Dia 15/05/78 — Simulação por Barber .

LEGENDA

- Sup.
- ×—×—× 5 cm
- 10 cm
- △—△—△ 15 cm
- 20 cm

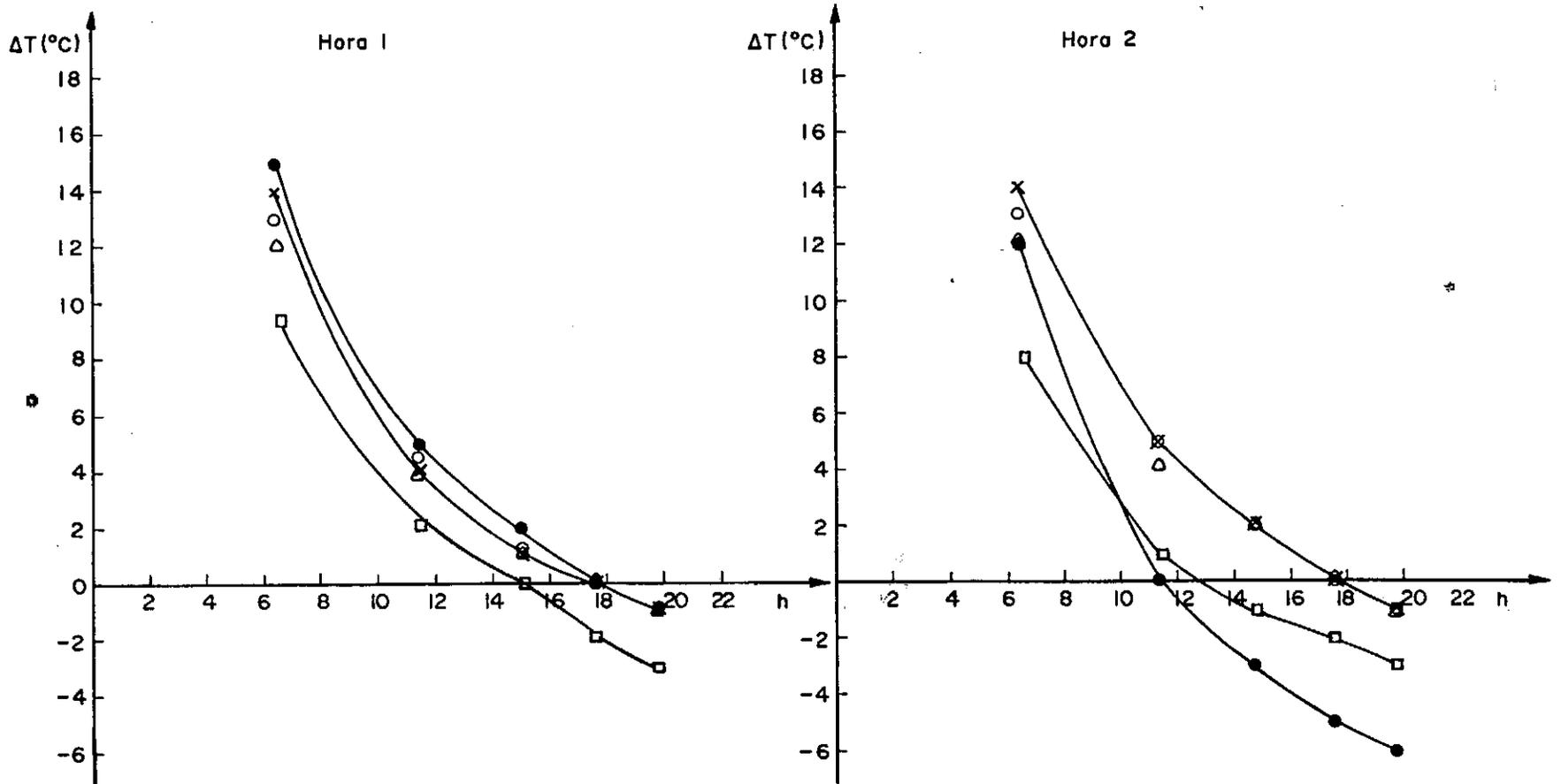


FIG. 40 — Variação da temperatura calculada pela fórmula de Barber com o valor de  $h$