

RAMONE TRAMONTINI

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Matemática – Área de concentração da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientador: Wang Chong

Co – Orientador: Luciano Pivoto Specht

Ijuí - RS

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIJUÍ - UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO
RIO GRANDE DO SUL**

**DeFEM – DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA
DeTEC – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**“MODELAGEM MATEMÁTICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS”**

Elaborada por

RAMONE TRAMONTINI

Como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Wang Chong – DeFEM (Orientador)

Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht - DeTec (Co-orientador)

Prof^ª. Dra. Ivanilda Basso Aseka - UFSM

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges

Ijuí, RS, 20 de março de 2007.

DEDICATÓRIA

Á minha mãe pelas dificuldades que enfrentara ao longo desses anos de extrema dedicação à nossa família, pelo incentivo e bom exemplo de pessoa. Você é muito especial!

AGRADECIMENTOS

À Deus por estar aqui e ter enviado no meu caminho as pessoas certas na hora certa que me ajudaram e incentivaram para que este objetivo se concretizasse.

À minha família, em especial a minha mãe e minhas irmãs.

Aos professores Dr. Wang Chong e Dr. Luciano Pivoto Specht uma enorme gratidão, pelo empenho, dedicação e amizade. Vocês são exemplos de bons professores sempre dispostos a ajudar, compreender e incentivar.

Ao Prof. Luiz Carlos Martinelli Júnior que disponibilizou os dados de temperatura para que este trabalho fosse realizado.

À UNIJUÍ pela bolsa de estudos filantrópica.

Aos colegas do curso em especial às boas amizades, a vocês sinceros votos de sucesso e felicidade.

E a todas as demais pessoas que de alguma forma contribuíram para que hoje eu estivesse aqui.

RESUMO

A influência dos fatores ambientais vem sendo estudada no processo de degradação de pavimentos, a fim de selecionar novos materiais, ligantes asfálticos e combinações que apresentem menores custos de construção e maior qualidade e desempenho das rodovias. Para tanto, torna-se indispensável o estudo das condições climáticas e ambientais dando ênfase à transferência de calor, já que os pavimentos rígidos e flexíveis alteram seus estados de tensões e deformações quando expostos a gradientes térmicos. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver modelos matemáticos de correlação da temperatura do ar e insolação, com a temperatura de pavimentos rígidos e flexíveis a diferentes profundidades. A solução semi-analítica da Equação Diferencial Parcial é através da transformação de Laplace, considerando o pavimento uma estrutura unidimensional, composta de duas camadas distintas, com coeficientes térmicos diferentes. A inversa da transformação de Laplace do problema é numérica. As simulações computacionais apresentam bons resultados. A máxima temperatura do pavimento flexível é 63,1°C e do rígido 58,4°C, em um dia onde a máxima temperatura ambiente é 39,7°C. O resultado ainda revela que a variação da temperatura máxima é mais sensível mudança da temperatura sol - ar e do coeficiente de transferência de calor por convecção. As variações do coeficiente de calor específico e da condutividade térmica quanto à temperatura máxima do pavimento não influenciam significativamente. O modelo e programa computacional desenvolvido poderão ser facilmente incorporados à prática da engenharia e auxiliarão na tomada de decisões nos projetos de pavimentos.

Palavras-chave:

Pavimentos rígidos e flexíveis, temperatura, transferência de calor, transformação de Laplace.

ABSTRACT

The influence of environmental factors has been studied in the pavement degradation process in order to select new asphalt binder materials and combinations that present lower building costs and better quality and performance of highways. So that, the study of climatic and environmental conditions emphasizing heat transfer becomes indispensable, since rigid and flexible pavements change their tension and deformation states when they are exposed to thermal gradient. The main objective of this work is to develop mathematical models of correlation between air temperature and insolation intensity and the temperature of rigid and flexible pavement at different depths. The semi-analytical solution of the Differential Partial Equations is obtained through the Laplace transformation, considering the pavement as a one-dimensional structure, composed of two distinct layers with different thermal properties. The inverse transformation of Laplace of the problem is numerical. The results are quite satisfied. The maximum temperature of the flexible pavement hits $63,1^{\circ}\text{C}$ and the rigid one does $58,4^{\circ}\text{C}$, in a day where the environment temperature is $39,7^{\circ}\text{C}$. The result also reveals that the maximum temperature variation is more sensible to the changing of the insolation-air temperature and the convection heat transfer coefficient. The influence of the variation of both specific heat coefficient and the thermal conductivity on the maximum pavement temperature is almost same. The mathematical model and the developed computational program can be easily incorporated to the engineering practice and will help making the decision for pavement designs.

Key words:

Rigid and flexible pavement, temperature, heat transfer, Laplace transformation.

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS e ABREVIATURAS.

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*;

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ABPV – Associação Brasileira de Pavimentação;

ATR – Afundamento de trilhas de roda;

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado à Quente;

CCP – Concreto de Cimento Portland;

C_p - Calor específico;

D - Constante (Heydarian, 1981);

DAER/RS - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul;

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte;

d_n - Dia do ano no calendário Juliano;

E - Emitância hemisférica da superfície em onda longa;

EDP – Equação diferencial parcial;

G_n - Radiação normal;

G_o - Constante solar;

H – Profundidade a partir da superfície;

h_c - Coeficiente de convecção do ar;

h_1 - Profundidade limite da primeira camada;

h_2 - Profundidade limite da segunda camada;

Irrad – Irradiação solar;

I_b - Radiação direta;

I_d - Radiação difusa;

I_r - Radiação refletida;

I_t - Radiação total;

k – Condutividade térmica do material;

Lat – Latitude local;

N_d - Número de horas de sol do dia d_n ;

p - Raízes do polinômio (Heydarian, 1981);

q - Fluxo de calor por unidade de tempo e área da superfície isotérmica;

$q_p(t)$ - Fluxo de calor (definido neste trabalho);

r - Vetor posição;

R - Raízes reais;

SHRP - Superior Highway Research Program;

SUPERPAVE™ - Superior Performance Asphalt Pavements;

t - Tempo;

T - Temperatura;

$T(x)$ - Temperatura na profundidade x ;

$T_{0_1}(x)$ - Temperatura inicial na profundidade x na primeira camada;

$T_{0_2}(x)$ - Temperatura inicial na profundidade x na segunda camada;

T_{ar} - Temperatura do ar;

T_f - Temperatura de h_2 ;

$T_{máx}$ - Temperatura máxima do pavimento;

T_{sup} - Temperatura na superfície;

T_1 - Temperatura na primeira camada;

T_2 - Temperatura na segunda camada;

T_{2cm} - Temperatura à 2 cm de profundidade;

T_{5cm} - Temperatura à 5 cm de profundidade;

w - Ângulo horário;

Z - Constante (modelo matemático Superpave);

α - Difusividade térmica;

α_{sol} - Absortância da superfície para a radiação solar;

ΔT - Gradiente de temperatura;

δR - Diferença entre a radiação de onda longa incidente na superfície do céu e entorno e a radiação emitida por um corpo negro na temperatura do ar externo (ASEKA, 2003);

δ_s - Declinação solar;

ϕ - Fluxo de irradiação – energia por unidade de área e de tempo;

ϕ - Latitude local (definido neste trabalho);

ρ - Densidade do material;

σ - Constante de Stefan-Boltzman;

σ_{ar} - Desvio padrão da temperatura média mínima do ar;

τ_a - Média do coeficiente de transmissão para massa de ar unitária;

θ_{ar} - Temperatura do ar;

θ_i - Diferença da temperatura inicial e T_f ;

θ_s - Diferença entre a temperatura da superfície e T_f ;

θ_{sa} - Função da temperatura do ar mais insolação;

∂ - Derivada parcial;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da seqüência de camadas do pavimento.....	20
Figura 2: Comportamento do cimento asfáltico exposto à variações da temperatura	21
Figura 3: Relação entre módulo de resiliência e temperatura de misturas asfálticas.	23
Figura 4: Comportamento do pavimento rígido exposto à altas e baixas temperaturas.	25
Figura 5: Gráfico da comparação do comportamento da irradiação entre as cidades de Porto Alegre – RS e São Luis – MA.	31
Figura 6: Temperatura do ar e do pavimento flexível num dia de verão no Rio de Janeiro (esquema).....	33
Figura 7: Curvas de temperatura contra tempo em três dias consecutivos – Irradiação solar, pista experimental do IPR/DNER, de reforço de concreto (Silva, 2001).....	33
Figura 8: Vista superior das placas de pavimento.	37
Figura 9: Corte transversal das placas de pavimento.....	38
Figura 10: Pavimento constituído de duas camadas.	40
Figura 11: Temperaturas referentes ao dia 07/01/2000.	58
Figura 12: Temperatura de sol - ar por períodos (a) Pavimento rígido (b) Pavimento flexível.	59
Figura 13: Temperatura a diferentes profundidades no pavimento flexível.	60
Figura 14: Temperatura a diferentes profundidades na primeira camada do pavimento rígido.	61
Figura 15: Variação da temperatura com as profundidades no pavimento rígido ao final dos quatro períodos (a) 1º dia, (b) 3º dia, (c) 5º dia e (d) 6º dia.....	62
Figura 16: Variação da temperatura com as profundidades no pavimento flexível ao final dos quatro períodos (a) 1º dia, (b) 3º dia, (c) 5º dia e (d) 6º dia.....	63
Figura 17: Comparação entre a temperatura na superfície do pavimento aumentando o calor específico do material em $\pm 20\%$ (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível.	64
Figura 18: Comparação entre a temperatura na superfície do pavimento variando a condutividade térmica do material em $\pm 20\%$ (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível.....	64

Figura 19: Temperatura na superfície variando o coeficiente de convecção do ar (a) pavimento rígido (b) pavimento flexível. 65

Figura 20: Temperatura de Sol-ar (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível. 66

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.1 PAVIMENTOS.....	18
1.1.1 Pavimentos flexíveis	19
1.1.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS	24
1.2 FATORES AMBIENTAIS.....	26
1.2.1 Clima	26
1.2.1.1 Clima Brasileiro	27
1.2.1.2 Clima no Rio Grande do Sul.....	27
1.2.2 Influência da Chuva	28
1.2.3 Solo.....	29
1.3 TRANSMISSÃO DE CALOR	30
1.3.1 Transmissão de calor por condução	30
1.3.2 Transmissão de calor por convecção.....	30
1.3.3 Transmissão de calor por irradiação.....	30
1.3.4 Fluxo de calor	31
1.3.5 Temperatura.....	32
1.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA TEMPERATURAS NO REVESTIMENTO ASFÁLTICO ENCONTRADOS NA LITERATURA.....	34
2 METODOLOGIA E PERFIL DOS PAVIMENTOS EM ESTUDO.....	37
2.1 DESCRIÇÃO DAS PLACAS	37
3 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE CONDUÇÃO DO CALOR UNIDIMENSIONAL....	39
3.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE CONDUÇÃO DO CALOR NÃO-ESTACIONÁRIO, UNIDIMENSIONAL.....	39
3.1.1 Descrição do problema e aplicação da transformação de Laplace	39
3.1.2 Formulação numérica para a transformação de Laplace inversa.	49
3.1.3 A Temperatura de sol - ar	51
3.2 METODOLOGIA PARA PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL.....	54
3.3 PARÂMETROS UTILIZADOS.....	56
4 ANÁLISE E RESULTADOS NUMÉRICOS.....	58
4.1 DADOS MEDIDOS DAS TEMPERATURAS DO AR E DO SOLO	58
4.2 TEMPERATURA DE SOL - AR	58
4.3 ESTABILIDADE DOS RESULTADOS	59
4.4 TEMPERATURA NOS PAVIMENTOS.....	60
4.5 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS	63
4.6 COMPARAÇÃO ENTRE O PAVIMENTO RÍGIDO E O FLEXÍVEL.....	65
4.7 AVALIAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS OFERECIDOS PELA LITERATURA	67

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
5.1 CONCLUSÕES	68
5.2 COMENTÁRIOS.....	69
5.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
REFERÊNCIAS E OBRAS CONSULTADAS.....	70
APÊNDICES	76

INTRODUÇÃO

O sistema rodoviário brasileiro ainda é pouco pavimentado, constituindo aproximadamente 10% de toda a malha rodoviária. Almejada por sua facilitação e maior comodidade no transporte e acesso, com qualidade, a diversos lugares, uma rodovia pavimentada também está intimamente ligada ao desenvolvimento econômico, pois liga produtores, fornecedores e consumidores, uma vez que há um possível crescimento da região através desta benfeitoria ou facilidade, levando importante incremento na qualidade de vida da população beneficiada com a pavimentação, também há redução de acidentes, do consumo de combustíveis e gastos com manutenção de veículos, entre outros aspectos. Ullidtz (1987) afirma que as condições do sistema rodoviário são de importância vital à economia de uma região.

A falta de pavimentação das estradas no Brasil justifica-se por constituir um alto investimento, uma vez que os recursos públicos são poucos, assim os maiores centros de desenvolvimento ganham a preferência na pavimentação de estradas.

As condições de rolamento da pista não dependem apenas da qualidade dos revestimentos. O pavimento é uma estrutura complexa, um bom projeto e a perfeita execução de todas as camadas são imprescindíveis. Os materiais utilizados também são caracterizados quanto à qualidade e desempenho.

Se as camadas granulares não forem bem compactadas, por exemplo, tornam-se sujeitas a deformações plásticas excessivas.

Motta (1991) afirma que o comportamento de materiais granulares sob carregamento repetido é comprovadamente elástico não linear. O tipo de solo também influencia no desempenho do pavimento, por exemplo, os solos finos apresentam relação tensão – deformação elástica não linear quando compactada na umidade ótima.

O surgimento da trilha de roda na superfície do pavimento flexível se dá pela deformação plástica resultante da passagem de cargas associadas à altas temperaturas. Esta deformação pode ser permanente, acumulada em todas as camadas do pavimento.

Além do tráfego sem pesagem e a manutenção precária, muito presentes no Brasil, os fatores ambientais não são considerados nos projetos de construção de pavimentos tanto rígidos (pavimento executado em placas de concreto de cimento Portland, pouco deformável e sujeito a rupturas à baixas temperaturas), como flexíveis (pavimento executado com materiais asfálticos, em que as deformações até um certo limite não levam ao rompimento), o que

prejudica sua vida útil, e em consequência o menor aproveitamento dos escassos recursos aplicados neste setor.

Segundo Pinto (1991) no Brasil a pavimentação asfáltica é dimensionada, quase que exclusivamente, segundo um método específico que obedece a critérios pré-estabelecidos pelo antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), hoje, Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte (DNIT), que segue as mesmas regras. Este método baseia-se fundamentalmente nas características de suporte do solo de fundação e dos materiais que constituem a estrutura do pavimento, bem como nos parâmetros de tráfego.

Várias pesquisas foram realizadas sobre a influência dos fatores ambientais e dos materiais utilizados na construção de pavimentos (MEDINA, 1997; LEITE, 1999; PEREIRA, 2001; NÚÑEZ, 2003; SPECHT 2004; MEDINA E MOTTA, 2005; entre outros), a fim de selecionar novos materiais, ligantes asfálticos e combinações que apresentassem menores custos construtivos e operacionais e maior qualidade e desempenho das rodovias. Para tanto, antigos materiais e processos construtivos de pavimentação foram sendo substituídos; também torna-se indispensável o estudo das condições regionais e da influência de diversos fatores.

O desempenho de um pavimento está intimamente ligado à ação conjunta das condições do tráfego, vida útil dos materiais envolvidos, fatores ambientais e geográficos, entre outros.

“Um dos mais importantes fatores que afetam o desempenho do pavimento é o clima, incluindo os efeitos da neve e precipitação” (YODER e WITCZAC, 1975).

Isto justifica a importância do estudo da transferência de calor, já que o clima é um dos fatores que mais degradam os pavimentos. A seleção de ligantes, por exemplo, se dá através do levantamento da temperatura do pavimento, pois esta determinará se suas propriedades físicas serão bem aceitas ou não, bem como avaliação de suas características de deformabilidade e resistência.

Nos pavimentos flexíveis, asfalto é um material viscoelástico e termosensível e tem a rigidez e resistência alterada com a temperatura. Specht (2004), afirma que a temperatura é um dos mais importantes fatores que afeta o projeto e o desempenho de um pavimento. A distribuição de tensões em diferentes estações climáticas, ou horários do dia, depende da sensibilidade das camadas asfálticas à variações de temperatura. A variação de temperatura afeta tanto as condições estruturais como funcionais. Baixas temperaturas podem acelerar os processos de trincamento (Epps, 1997) e altas temperaturas, por outro lado aceleram os processos de distorção causando deformações plásticas (ATR e escorregamento de massa) e exudações.

Os pavimentos rígidos apesar de serem mais resistentes aos efeitos do tráfego e fatores ambientais, são afetados pela temperatura, há alteração dos estados de tensões dentro da placa, empenamento térmico e variação dimensional. Medina (2006) afirma ainda que em pavimentos rígidos pode ocorrer erosão no solo de fundação quando há infiltração de água pelas juntas e bordas da placa. Dentre as propriedades térmicas dos pavimentos rígidos merecem destaque a dilatação térmica, o calor específico e a condutividade térmica. O coeficiente de dilatação dos agregados pode influir no concreto quando o seu valor é muito diferente da pasta de cimento, uma vez que grandes temperaturas podem produzir variações apreciáveis nas dimensões do agregado e da pasta, rompendo a ligação entre eles e prejudicando a qualidade do concreto endurecido.

Segundo Medina (1997) "...a deformabilidade maior ou menor do pavimento é condicionada pelas variações da temperatura do ar ou das condições meteorológicas de um modo geral".

Pereira (2003) afirma que o emprego de pistas experimentais de pavimento remonta à década de 1920. Desde então, inúmeros trechos foram analisados, trazendo inúmeros avanços que acabaram por aprimorar técnicas construtivas e procedimentos no dimensionamento de pavimentos. As pistas experimentais possibilitam inúmeros estudos, como o efeito da drenagem no subleito, o efeito de solicitações cíclicas sobre o solo, a influência das mudanças de temperatura sobre o revestimento do pavimento, o impacto das cargas de roda, e o efeito de fadiga nas placas de CCP.

Segundo Motta (1991) o apuro dos métodos empíricos deu-se com a construção de pistas experimentais sob tráfego controlado da que é exemplo marcante a "AASHO Road Test" no final da década de 50.

Huang (1993) ressalta que antes de 1920 a espessura das camadas era designada empiricamente, usava-se a mesma espessura em qualquer tipo de solo. Ao longo dos anos com novas experiências vários conceitos e métodos foram sendo aprimorados sobre a pavimentação.

Brown (1997) apresenta várias experiências e estudos realizados por outros autores sobre a pavimentação, frisando a necessidade de se incorporar as características do solo de fundação no dimensionamento e avaliação do pavimento, além da umidade e temperatura ambiente. O autor ressalta ainda a importância de que as pesquisas apresentem resultados que possam ser usados diretamente na prática.

Shen e Kirkner (2001) ressaltam que pavimentos flexíveis constituídos de materiais mais homogêneos são menos suscetíveis a rachaduras térmicas.

Sabendo-se da grande influência da temperatura ambiente sobre os pavimentos (deformabilidade, rigidez e variação dimensional, dentre outros aspectos,...) neste trabalho desenvolve-se um modelo matemático que descreve este processo de transmissão de calor estimando a temperatura à diferentes profundidades em pavimentos rígidos e flexíveis ao longo do dia através da solução da equação diferencial parcial de condução do calor, e compara-se os resultados com os que já foram oferecidos por outros autores avaliando e estabelecendo relação entre os mesmos.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 1 é feita uma revisão da literatura, onde são abordados os seguintes temas: tipos de pavimentos, fatores ambientais, transmissão de calor e modelos matemáticos apresentados por outros autores. No capítulo 2 apresenta-se a classificação do estudo e o perfil das placas de concreto em que este estudo é baseado. No capítulo 3 apresenta-se o desenvolvimento analítico, a idéia geral da programação computacional, e os parâmetros utilizados. A análise numérica do modelo matemático e os resultados encontram-se no capítulo 4. E no capítulo 5, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados temas que deram suporte à pesquisa, tais como: tipos de pavimentos, fatores ambientais, transmissão de calor e modelos matemáticos.

1.1 PAVIMENTOS

O pavimento é uma estrutura constituída por múltiplas camadas semi-infinitas, destinadas a suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente, cuja função principal é proporcionar conforto e segurança aos usuários e reduzir o custo global dos transportes.

No processo de construção de pavimentos é necessário escavar montes e aterrar vales e/ou construir viadutos e pontes devido às inclinações naturais existentes no terreno (que geralmente não é plano) pois a construção de estradas tem seu objetivo principal em criar um caminho linear e mais cômodo de forma a facilitar o percurso existente.

O pavimento é uma estrutura que possui características de elevada resistência, baixa deformabilidade, permeabilidade e aderência, adequadas à circulação de veículos. Pode ser mais ou menos reforçado, dependendo das condições existentes, sendo esse reforço feito com o aumento das espessuras das camadas que o constituem, ou com repetição de alguma camada, que é o caso do pavimento flexível.

De um modo mais amplo, existem dois tipos de pavimentos distintos, pavimentos rígidos e pavimentos flexíveis.

A diferença existente entre estes dois tipos de pavimentos consiste no tipo de materiais utilizados nas camadas superiores. No caso dos pavimentos rígidos a camada superior é constituída de cimento Portland e no pavimento flexível, a camada superior é constituída por materiais betuminosos (também designada por asfalto).

Em ambos os tipos de pavimentos, sob estas camadas superiores existem normalmente duas camadas de materiais britados, designadas por base e reforço do subleito.

Os pavimentos de concreto executados com cimento Portland, segundo um estudo do Centro de Tecnologia de Transportes de Superfície do Governo do Canadá, em (ABPV, 2004), apresentam uma redução significativa no consumo de combustíveis. Uma experiência realizada com caminhões mostrou que quando trafegam sobre pavimentos de concreto gastam até 11% menos combustível para 100 km/h.

A pesquisa mostra que o impacto econômico da opção pelo concreto pode ser significativo, pois apresenta durabilidade cerca de cinco vezes maior que o asfalto. Exigindo até 85% menos manutenção.

Além de não deformar, nem formar trilhas de roda quando submetido a cargas pesadas, o concreto resiste melhor às variações climáticas, não oxida quando sujeito às chuvas e ao calor. Isto explica por que hoje, se dá importância à utilização de concreto de cimento em pavimentos, porém o custo de construção é mais elevado.

“No concreto, a primeira operação de manutenção pode ser feita dez anos depois da instalação”, garante o engenheiro Márcio Rocha Pitta, ex-diretor da Associação Brasileira de Pavimentação (ABPV) e especialista que pesquisa o assunto há mais de 20 anos (ABPV, 2004).

Além da redução de gastos com manutenção, o pavimento de concreto é a solução técnica ideal para pavimentação de vias públicas com tráfego de veículos pesados.

Em contrapartida os pavimentos flexíveis possuem algumas vantagens, em relação aos pavimentos rígidos: custo menor de construção e manutenção, maior conforto de rolamento, ausência de juntas, possibilidade de pavimentação por etapas além de utilizar-se de técnicas já consagradas no meio técnico.

1.1.1 Pavimentos flexíveis

É chamado flexível, o pavimento composto por um revestimento betuminoso sobre uma base granular.

O perfil do pavimento flexível geralmente é composto pelas seguintes camadas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. A espessura das camadas bem como o perfil descrito anteriormente pode variar dependendo do tráfego e das condições econômicas e locais.

Compostas de diferentes materiais, as camadas que constituem um pavimento exercem funções diferentes, também têm seu número e espessura variáveis conforme o tipo de pavimentação. A Figura 1 ilustra a seqüência de camadas que compõe a maioria dos pavimentos:

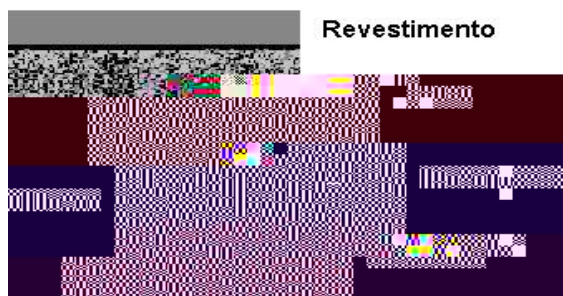


Figura 1: Ilustração da seqüência de camadas do pavimento

Subleito – É o terreno de fundação do pavimento, e deverá apresentar características geométricas definitivas;

Reforço do subleito – Camada construída acima do subleito se necessário, com o objetivo de complementá-lo;

Base – Camada destinada a resistir aos esforços do tráfego e distribuí-los às demais camadas, pode ou não ser complementada pela sub-base;

Revestimento – Deve ser o mais impermeável possível, recebe ação direta do tráfego, também finaliza o trabalho melhorando as condições de rolamento e protegendo as camadas inferiores, é a camada que está mais exposta às intempéries e ao meio ambiente;

Segundo De Senço (1997) as camadas superiores do pavimento estão submetidas a maiores pressões, exigindo na sua construção materiais de melhor qualidade. Para a mesma carga aplicada, a espessura do pavimento deverá ser tanto maior quanto pior forem as condições do material do subleito. Pode-se mencionar a regra de que subleito ruim e cargas pesadas levam a pavimentos espessos; subleito de boa qualidade, e cargas leves levam a pavimentos delgados.

Os pavimentos flexíveis elaborados a partir da mistura de agregados e cimento asfáltico são usados e indicados para a maioria dos projetos de pavimentação.

Segundo De Senço (1997) materiais betuminosos são hidrocarbonetos de cor, dureza e volatilidade variáveis. Betumes são combinações de hidrocarbonetos produzidos naturalmente ou por combustão, em geral o termo betume engloba asfaltos e alcatrões.

O autor ainda define asfalto como sendo material aglutinante de consistência variável, cor pardo-escuro ou negro, podendo ocorrer em jazidas ou ser obtido pela refinação do petróleo. Alcatrões são resultantes de processos de refino de alcatrões brutos, os quais se

originam da destilação de carvões durante fabricação de gás e coque. O asfalto tem sua viscosidade variável com a temperatura.

Estudos estão sendo realizados quanto à aplicação de borracha reciclada, oriunda de pneus velhos, na execução de pavimentos flexíveis. Specht (2004), afirma que a adição de 12% a 18% de borracha ao ligante, leva à produção de misturas com maior resistência à fadiga e à deformações permanentes e maior durabilidade. A incorporação de borracha, através do processo seco, melhora as características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico, devido a menor sensibilidade à variações de temperatura.

O autor afirma ainda que cada vez mais está se buscando produtos asfálticos com melhor desempenho, o que coloca os ligantes asfálticos modificados em situação de destaque, e já é uma realidade em muitos países a incorporação de borracha reciclada de pneus tanto em misturas asfálticas como em outras aplicações de pavimentação.

O asfalto é um material viscoelástico e termosensível pois quando exposto à altas temperaturas tende a formar deformações plásticas e à baixas temperaturas deformações elásticas.

Pode-se dizer segundo Pais e Pereira (1999) que a rigidez de uma mistura betuminosa depende da temperatura e do tempo de carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos. Daqui pode definir-se uma rigidez elástica quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento e uma rigidez viscosa para altas temperaturas e longos tempos de carregamento. A Figura 2, ilustra este comportamento:

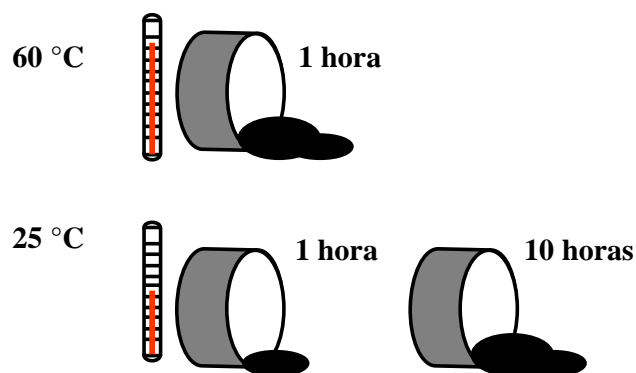


Figura 2: Comportamento do cimento asfáltico exposto à variações da temperatura

Leite (1999) explica que no Brasil o derivado de petróleo usado como ligante dos agregados minerais é denominado como “cimento asfáltico de petróleo”, o termo “asfalto” designa popularmente a mistura do cimento asfáltico com os agregados.

“A análise da resposta do pavimento às cargas dos veículos bem como a determinação da capacidade resistente dos pavimentos requer a quantificação das características das misturas betuminosas utilizadas na estrutura do pavimento” (PAIS e PEREIRA, 1999).

Lu e Wright (2000) realizaram testes em laboratório coletando medidas de deformações do pavimento sob carregamento, separadas em três componentes: elasticidade, viscoelasticidade e viscoplasticidade do material também submetido a quatro temperaturas diferentes. Os resultados mostraram a dependência destes componentes quando expostos à altas temperaturas. Isto explica o fenômeno que comumente aparece no verão que é aceleração do processo de afundamento de trilhas de roda.

Huang (1993) afirma que afundamentos de trilhas de roda ocorrem unicamente em pavimentos flexíveis.

Wolfe et al (1995) explicam que o interesse nas propriedades dos materiais do pavimento também tem como propósito apresentar o módulo de resiliência das respectivas camadas com base na teoria da elasticidade. Para tanto, complementa que calcular as propriedades das camadas estruturadas dentro do pavimento requer o conhecimento do perfil das temperaturas internas da estrutura.

Medina (2006) explica que o termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, onde este tipo de deformação permite que o pavimento recupere seu estado normal quando cessam as tensões causadoras das deformações, ou seja, módulo de resiliência corresponde à energia potencial de deformação.

As misturas asfálticas têm seu módulo de resiliência – capacidade de se deformar elasticamente - alterado a altas temperaturas o que pode ser visualizado através da Figura 3, onde Specht (2004) apresenta relação entre o Módulo de Resiliência e temperatura para diferentes misturas asfálticas preparadas com ou sem adição de borracha.

O pavimento também sofre deformações à baixas temperaturas, o que pode ser explicado por Hussein et al (1998), que citam dentre outras preocupações a incompatibilidade térmica entre ligantes e agregados minerais resultando numa tensão térmica induzida à baixas temperaturas quando o pavimento estiver sob prova de carregamento, ocasionando fratura e deteriorização dos agregados asfálticos.



Figura 3: Relação entre módulo de resiliência e temperatura de misturas asfálticas.

Fonte: Specht (2004)

Kliewer et al (1996) também realizaram experiências em laboratório para avaliar a vida útil do pavimento considerando o tipo de mistura asfáltica e suas propriedades térmicas à baixas temperaturas e concluíram que à medida que o pavimento alcança sua vida útil torna-se mais vulnerável à influência das temperaturas, ou seja, quanto maior a vida útil do pavimento menor sua resistência quando exposto à baixas temperaturas.

Simonsen et al (1997) ressalta que embora o efeito do clima em regiões frias seja reconhecido como uma das maiores contribuições para a deteriorização da estrutura, ainda há poucos modelos matemáticos preocupados com o congelamento e degelamento de pavimentos.

Bäckström (2000) realizou um estudo completo sobre temperaturas em pavimentos porosos durante períodos com condições frias prolongadas e concluiu que estes pavimentos são mais resistentes nestas regiões (frias), pois facilitam a passagem da água em caso de tempestades e no inverno ficam livres do gelo e neve mais cedo do que os convencionais.

É chamada camada porosa de atrito a mistura com volume de vazios entre 18 e 24% com capacidade de drenar a água superficial melhorando as camadas de rolamento.

Shen e Kirkner (2001) explicam que os processos de trincamento térmico da superfície podem acelerar a deteriorização indesejada dos pavimentos através de infiltração de água e umidade nas demais camadas. Os autores afirmam ainda que este tipo de trincamento é mais comum em pavimentos expostos à baixas temperaturas. Também existe o chamado trincamento térmico por fadiga, causado por repetidas variações de temperatura, altas durante o dia e baixas durante a noite.

1.1.2 Pavimentos rígidos

Os pavimentos rígidos são executados em placas de concreto de cimento Portland e utilizados em projetos destinados a suportar grandes cargas em vias urbanas, rurais, aeródromos, áreas de estacionamento, depósitos, etc. Também refletem melhor a luz, por terem uma coloração mais clara, aumentando a visibilidade e reduzindo os custos de iluminação. Rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações.

Cimento Portland é um aglomerante chamado hidráulico, por oferecer resistência quando empregado dentro d'água. Segundo a Especificação Brasileira EB-1 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, o cimento Portland é obtido através da pulverização do clínquer resultante da calcinação e misturas de materiais calcários e argilosos, água e gesso.

Medina e Motta (2005) afirmam que as placas de concreto sofrem expansões e contrações causadas por variações de temperatura e umidade. Uma placa exposta ao tempo sem cargas está sujeita à ação de radiação solar e da precipitação atmosférica. Torna-se complexa a ação conjugada de fatores climáticos e carregamento dos veículos.

Quando expostos à altas temperaturas, sofrem deformações como diferentes estados de tensões dentro da placa e variação dimensional, podendo levar ao trincamento do pavimento por fadiga.

“As variações de temperatura podem ocasionar expansões ou contrações, conforme haja uma elevação ou uma redução de temperatura (PETRUCCI, 1998).”

Ainda Petrucci, explica que as deformações causadoras das mudanças de volume podem ser agrupadas em causadas pelas variações das condições ambientais, tais como: retração, variações de umidade e variações de temperatura. E as causadas pela ação de cargas externas, que originam: deformação imediata ou lenta.

O comportamento do pavimento rígido exposto a altas e baixas temperaturas pode ser visualizado através da Figura 4:

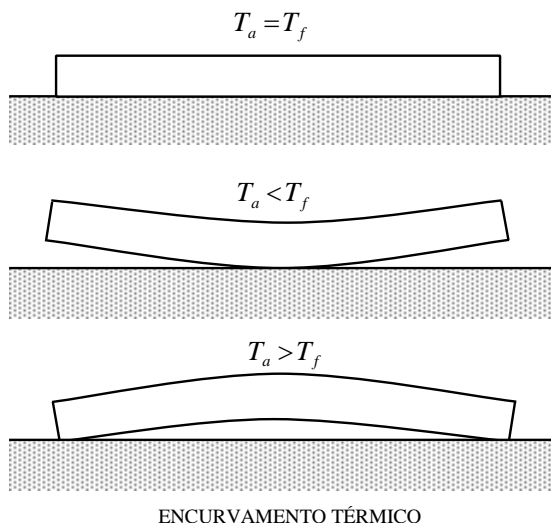


Figura 4: Comportamento do pavimento rígido exposto à altas e baixas temperaturas.

Para De Senço (1997) o cimento já era conhecido na Idade Antiga, utilizado de forma natural o cimento pozolânico, principalmente entre os romanos que mais tarde com a queda do Império Romano, este material decaiu. Mas em 1756, o engenheiro inglês John Smeaton fez voltar sua utilização. Somente em 1845 é que se iniciou a produção do verdadeiro cimento Portland, produzido por Johnson, o compatriota de Aspdin que tentara anteriormente sua modificação.

No Brasil, o primeiro pavimento de concreto em rodovia foi executado em 1925, rodovia que liga São Paulo a Cubatão.

Os pavimentos rígidos ou pavimentos de concreto são denominados “nobres”, por sua grande durabilidade e desempenho estrutural, constituem tecnologia reconhecidamente mais adequada às vias rodoviárias e urbanas de tráfego intenso e pesado e a certas situações críticas de carregamento e de ambiência, como aeroportos, áreas portuárias, postos de pesagem de veículos, praças de pedágio, frigoríficos e determinados pisos industriais. Têm uma vida útil superior a 20 anos e requerem pouca manutenção. São menos permeáveis que os pavimentos comuns, não sofrem com os efeitos dos óleos e combustíveis e não se deformam tanto com o calor.

Balbo et al [s. d.] realizaram experiências durante o ano de 1999 em uma pista experimental de concreto simples construída no campus da Cidade Universitária em São Paulo. A pista experimental foi concebida em cinco seções de teste empregando 15 placas de concreto, em uma área de estacionamento de veículos. Cada seção experimental possui três placas de concreto com diferentes características com o objetivo de coletar dados referentes aos efeitos térmicos sobre placas de concreto.

As camadas do pavimento rígido são, respectivamente: subleito, sub-base e placa de concreto. Os pavimentos rígidos apresentam um número mais reduzido de camadas em relação aos pavimentos flexíveis (asfálticos), pois a camada superior tem dupla função: base e revestimento.

Segundo Medina (1997) o pavimento é dito semi-rígido quando, sob o revestimento betuminoso, tem-se uma base cimentada.

1.2 FATORES AMBIENTAIS

Como já mencionado anteriormente, os fatores ambientais têm grande influência no processo de construção e desempenho dos pavimentos. Vejamos a seguir alguns dos fatores considerados mais importantes.

1.2.1 Clima

O clima está relacionado às correntes atmosféricas e o balanço da irradiação solar e em consequência a pluviosidade, nebulosidade e a temperatura do ar.

Forsdyke (1969) descreve clima como sendo simplesmente o tempo médio durante um período de muitos anos.

Segundo Medina e Motta (2005) clima é um conjunto de fenômenos meteorológicos que caracterizam, durante um longo período, o estado médio da atmosfera e sua evolução em determinado lugar.

Para classificar um clima, devemos considerar a temperatura, a umidade, as massas de ar, a pressão atmosférica, nebulosidade, correntes marítimas e ventos, entre muitas outras características. A classificação mais utilizada para os diferentes tipos de clima do Brasil assemelha-se a criada pelo estudioso Arthur Strahler, que se baseia na origem, natureza e

movimentação das correntes e massas de ar. Podemos identificar três correntes principais: equatorial, tropical e polar. De acordo com essa classificação, os tipos de clima do Brasil são os seguintes: subtropical, semi-árido, equatorial, tropical, tropical de altitude e tropical atlântico ou tropical úmido.

1.2.1.1 Clima Brasileiro

Segundo Amorim (1996) no Brasil predomina o clima tropical, no entanto, a influência de determinados fatores (relevo, latitude, extensão territorial, massas de ar...), faz com que existam vários subtipos ou modalidades bastante diferenciadas de clima tropical.

Em consequência destes fatores variados, a diversidade climática do território brasileiro é muito grande. As massas de ar são de suma importância porque atuam diretamente tanto na temperatura quanto na pluviosidade, provocando as diferenciações climáticas regionais (CLIMA DO BRASIL – Wikipédia, [s.d.]).

Já a amplitude térmica - diferença entre as temperaturas mínimas e máximas no decorrer do ano - é baixa, em outras palavras: a variação de temperatura no território brasileiro é pequena (CLIMAS DO BRASIL – Geografia, [s. d.]).

Atravessado na região norte pela Linha do Equador e ao sul pelo Trópico de Capricórnio, o Brasil está situado, na maior parte do território, nas zonas de latitudes baixas - chamadas de zona intertropical - nas quais prevalecem os climas quentes e úmidos.

Para Medina e Motta (2005) no Brasil a temperatura média anual está entre 22° C e 28° C, sendo que em apenas 6% do território, no Sul, fica entre 14° C e 18° C. A média das máximas está entre 30° C e 36° C, exceto nos planaltos do Sul e nas montanhas do Sudeste, onde se situa entre 24° C e 29° C. A máxima absoluta varia de 38° C e 42° C. O mês mais quente é janeiro no Sudeste e no Sul; novembro no nordeste e setembro ou outubro no Norte e Centro-Oeste. Predominam as temperaturas elevadas em todo o país. Apenas no Sul e parte do Sudeste (de altitude), a temperatura mínima absoluta do ar atinge 0° C ou menos, porém não mais de 15 dias do ano.

1.2.1.2 Clima no Rio Grande do Sul

O Rio Grande do Sul, estado brasileiro, localiza-se no extremo sul da região Sul do Brasil.

Segundo James & Mendes (2004) no Rio Grande do Sul predomina o clima subtropical e explicam ainda que este é o único clima brasileiro que registra uma queda mais sensível das temperaturas durante o inverno. Mas seu verão é muito quente o que justifica o registro das maiores amplitudes térmicas do país.

Além do relevo e da posição geográfica, os sistemas de circulação atmosférica influenciam bastante na caracterização climática da região Sul que apresenta duas características próprias: a primeira é a homogeneidade quanto às chuvas e seu regime, e a outra a unidade climática. Em relação às temperaturas, o inverno é frio e o verão quente. A temperatura média anual fica entre 14° e 22°C e nos locais acima de 1.100 m de altitude, cerca de 10°C.

As maiores taxas de irradiação no Brasil bem como as menores acontecem no Rio Grande do Sul.

Nas regiões tropicais a quantidade de chuva anual é bastante variável, a presença de tempestades é mais freqüente produzindo elevada intensidade de precipitações.

1.2.2 Influência da Chuva

A precipitação é o segundo aspecto de grande importância para climatólogos, constitui o principal mecanismo natural de restabelecimento dos recursos hídricos da terra, ocorrendo sob as formas de chuva, granizo, neve, geada, orvalho, granizo...

Observa-se que o excesso de chuva além de danificar a estrutura do pavimento oferece perigo nas estradas, Medina e Motta (2005) afirmam que o polimento dos agregados pelo tráfego torna os revestimentos mais susceptíveis à água na derrapagem.

Huang (1993) afirma que a precipitação afeta as camadas pela quantidade de água infiltrada na superfície até as camadas de baixo.

O excesso de umidade afeta também o desempenho do pavimento, quando sofrem trincamento e há entrada de água. Até mesmo as trincas muito pequenas são capazes de permitir penetração de fluxos de água bastante grandes. Também a desagregação dos materiais do pavimento com o passar do tempo, expõe a superfície à ação físico-química em contato com a água, trazendo danos à estrutura.

O excesso de chuva, se não há um bom sistema de drenagem afeta muito a estrutura do pavimento. A drenagem garante melhor manutenção do pavimento.

Medina e Motta (2005) afirmam que o lençol de água pode influenciar no pavimento em terreno argiloso se ele tiver a menos de 10 m de profundidade e em terreno arenoso a menos de 3 m.

1.2.3 Solo

Para De Senço (1997) solo é o material mais antigo, mais usado e mais complexo dos materiais de construção. Para ele: “Solo é uma formação natural, de estrutura solta e removível e de espessura variável, resultante da transformação de uma rocha-mãe, pela influência de diversos processos físicos, físico-químicos e biológicos”.

Desde o final do século XIX, o homem tem a necessidade de remover, acumular, modificar a estrutura geográfica do solo, para melhor desenvolver seus projetos de construção e evitar desastres tais como desmoronamentos entre outros. Para tanto torna-se indispensável o estudo aprofundado desde importante componente e suas propriedades.

Na construção do pavimento leva-se em consideração o teor de umidade do solo. Chama-se teor de umidade a relação entre a massa de água contida nos vazios desse solo e a massa de sólidos (massa de solo seco).

A temperatura do solo e sua variação estão relacionadas ao tipo de vegetação que o cobre, assim quanto maior a camada de cobertura vegetal sobre o solo, menor é a amplitude de variação da temperatura.

As maiores variações de temperatura do solo são observadas nos primeiros centímetros de profundidade e quanto maior a profundidade, menor será a variação. Gasparim et al (2005), afirma que a 40 cm de profundidade a temperatura do solo é praticamente estável.

Após a construção do pavimento também há preocupação com a Umidade de Equilíbrio do pavimento uma vez que esta está ligada ao teor de umidade do solo.

Segundo Motta (1991) a umidade de equilíbrio é o valor médio da gama de oscilação da umidade ao longo do ano, após a fase de acomodação nos primeiros meses de serviço.

A análise estrutural dos pavimentos em utilização se faz considerando a umidade de equilíbrio que cada camada atinge ao fim de certo tempo.

1.3 TRANSMISSÃO DE CALOR

Transferência de calor é energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura, ou seja, sempre que existir diferença de temperatura em um meio ou entre meios ocorrerá transferência de calor. A transmissão de calor pode ser distribuída em três processos distintos: condução, convecção e irradiação.

1.3.1 Transmissão de calor por condução

É definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. O corpo mais quente transfere calor para o mais frio. Este processo visualizado como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas de uma substância devido a interações entre elas.

1.3.2 Transmissão de calor por convecção

Convecção é a transferência de calor das partículas em movimento, que é o caso dos líquidos e fluídos. É o processo pelo qual a energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura.

1.3.3 Transmissão de calor por irradiação

A propagação de calor acontece por ondas eletromagnéticas, não depende do meio, se propaga no vácuo, isto é, o calor é transferido de uma superfície em alta temperatura para uma superfície em temperatura mais baixa quando tais superfícies estão separadas no espaço. Muito estudada na Engenharia Térmica, tem sua importância para o conforto térmico ambiente. É por meio desta propagação que o Sol aquece a Terra.

Fluxo de irradiação é energia por unidade de área e de tempo

$$\Phi = \sigma T^4 \quad (1.1)$$

onde

σ = constante de Stefan-Boltzman, o valor é $5,67 \times 10^{-8} \text{ Jm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \text{ K}^{-4}$

T = temperatura absoluta em graus Kelvin (K).

Motta (1991) diz que a quantidade de irradiação solar incidente numa atmosfera depende de três fatores principais: período do ano, período do dia e latitude. A quantidade de irradiação solar incidente na atmosfera é modificada pela duração do dia, que varia com a latitude de acordo com a estação do ano, além da presença ou não de nebulosidade, umidade e altitude do ponto considerado.

No Rio Grande do Sul são medidos os maiores valores de irradiação do Brasil e é também onde se registra grandes gradientes térmicos durante o verão. Os gráficos da Figura 5 mostram a comparação da variação diurna de irradiação horária em uma superfície horizontal para Porto Alegre - RS e São Luís - MA.

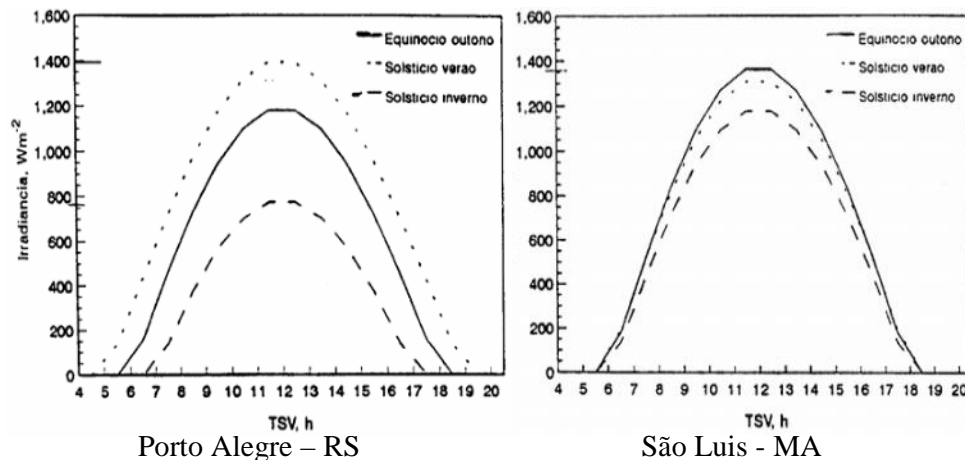


Figura 5: Gráfico da comparação do comportamento da irradiação entre as cidades de Porto Alegre - RS e São Luís - MA.

1.3.4 Fluxo de calor

A lei básica que dá o relacionamento entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura foi obtida com base em dados experimentais e atribuída a Joseph Fourier (1768 -

1830), na época da revolução industrial na Europa, o qual também inventou a máquina à vapor.

Para sólidos homogêneos isotrópicos (em que a condutividade térmica independe da direção), a Lei de Fourier é

$$\vec{q}(\vec{r}, t) = -k\Delta T(\vec{r}, t) \quad , \quad (1.2)$$

onde

ΔT = vetor normal à superfície isotérmica chamada gradiente de temperatura;

q = fluxo de calor por unidade de tempo e área da superfície isotérmica;

\vec{r} = vetor posição;

t = tempo;

k = condutividade térmica do material, é uma grandeza escalar e positiva.

1.3.5 Temperatura

A temperatura é designada como o grau de agitação térmica entre as moléculas.

“Quanto maior a altitude de uma localidade menor será sua temperatura” (JAMES & MENDES, 2004).

As primeiras medições de temperatura em revestimentos asfálticos aconteceram no Brasil em 1965, utilizando furo com óleo e termômetro, realizadas por Medina e Farah (1965).

Nas experiências seguintes Motta (1979) utilizou um painel experimental na COPPE/UFRJ que foi instrumentalizado com termopares de cobre – constantan ligados a um registrador automático. Constatou-se desde as primeiras experiências que a temperatura do revestimento é função do mês, da hora do dia, da profundidade, das características das misturas, das condições atmosféricas, etc. Que dias claros ensolarados são os que apresentam maiores níveis de temperatura em todas as profundidades, e nem toda a irradiação solar é absorvida, sendo parte da energia reirradiada e parte refletida, e isto é função também da cor do revestimento, sendo a cor escura a que mais absorve energia.

No início do dia, a temperatura do revestimento é menor em relação às demais profundidades, e vai aumentando gradativamente a temperatura conforme a irradiação solar, a

ponto de obter temperatura bem superior às demais profundidades por volta das 14h, horário normalmente mais quente do dia.

No final da tarde quando a irradiação solar é menos intensa, a temperatura do revestimento tende a acompanhar este processo, diminuindo assim seu grau em relação ao dia, enquanto o interior do pavimento mantém a temperatura superior ao do revestimento.

Segundo Motta (1991) a temperatura da superfície normalmente é maior durante o dia e menor durante a noite, em relação às outras profundidades, sendo que à noite fica próxima da temperatura do ar. E quanto maior a profundidade, menor a influência das variações rápidas de insolação e temperatura do ar.

As variações da temperatura em relação ao tempo em diferentes profundidades no pavimento flexível e rígido podem ser visualizadas nas Figuras 6 e 7 respectivamente:

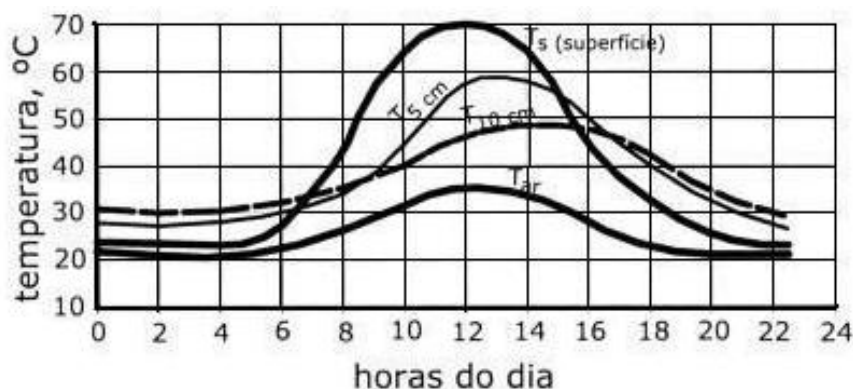


Figura 6: Temperatura do ar e do pavimento flexível num dia de verão no Rio de Janeiro (esquema).

Fonte: Medina e Motta (2005)

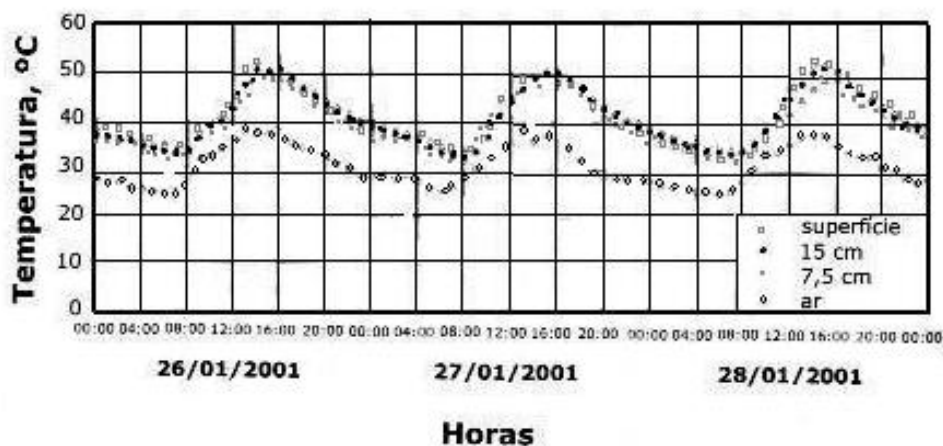


Figura 7: Curvas de temperatura contra tempo em três dias consecutivos – Irradiação solar, pista experimental do IPR/DNER, de reforço de concreto (Silva, 2001).

Fonte: Medina e Motta (2005)

No revestimento, a temperatura é função da insolação entre outros aspectos que está diretamente vinculada à latitude do ponto considerado.

A irradiação solar está diretamente vinculada à temperatura do ar e do solo. Sendo a temperatura determinada pelo balanço entre a irradiação que chega e a que sai e pela sua transformação em calor.

1.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA TEMPERATURAS NO REVESTIMENTO ASFÁLTICO ENCONTRADOS NA LITERATURA

Em 1987, várias universidades americanas com o auxílio de órgãos governamentais criaram o Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária – SHRP, que desenvolveu um sistema de especificação de materiais asfálticos – SUPERPAVE™ – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior. Este é o único sistema que considera as condições ambientais (temperaturas máximas e mínimas relacionadas ao grau de desempenho dos materiais) e de tráfego regionais para a seleção de materiais na construção de pavimentos flexíveis.

As equações que estimam as máximas e mínimas temperaturas no pavimento são dadas por

$$T_{máx} = 0,9545(T_{ar} - 0,00618 Lat^2 + 0,2289Lat + 42,2) - 17,78 , \quad (1.3)$$

onde

$T_{máx}$ = temperatura máxima do pavimento registrada no dia, °C;

T_{ar} = média das temperaturas máximas do ar dos sete dias mais quentes do ano, °C;

Lat = latitude geográfica do local do projeto em graus.

$$T_{min} = -1,56 + 0,72T_{ar} - 0,004Lat^2 + 6,26 \log^{10}(H + 25) - Z(4,4 + 0,52\sigma_{ar}^2)^{1/2} , \quad (1.4)$$

onde

T_{min} = temperatura mínima do pavimento registrada no dia, °C;

T_{ar} = média das temperaturas mínimas do ar dos sete dias mais frios do ano, °C;

Lat = latitude geográfica do local do projeto em graus;

H = profundidade a partir da superfície, mm;

σ_{ar} = desvio padrão da temperatura média mínima do ar, °C;

$Z = 2,055$ para 98% de confiabilidade.

Em 1991, Motta apresentou diferentes modelos para diferentes regiões do Brasil. Para a região Sul definiu o seguinte modelo:

$$T(x) = T_{\text{sup}} + (T_{\text{sup}} - T_{\text{ar}})[1 - e^{(0,06855 - 0,000633x)x}], \quad (1.5)$$

onde

T_{sup} = Temperatura na superfície do pavimento;

T_{ar} = Temperatura do ar;

x = profundidade.

Kilpp (2001) propôs um estudo sobre a transferência de calor em pavimentos flexíveis com o propósito de obter modelos de correlação da temperatura do pavimento com a temperatura do ar para as cidades de Ijuí e Sobradinho. Através de oito furos no pavimento flexível, dos quais quatro foram feitos na cidade de Ijuí e quatro em Sobradinho. De cada quatro furos, um par esteve exposto ao sol e outro par a sombra em ambas as cidades. As medições foram feitas através de um termômetro digital a 2 cm e 5 cm de profundidade. Também foram medidas as temperaturas do ar e da superfície do pavimento.

Os modelos definidos por Kilpp para a previsão de temperaturas em pavimentos flexíveis foram:

$$T_{\text{sup}} = -0,72 + 1,34T_{\text{ar}} \quad R^2 = 0,71 \quad (1.6)$$

$$T_{2\text{cm}} = -2,10 + 1,48T_{\text{ar}} \quad R^2 = 0,63 \quad (1.7)$$

$$T_{5\text{cm}} = -1,39 + 1,48T_{\text{ar}} \quad R^2 = 0,56, \quad (1.8)$$

onde

T_{sup} = temperatura da superfície (°C);

$T_{2\text{cm}}$ = temperatura a 2 cm de profundidade (°C);

$T_{5\text{cm}}$ = temperatura a 5 cm de profundidade (°C).

Núñez et al (2003) evidenciaram a notável diferença de amplitudes térmicas diárias entre o pavimento asfáltico e o ar, ao realizarem experiências em campo. Também obtiveram modelos de grande significância estatística relacionando a temperatura no interior do pavimento com a temperatura do ar e a irradiação solar. Este último parâmetro mostrou ter efeito muito significativo nas temperaturas medidas em revestimentos de concreto asfáltico.

O modelo geral proposto por Núñez et al. permite estimar a temperatura a qualquer profundidade (z) entre 0 e 9 cm no interior de um revestimento em concreto asfáltico

$$T_z = 1,85 - 0,56 z + 1,38 T_{ar} + 0,005 Irrad , \quad (1.9)$$

onde

T_z = temperatura na profundidade (z), ($^{\circ}\text{C}$) ;

T_{ar} = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

$Irrad$ = Irradiação solar medida 1,5 m acima da cota da superfície do pavimento,
 w / m^2 .

Os modelos mencionados acima são empíricos. Na literatura há muitos modelos analíticos ou semi-analíticos baseados em equações diferenciais parciais. Chen e Lin (1991) aplicam a técnica da transformação de Laplace à análise de condução de calor em sistemas de multicamadas unidimensionais; Beyer (1995 e 1998) em sua tese de doutorado: “Fluxo de Calor Transiente em Paredes Externas de Edificações”, juntamente com Aseka (2003 e 2004) desenvolveram um sistema de parâmetros concentrados combinados com a técnica da transformação de Laplace para resolver o problema de condução de calor bidimensional não-estacionário em sistemas de multicamadas.

2 METODOLOGIA E PERFIL DOS PAVIMENTOS EM ESTUDO

Baseado no perfil de construção de duas placas de pavimento (uma em pavimento rígido e outra em pavimento flexível), existentes no Laboratório da Engenharia Civil da UNIJUÍ, este estudo utiliza a técnica da transformação de Laplace ao problema unidimensional da condução de calor no pavimento constituído por duas camadas distintas.

É analisado o tipo de transferência de calor no pavimento, a relação da temperatura do ar e insolação com a temperatura da superfície e à diferentes profundidades, com o propósito de quantificar sua importância no dimensionamento de estruturas de pavimentos.

Para a realização desta pesquisa foram considerados dados de temperatura do solo desta região em diferentes profundidades, relacionados ao tipo de transferência de calor no pavimento e ao índice de absorção de calor do ar mais insolação pelos materiais.

2.1 DESCRIÇÃO DAS PLACAS

A placa denominada pavimento rígido é constituída por subleito, reforço do subleito, base e revestimento executada com cimento Portland. E a placa designada pavimento flexível (asfalto), é constituída por subleito, reforço do subleito, base, revestimento betuminoso e camada selante. A forma como as placas foram construídas é dada pelo esquema a seguir (Figura 8):

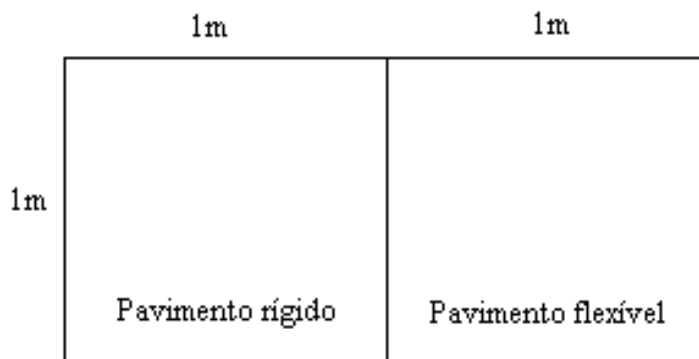


Figura 8: Vista superior das placas de pavimento.

Imaginando um corte transversal no centro das placas de pavimento, pode-se visualizar as camadas do pavimento na Figura 9.

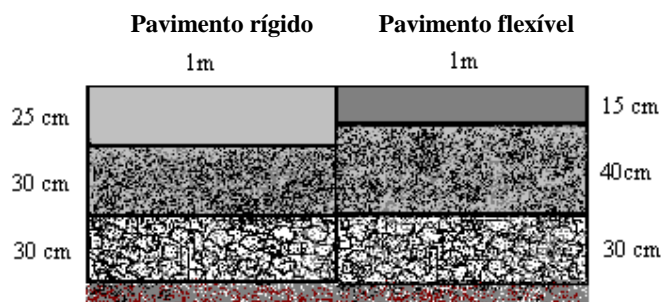


Figura 9: Corte transversal das placas de pavimento

As camadas granulares são assim definidas:

Subleito: composto de solo argiloso natural (típico da região de Ijuí), com alteração de rocha basáltica.

Reforço do subleito: base granular composta de 'rachão', com profundidade de 30 cm, responsável pela drenagem da água caso haja infiltração. A camada de rachão constitui formas graúdas não uniformes, não ficando perfeitamente encaixadas quando a camada é compactada, facilitando assim a passagem da água.

Base: com espessura de 30 cm no pavimento rígido e 40 cm no pavimento flexível, é composta de cascalho e pedra britada de diversos tamanhos, quando compactada na camada não há vazios, ficando assim responsável pela resistência e distribuição dos esforços causados pelo tráfego.

Revestimentos:

Concreto de cimento Portland: executado à base de cimento Portland e água, com 25 cm de espessura finaliza a execução do pavimento rígido.

Betuminoso: pré-misturado a frio, executado com emulsão (água, betume e emulsificante). Com espessura de 15 cm reveste o pavimento flexível.

Camada selante: banho de emulsão asfáltica sobre o revestimento betuminoso, com a finalidade de selar o pavimento, impermeabilizando – o

3 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE CONDUÇÃO DO CALOR UNIDIMENSIONAL

Aqui é apresentada uma solução para o problema da transferência de calor não-estacionário no pavimento rígido e flexível.

A solução semi-analítica do problema é através de equações diferenciais parciais, considerando cada placa de concreto ou de pavimento uma estrutura unidimensional, composta de duas camadas distintas, com parâmetros térmicos diferentes.

A primeira camada considerada é a do revestimento e a segunda camada engloba a camada de base e reforço do subleito por possuírem as mesmas propriedades térmicas.

A temperatura do ar e insolação são funções periódicas.

3.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE CONDUÇÃO DO CALOR NÃO-ESTACIONÁRIO, UNIDIMENSIONAL.

3.1.1 Descrição do problema e aplicação da transformação de Laplace

O pavimento em estudo é considerado um meio constituído de duas camadas paralelas em contato, como ilustrado na Figura 10. Cada camada é homogênea, isotrópica com propriedades térmicas constantes. Inicialmente cada camada está à temperatura $T_i(x,0) = T_{0i}(x)$ em $x_i < x < x_{i+1}$ (para $i=1$, $x_1 = 0 \leq x \leq x_2 = h_1$ e para $i=2$, $x_2 \leq x \leq x_3 = h_2$). Na profundidade limite da segunda camada $x_3 = h_2$, a temperatura é considerada constante T_f , pois nesta profundidade a variação da temperatura ao longo do dia é muito pequena. Os índices subscritos um e dois referem-se respectivamente à primeira e segunda camadas do pavimento. Não há geração de calor no meio.

Este problema de condução de calor é descrito pela equação diferencial parcial

$$\frac{\partial^2 T_i(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{\partial T_i(x,t)}{\partial t}, \quad (i=1,2), \quad t > 0 \text{ e } x_i < x < x_{i+1}, \quad (3.1)$$

onde $\alpha_i = \frac{k_i}{\rho_i C_{p_i}}$ é difusividade térmica do material, k_i é condutividade térmica, ρ_i é densidade e C_{p_i} é calor específico.

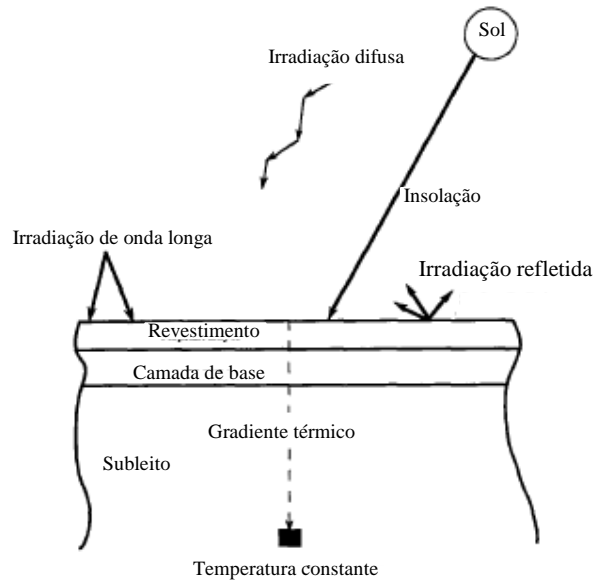


Figura 10: Pavimento constituído de duas camadas.

Cada condição de contorno (fronteira e inicial) determina um tipo de solução da equação diferencial parcial. As condições iniciais especificam a distribuição de temperatura em $t = 0$ no domínio considerado e as condições de fronteira especificam a temperatura ou fluxo de calor nos contornos deste domínio.

Estas condições dependem do tipo de troca de calor e da informação disponível que é conhecido na fronteira (condução, convecção e irradiação).

Neste caso, conforme a Figura 10, a equação (3.1) está sujeita, na primeira camada do pavimento, à seguinte condição de contorno e inicial

$$\frac{\partial^2 T_1(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t}, \quad 0 < x < h_1 \text{ e } t > 0$$

$$-k_1 \left. \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = q_p(t) \quad (3.2)$$

$$T_1(x,0) = T_{0_1}(x), \quad (3.3)$$

onde $q_p(t) = h_c(\theta_{sa} - \theta_s)$ é fluxo de calor na superfície.

E na segunda camada

$$\frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t}, \quad h_1 \leq x \leq h_2 \text{ e } t > 0$$

$$T_2(h_2,t) = T_f = \text{constante} \quad (3.4)$$

$$T_2(x,0) = T_{0_2}(x). \quad (3.5)$$

Na interface, as condições são

$$T_1(h_1,t) = T_2(h_1,t) \quad (3.6)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=h_1} = k_2 \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=h_1}. \quad (3.7)$$

Definindo,

$$\theta_i = T_i - T_f \quad (3.8)$$

a fim de simplificar as condições de contorno, tem-se

$$\frac{\partial^2 \theta_i(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{\partial \theta_i(x,t)}{\partial t} \quad (i = 1, 2), \quad t > 0. \quad (3.9)$$

Assim a condição de contorno e inicial na primeira camada resulta em

$$q_p(t) = -k_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (3.10)$$

$$\theta_1(x,0) = \theta_{0_1}(x), \quad (3.11)$$

na segunda camada em

$$\theta_2(h_2, t) = 0 \quad (3.12)$$

$$\theta_2(x, 0) = \theta_{0_2}(x) \quad (3.13)$$

e na interface

$$\theta_1(h_1, t) = \theta_2(h_1, t) \quad (3.14)$$

$$k_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=h_1} = k_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=h_1} . \quad (3.15)$$

Aplicando a técnica da Transformada de Laplace (\mathcal{L}) nas equações diferenciais parciais (3.9) – (3.15), ou seja, se

$$\bar{\theta}_i(x, s) = \mathcal{L} \{ \theta_i(x, t) \} = \int_0^{\infty} e^{-st} \theta_i(x, t) dt \quad (3.16)$$

então

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}_i(x, s)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i} \int_0^{\infty} e^{-st} \theta_i(x, t) dt . \quad (3.17)$$

Neste caso $\mathcal{L} \{ f'(t) \} = -f(0) + sF(s) = -\theta_{0_i}(x) + s\bar{\theta}_i(x, s)$, tem-se como resultado a equação

$$\frac{d^2 \bar{\theta}_i(x, s)}{dx^2} - \frac{s}{\alpha_i} \bar{\theta}_i(x, s) = -\frac{1}{\alpha_i} \theta_{0_i}(x) . \quad (3.18)$$

A solução da equação diferencial (3.18) pelo método da variação dos parâmetros segundo Boyce e DiPrima (2001) é dada por

$$\bar{\theta}(x, s) = A_i e^{-R_i x} + B_i e^{R_i x} ,$$

que é a solução geral da equação homogênea associada à equação (3.18) onde $R_i = \sqrt{\frac{s}{\alpha_i}}$ para

$i = 1, 2$.

Substituindo o resultado no sistema dado pelo método, tem-se

$$\begin{cases} A_i'(x)e^{-R_i x} + B_i'(x)e^{R_i x} = 0 \\ -A_i'(x)R_i e^{-R_i x} + B_i'(x)R_i e^{R_i x} = -\frac{1}{\alpha_i}\theta_{0_i}(x) \end{cases}$$

e continuando a resolução

$$\Delta = \begin{vmatrix} e^{-R_i x} & e^{R_i x} \\ -R_i e^{-R_i x} & R_i e^{R_i x} \end{vmatrix} = 2R_i$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & e^{R_i x} \\ -\frac{1}{\alpha_i}\theta_{0_i}(x) & R_i e^{R_i x} \end{vmatrix} = \frac{e^{R_i x}}{\alpha_i}\theta_{0_i}(x)$$

$$A_i'(x) = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{e^{R_i x}}{2R_i \alpha_i}\theta_{0_i}(x)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} e^{-R_i x} & 0 \\ -R_i e^{-R_i x} & -\frac{1}{\alpha_i}\theta_{0_i}(x) \end{vmatrix} = -\frac{e^{-R_i x}}{\alpha_i}\theta_{0_i}(x)$$

$$B_i'(x) = \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{e^{-R_i x}}{2R_i \alpha_i}\theta_{0_i}(x)$$

$$A_i(x) = \frac{1}{2R_i \alpha_i} \int_{x_i}^x e^{R_i \xi} \theta_{0_i}(\xi) d\xi + C_0$$

$$B_i(x) = -\frac{1}{2R_i \alpha_i} \int_{x_i}^x e^{-R_i \xi} \theta_{0_i}(\xi) d\xi + C_1$$

O próximo passo é substituir $A_i(x)$ e $B_i(x)$ na solução geral. E finalmente a solução da equação pode ser escrita como

$$\bar{\theta}_i(x, s) = A_i e^{-R_i x} + B_i e^{R_i x} + \frac{e^{-R_i x}}{2R_i \alpha_i} \int_{x_i}^x e^{R_i \xi} \theta_{0_i}(\xi) d\xi - \frac{e^{R_i x}}{2R_i \alpha_i} \int_{x_i}^x e^{-R_i \xi} \theta_{0_i}(\xi) d\xi, \quad (3.19)$$

onde $e^{-R_i x}$ e $e^{R_i x}$ são funções linearmente independentes e $R_i = \sqrt{\frac{s}{\alpha_i}}$. Ou ainda, pode-se escrever a solução como

$$\bar{\theta}_i(x, s) = A_i e^{-R_i x} + B_i e^{R_i x} + I_i(x), \quad (3.20)$$

onde

$$I_i(x) = \frac{1}{2R_i \alpha_i} \left[e^{-R_i x} \int_{x_i}^x e^{R_i \xi} \theta_{0_i}(\xi) d\xi - e^{R_i x} \int_{x_i}^x e^{-R_i \xi} \theta_{0_i}(\xi) d\xi \right].$$

Quando $i = 1$ referente à primeira camada, $x_1 = 0$ e $x = h_1$. E na segunda camada quando $i = 2$, $x_2 = h_1$ e

$$\bar{\theta}_2(x, s) = 0, \quad x = h_2 \quad (3.23)$$

onde

h_c = coeficiente de troca de calor por convecção na superfície;

θ_{sa} = função da temperatura do ar mais insolação;

θ_s = diferença entre a temperatura da superfície e T_f .

E de interface

$$\bar{\theta}_1(x, s) = \bar{\theta}_2(x, s), \quad x = h_1 \quad (3.24)$$

$$k_1 \frac{\partial \bar{\theta}_1(x, s)}{\partial x} = k_2 \frac{\partial \bar{\theta}_2(x, s)}{\partial x}, \quad x = h_1 \quad (3.25)$$

Os coeficientes A_i e B_i para $i = 1, 2$ presentes na solução são determinados usando as condições de contorno e de interface (3.22) – (3.25). A derivada da equação (3.20) é dada por

$$\bar{\theta}'_i(x, s) = -R_i A_i e^{-R_i x} + R_i B_i e^{R_i x} + I'_i(x). \quad (3.26)$$

Desta forma, substituindo a solução (3.20) e sua derivada (3.26), na condição (3.22), tem-se

$$-K_1 \left(-R_1 A_1 e^{-R_1 x} + R_1 B_1 e^{R_1 x} + I'_1(x) \right) + h_c \left(-A_1 e^{-R_1 x} + B_1 e^{R_1 x} + I_1(x) \right) = h_c \bar{\theta}_{sa}$$

sabendo que em (3.22), $x = 0$, segue que

$$-K_1 \left(-R_1 A_1 + R_1 B_1 + I'_1(0) \right) + h_c \left(-A_1 + B_1 + I_1(0) \right) = h_c \bar{\theta}_{sa},$$

mas pela equação (3.21), $I_1(0) = 0$ e $I'_1(0) = 0$, então

$$A_1 (K_1 R_1 + h_c) + B_1 (-K_1 R_1 + h_c) = h_c \bar{\theta}_{sa}. \quad (3.27)$$

Da mesma forma, a equação (3.20) é substituída na condição (3.23), resultando

$$A_2 e^{-R_2 x} + B_2 e^{R_2 x} + I_2(x) = 0.$$

Aqui $x = h_2$, portanto

$$A_2 e^{-R_2 h_2} + B_2 e^{R_2 h_2} = -I_2(h_2). \quad (3.28)$$

Para a condição de interface (3.24), tem-se

$$A_1 e^{-R_1 x} + B_1 e^{R_1 x} + I_1(x) = A_2 e^{-R_2 x} + B_2 e^{R_2 x} + I_2(x),$$

nesta condição $x = h_1$. Sabendo que pela equação (3.21), $I_2(h_1) = 0$, então

$$A_1 e^{-R_1 h_1} + B_1 e^{R_1 h_1} - A_2 e^{-R_2 h_1} - B_2 e^{R_2 h_1} = I_1(h_1). \quad (3.29)$$

E finalmente para a condição de interface (3.25),

$$K_1 (-R_1 A_1 e^{-R_1 x} + R_1 B_1 e^{R_1 x} + I_1'(x)) = K_2 (-R_2 A_2 e^{-R_2 x} + R_2 B_2 e^{R_2 x} + I_2'(x))$$

sabe-se que $x = h_1$ e $I_2'(h_1) = 0$, então

$$-A_1 (K_1 R_1 e^{-R_1 h_1}) + B_1 (K_1 R_1 e^{R_1 h_1}) + A_2 (K_2 R_2 e^{-R_2 h_1}) + B_2 (K_2 R_2 e^{R_2 h_1}) = -K_1 I_1'(h_1). \quad (3.30)$$

As equações (3.27) – (3.30), obtidas com a aplicação da solução (3.20) e sua derivada (3.26) formam um sistema linear 4×4 representado na forma matricial

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

Neste caso os elementos da matriz são dados por

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= k_1 R_1 + h_c & a_{31} &= -k_1 R_1 e^{-R_1 h_1} \\
 a_{12} &= -k_1 R_1 + h_c & a_{32} &= k_1 R_1 e^{R_1 h_1} \\
 a_{21} &= e^{-R_1 h_1} & a_{33} &= k_2 R_2 e^{-R_2 h_1} \\
 a_{22} &= e^{R_1 h_1} & a_{34} &= -k_2 R_2 e^{R_2 h_1} \\
 a_{23} &= -e^{-R_2 h_1} & a_{43} &= e^{-R_2 h_2} \\
 a_{24} &= -e^{R_2 h_1} & a_{44} &= e^{R_2 h_2}
 \end{aligned}$$

e os termos independentes por

$$\begin{aligned}
 C_1 &= h_c \bar{\theta}_{sa} \\
 C_2 &= I_1(h_1) = \frac{1}{R_1 \alpha_1} \int_0^{h_1} \theta_{0_1}(\xi) \sinh(R_1(\xi - h_1)) d\xi \\
 C_3 &= -K_1 I_1'(h_1) = -\left(-\frac{k_1}{\alpha_1} \int_0^{h_1} \theta_{0_1}(\xi) \cosh(R_1(\xi - h_1)) d\xi \right) = \frac{k_1}{\alpha_1} \int_0^{h_1} \theta_{0_1}(\xi) \cosh(R_1(\xi - h_1)) d\xi \\
 C_4 &= -I_2(h_2) = \frac{1}{R_2 \alpha_2} \int_{h_1}^{h_2} \theta_{0_2}(\xi) \sinh(R_2(\xi - h_2)) d\xi,
 \end{aligned}$$

onde I_i' denota a derivada da função $I_i(x)$;

O sistema (3.31) é resolvido e os valores dos coeficientes são dados por

$$\begin{aligned}
 A_1 &= -\frac{C_4 d k_2 R_2 + \cosh(R_2 b) k_2 R_2 (C_2 d - C_1 e^{R_1 h_1}) + \sinh(R_2 b) (C_3 d - C_1 k_1 R_1 e^{R_1 h_1})}{2 \left\{ \sinh(R_2 b) (k_1 R_1)^2 + \cosh(R_2 b) h_c k_2 R_2 \right\} \sinh(R_1 h_1) + \left[\sinh(R_2 b) h_c k_1 R_1 + \cosh(R_2 b) k_1 R_1 k_2 R_2 \right] \cosh(R_1 h_1)} \\
 A_2 &= -\frac{e^{R_2 h_2} \left[-C_1 k_1 R_1 + k_1 R_1 (C_2 h_c - C_3) \cosh(R_1 h_1) + (C_2 (k_1 R_1)^2 - C_3 h_c) \sinh(R_1 h_1) \right] + C_4 e^{R_2 h_1} \left[k_1 R_1 (h_c - k_2 R_2) \cosh(R_1 h_1) + ((k_1 R_1)^2 - k_2 R_2 h_c) \sinh(R_1 h_1) \right]}{2 \left\{ \sinh(R_2 b) (k_1 R_1)^2 + \cosh(R_2 b) h_c k_2 R_2 \right\} \sinh(R_1 h_1) + \left[\sinh(R_2 b) h_c k_1 R_1 + \cosh(R_2 b) k_1 R_1 k_2 R_2 \right] \cosh(R_1 h_1)}
 \end{aligned}$$

$$B_2 = e^{-R_2 h_2} [C_4 - e^{-R_2 h_2} A_2]$$

$$B_1 = \frac{1}{l} [C_1 - d A_1]$$

e

$$\bar{\theta}_2(x, s) = F_{21}(x, s) + \bar{\theta}_{sa} \cdot \bar{g}_2(x, s), \quad (3.40)$$

onde

$$F_{11}(x, s) = A_{11} e^{-R_1 x} - \frac{l}{d} A_{11} e^{R_1 x} + I_1(x) \quad (3.41)$$

$$\bar{g}_1(x, s) = h_c \left(e^{R_1 x} \frac{(1 + l A_{12})}{d} - A_{12} e^{-R_1 x} \right) \quad (3.42)$$

$$F_{21}(x, s) = A_{21} e^{-R_2 x} + C_4 e^{-R_2(h_2 - x)} - A_{21} e^{-R_2(2h_2 - x)} + I_2(x) \quad (3.43)$$

$$\bar{g}_2(x, s) = h_c (A_{22} e^{-R_2(2h_2 - x)} - A_{22} e^{-R_2 x}). \quad (3.44)$$

3.1.2 Formulação numérica para a transformação de Laplace inversa.

A idéia geral de aplicar a transformada de Laplace para resolver uma equação diferencial é usar a relação da integral e transformar o problema de uma função desconhecida f em um problema mais simples F , e então resolver este problema encontrando F e, finalmente recuperar a função desejada f através da transformação inversa. Essa última etapa é conhecida como “inverter a transformada”.

Neste trabalho o retorno da solução $\bar{\theta}_i(x, s)$, para o domínio tempo é feito pelo cálculo da integral de inversão

$$\theta_i(x, t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma - j\infty}^{\gamma + j\infty} e^{st} \bar{\theta}_i(x, s) ds. \quad (3.45)$$

Logo,

$$\theta_1(x, t) = \frac{1}{2\pi j} \left[\int_{\gamma - j\infty}^{\gamma + j\infty} e^{st} F_{11}(x, s) ds + \int_{\gamma - j\infty}^{\gamma + j\infty} e^{st} \bar{\theta}_{sa}(t) \bar{g}_1(x, s) ds \right]$$

e

$$\theta_2(x, t) = \frac{1}{2\pi j} \left[\int_{\gamma - j\infty}^{\gamma + j\infty} e^{st} F_{21}(x, s) ds + \int_{\gamma - j\infty}^{\gamma + j\infty} e^{st} \bar{\theta}_{sa}(t) \bar{g}_2(x, s) ds \right]$$

Para obter as soluções analíticas de transformação inversa de Laplace, pode-se aplicar a técnica de integral de Bromwich (em Spiegel, 1971), conhecida com a fórmula complexa de inversão ao caso F simples. Para este caso, as transformadas são complicadas, devido a isso precisa-se aplicar métodos numéricos.

Segundo Heydarian (1981), fazendo a mudança de variável $s = \frac{p}{t}$ tem-se

$$\frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma-j\infty}^{\gamma+j\infty} e^{st} F_{11}(x, s) ds = \frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma-j\infty}^{\gamma+j\infty} e^p F_{11}(x, p/t) \frac{dp}{t}. \quad (3.46)$$

A técnica adequada para aproximar a integral de inversão é através da fórmula da Quadratura Gaussiana

$$\frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma-j\infty}^{\gamma+j\infty} e^p \frac{F(p)}{p} dp = \sum_{i=1}^n D_i F(p_i), \quad j = \sqrt{-1}, \quad (3.47)$$

onde p_i são as raízes do polinômio

$$(-1)^n \sum_{r=0}^n a(n, r) p^{n-r} = 0, \quad (3.48)$$

sendo

$$a(n, r) = \frac{(-1)^{n-r} n \{(n+r-1)!\}}{r!(n-r)!}. \quad (3.49)$$

Os, valores de D_i da equação (3.47) são as soluções de

$$\sum_{i=1}^n D_i p_i^{-r} = \frac{1}{r!} \quad 0 \leq r \leq (n-1). \quad (3.50)$$

Os valores D_i e p_i , já foram calculados por Heydarian e podem ser observados na tabela 1, onde $j = \sqrt{-1}$

Tabela 1

Coeficientes	Valores
$D_1 = \bar{D}_2$	$-39.795288 + 1338.783902j$
$D_3 = \bar{D}_4$	$70.020480 - 641.933247j$
$D_5 = \bar{D}_6$	$-34.242643 + 127.808748j$
$D_7 = \bar{D}_8$	$4.517451 - 6.142475j$
$p_1 = \bar{p}_2$	$10.169446 - 1.649202j$
$p_3 = \bar{p}_4$	$9.406371 + 4.969217j$
$p_5 = \bar{p}_6$	$7.738688 + 8.370879j$
$p_7 = \bar{p}_8$	$4.685495 + 12.010579j$

Fonte: Heydarian (1981)

A função $F(p)$ é relacionada com a função a ser invertida, $\bar{\theta}_i(x, p/t)$, isto é

$$F(p) = \frac{p}{t} \bar{\theta}_i(x, p/t). \quad (3.51)$$

Sendo assim,

$$F_{11}(p) = \frac{p}{t} F_{11}(x, p/t)$$

$$\bar{g}_1(p) = \frac{p}{t} \bar{g}_1(x, p/t)$$

$$F_{21}(p) = \frac{p}{t} F_{21}(x, p/t)$$

$$\bar{g}_2(p) = \frac{p}{t} \bar{g}_2(x, p/t).$$

3.1.3 A Temperatura de sol - ar

A função θ_{sa} está relacionada com a temperatura do ar e insolação (temperatura solar), e será ajustada por uma função polinomial posteriormente. A definição é dada como

$$\theta_{sa}(t_i) = \theta_{ar}(t_i) + \frac{(I_t(t_i) - E \cdot \delta R)}{hc}, \quad (3.52)$$

onde $\theta_{ar}(t_i)$ é a diferença entre a temperatura do ar e a do fundo do pavimento, dada por

$$\theta_{ar}(t_i) = T_{\infty}(t_i) - T_f \quad (3.53)$$

e,

$T_{\infty}(t_i)$ = temperatura do ar;

T_f = temperatura do fundo do pavimento onde $x = h_2$ (limite da segunda camada do pavimento), que será considerada constante por apresentar pouca variação ao longo do dia;

E = emitância hemisférica da superfície em onda longa;

δR = diferença entre a radiação de onda longa incidente na superfície do céu e entorno e a radiação emitida por um corpo negro na temperatura do ar externo.

Sabendo que a radiação total incidente numa superfície horizontal é dada por

$$I_t = I_b + I_d + I_r, \quad (3.54)$$

onde

I_r = radiação refletida;

I_b = radiação direta;

I_d = radiação difusa.

A radiação refletida em superfícies horizontais é igual a zero, ou seja,

$$I_r = 0.$$

A radiação direta incidente na superfície do pavimento é dada por

$$I_b = G_n \cos(z) \cdot \alpha_{sol} \quad (3.55)$$

onde

α_{sol} = absorptância da superfície para a radiação solar;

G_n = radiação normal.

Wolfe et al (1995), afirma que nem toda radiação penetra ou é absorvida pela superfície, parte da energia é refletida. O fator de absorção é usado para caracterizar a energia absorvida.

A radiação difusa para um dia ensolarado equivale à

$$I_d = 0,1I_b.$$

A radiação normal é dada pela equação a seguir

$$G_n = G_o \tau_a^{\sec(z)}, \quad (3.56)$$

onde

$$G_o = 442 \text{ Btu} / \text{hr pé}^2 = \text{constante solar.}$$

Segundo Couto (1995), a Organização Meteorológica Mundial estimou para este coeficiente de constante solar, uma média obtida com base em oito valores usados mundialmente, então

$$G_o = 1367 \text{ w} / \text{m}^2.$$

Os outros parâmetros são:

$\tau_a \approx 0,7$ = média do coeficiente de transmissão para massa de ar unitária;

ϕ = latitude local;

$\delta_s = 23,45 \text{ sen} \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right]$, declinação solar em grau;

d_n = corresponde ao dia do ano no calendário Juliano.

O ângulo de zênite é dado por:

$$z = \text{sen} \phi \text{ sen} \delta_s + \text{cos} \phi \text{ cos} \delta_s \text{ cos} w,$$

onde w é ângulo horário.

Para uma superfície comum adota-se $E = 1$ e $\delta R = 63 w / m^2$ segundo Aseka (2003). E o número de horas de sol do dia d_n é

$$N_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta_s). \quad (3.57)$$

Para o horário anterior ao nascimento do Sol, $w < 12 - \frac{N_d}{2}$ e após o pôr do Sol $w < 12 + \frac{N_d}{2}$, nestes casos $I_t = 0$.

3.2 METODOLOGIA PARA PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL

A solução final da equação de transferência de calor é através de programação em Matlab.

A simulação computacional resulta em gráficos de temperaturas aproximadas para diferentes profundidades ao longo do dia, nos dois tipos de pavimento (rígido e flexível). Para tanto, o dia é dividido em quatro períodos. Segundo Aseka (2003), dividir o dia em períodos menores facilita a aproximação da função com os dados reais de temperatura, pois esta função

deve desviar-se o mínimo possível dos valores originais da temperatura sol - ar que por natureza são relativamente mal comportados.

O início e término de cada período são caracterizados pela variação da temperatura ao longo do dia. Assim o primeiro período corresponde às primeiras horas do dia onde ainda não há influência da temperatura solar sobre a terra, pode-se dizer que corresponde ao tempo anterior e até pouco tempo depois ao nascimento do sol, neste período a temperatura também tem menor variação. O segundo e terceiro períodos correspondem às horas do dia de maior variação climática em consequência do maior efeito solar sobre a terra. O quarto período inicia quando o sol começa a se pôr, ele corresponde ao final do dia onde as temperaturas tendem a diminuir, pois a terra devolve calor à atmosfera.

A divisão do dia em períodos pode ser visualizada através da tabela 2:

Tabela 2

Divisão do dia em períodos

Período	Início	Término	Incremento (passo)
Primeiro	30 min = 0,5 h = 0:30 h	390 min = 6:30 h	60 min
Segundo	390 min = 6:30 h	750 min = 12:30 h	20 min
Terceiro	750 min = 12:30 h	1130 min = 18:30 h	20 min
Quarto	1130 min = 18:30 h	1430 min = 23:30 h	60 min

Os dados de entrada utilizados no programa foram coletados através de medições da temperatura do solo nas profundidades de 0,01 m, 0,5 m, e 1m, no dia 13/03/2000 no município de Panambi – RS. Neste dia foi registrada a máxima temperatura do ar do ano 39,7°C. Não há registros de precipitações neste dia e também nos oito dias que o antecedem e o sucedem. Isto significa um período de temperaturas relativamente estável.

O programa computacional desenvolvido em Matlab calcula a temperatura correspondente às profundidades desejadas no pavimento ao longo do dia. Para tanto, o primeiro período correspondente ao tempo de 6 horas é calculado a partir de 0:30 h do dia com passo de uma hora, pois neste período a variação climática é baixa, não necessitando de passos menores para a realização dos cálculos. O término do primeiro período dá-se às 6:30 h da manhã, neste instante o sol começa a nascer. Neste período a função da temperatura sol - ar é aproximada por um polinômio de terceiro grau.

O segundo período que inicia às 6:30 h da manhã e termina às 12:30 h é marcado por grandes variações climáticas necessitando de passo menor para melhor aproximação dos dados reais com os simulados, portanto as temperaturas são calculadas a cada 20 min. Assim,

detem - se a função mais próxima possível da temperatura real. Um polinômio de quarto grau é escolhido para aproximar a função da temperatura sol - ar.

Seguindo a mesma idéia do segundo, o terceiro período é calculado com passo de 20 min até às 18:30 h, pouco antes do sol se pôr. Neste período a temperatura atmosférica atinge o grau máximo no dia, aproximadamente às 13:35 h. O polinômio para aproximar a função da temperatura sol - ar é de mesmo grau que o usado no segundo período (quarto grau).

O término do quarto período dá-se às 23:30 h, com base nos dados de temperatura de entrada. Deste instante até a meia noite a variação climática é quase zero. O polinômio para a função da temperatura sol - ar é o de mesmo grau que o usado no primeiro período (terceiro grau).

No programa computacional cada período é resolvido seqüencialmente, onde a temperatura final do período anterior é usada como condição inicial para a temperatura do período seguinte. O processo se repete por vários dias até que os resultados de cada período sejam estáveis em dois dias consecutivos. A divisão do dia em períodos (relacionados à maior e menor variação térmica) é importante para definir passos menores de integração facilitando a aproximação da função da temperatura sol - ar com os dados medidos.

3.3 PARÂMETROS UTILIZADOS

Este estudo foi realizado com base no perfil de construção de dois tipos de pavimentos existentes no Laboratório da Engenharia Civil da Unijuí. Em ambas as placas foram consideradas duas camadas a serem analisadas (base e revestimento).

No asfalto e concreto a absorvância da superfície para a radiação solar tem respectivamente os seguintes valores, segundo ABNT (2004):

$$\alpha_{sol} = 0,93$$

$$\alpha_{sol} = 0,74$$

O coeficiente de convecção do ar é um parâmetro difícil de ser determinado. Neste trabalho adota-se o valor sugerido por Medina e Motta (2005):

$$h_c = 22,8 J / m^2 \text{ min } k$$

A camada de revestimento do pavimento flexível tem 15 cm de espessura enquanto que no pavimento rígido tem 25 cm, para ambos os revestimentos foram considerados dados com base em Medina e Motta (2005). A camada de base no pavimento flexível tem 40 cm de espessura e no pavimento rígido 30 cm, os dados referentes às propriedades térmicas desta camada foram obtidos com base em ABNT (2004). Estes dados podem ser visualizados na tabela 3.

Tabela 3

Dados referentes às camadas de base, revestimento betuminoso e revestimento de cimento Portland

	Camada de base	Camada de revestimento betuminoso	Camada de revestimento de cimento Portland
Condutividade térmica	$k_2 = 41,7 J / m \min k$	$k_1 = 1,212 J / m s^\circ C$	$k_1 = 0,81 J / m s^\circ C$
Calor específico	$C_p = 800 J / kg^\circ C$		

4 ANÁLISE E RESULTADOS NUMÉRICOS

4.1 DADOS MEDIDOS DAS TEMPERATURAS DO AR E DO SOLO

A Figura 11, ilustra a temperatura do ar e a temperatura do solo nas profundidades 0,01 m, 0,5 m, e 1 m, usadas como dados de entrada para realizar as simulações de temperatura nos pavimentos. As medições destas temperaturas foram realizadas no dia 07/01/2000, na cidade de Panambi – RS, lembrando que os dados têm seu início de coleta às 0:24 h do dia e término às 23:43 h (horário de verão).

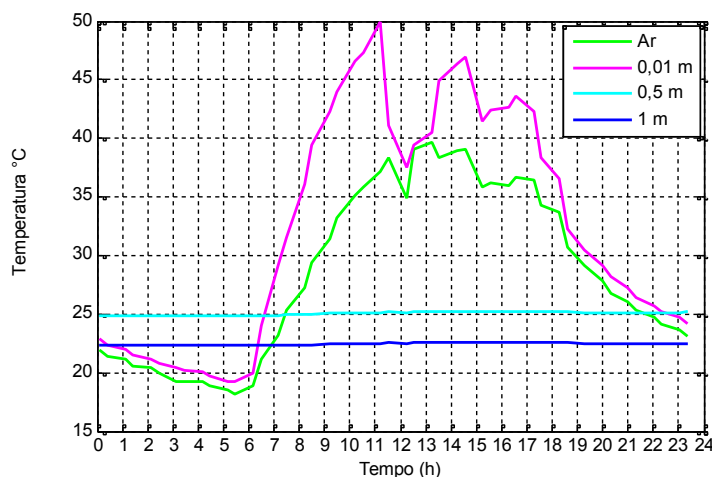
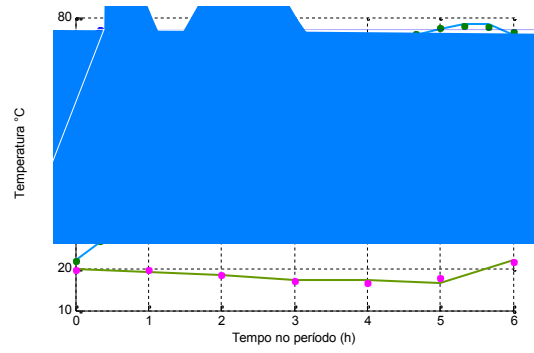
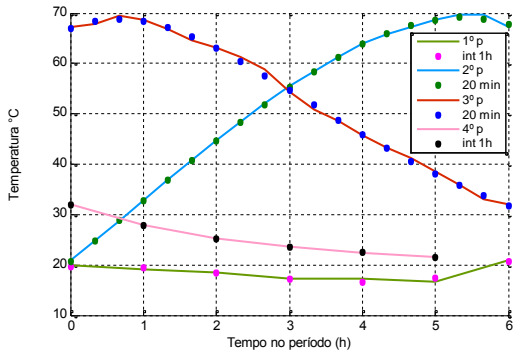


Figura 11: Temperaturas referentes ao dia 07/01/2000.

4.2 TEMPERATURA DE SOL - AR

A Figura 12 mostra a temperatura de sol - ar (segundo as equações 3.53 e 3.54 mais a temperatura T_f). Cada curva corresponde a um período. A linha contínua é obtida pela interpolação dos dados medidos do ar e os pontos são calculados através do polinômio de aproximação da curva. Pelas curvas pode-se concluir que os polinômios escolhidos têm boas aproximações aos dados medidos.



A diferença média relativa das temperaturas entre o 5º e 6º dias é menor que 1%. Assim pode-se considerar que depois de um ciclo de quatro dias, o resultado é praticamente estável. No caso do pavimento flexível, a situação é a mesma. As figuras a seguir mostram resultados referentes ao 6º dia.

4.4 TEMPERATURA NOS PAVIMENTOS

As Figuras 13 e 14 mostram o comportamento da temperatura a diferentes profundidades ao longo do dia para cada um dos pavimentos. A temperatura na superfície do pavimento corresponde à 0 m de profundidade.

No pavimento flexível, as diferentes profundidades da camada de revestimento foram calculadas com passo de 0,015 m a partir da superfície e na camada de base com passo de 0,05 m a partir do limite da camada de revestimento 0,15 m.

No pavimento rígido o passo para o cálculo das profundidades da camada de revestimento é 0,025m a partir da superfície 0 m, e para a camada de base 0,05 a partir de 0,25 m que é a profundidade limite da primeira camada.

Pelas Figuras 13 e 14, é evidente que a variação da temperatura depende da profundidade: menor profundidade - maior variação. Pergunta-se qual as profundidades onde há temperatura mínima e máxima respectivamente, se elas são atingidas em momentos diferentes: menor profundidade sofre influência externa primeiro. Na superfície a mínima temperatura ocorre em torno das 5:30 h e a máxima às 13:30 h.

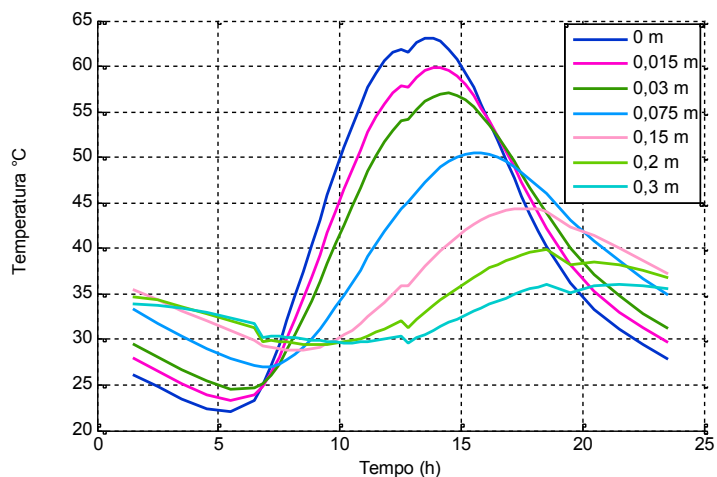


Figura 13: Temperatura a diferentes profundidades no pavimento flexível.

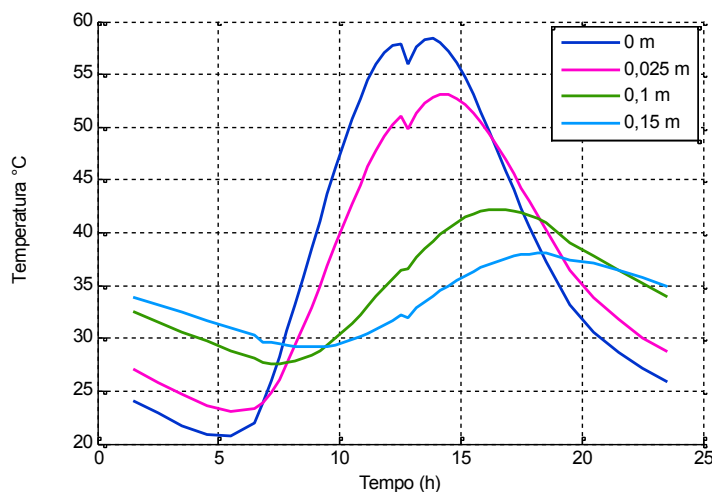


Figura 14: Temperatura a diferentes profundidades na primeira camada do pavimento rígido.

No início do dia a temperatura na superfície de ambos os pavimentos é menor em relação às demais profundidades, e vai aumentando conforme insolação a ponto de ser bem maior em comparação com as profundidades atingindo seu grau máximo entre o segundo e terceiro períodos do dia, horário normalmente mais quente. Quando os raios solares diminuem, a temperatura na superfície que está diretamente em contato com o ar também diminui enquanto o interior do pavimento retém calor.

A Figura 15 mostra a diferença da variação climática ao final dos quatro períodos do dia em todas as profundidades do pavimento rígido nos ciclos de programação de 1, 3, 5 e 6 dias respectivamente, onde a temperatura final de cada período é condição inicial para o período seguinte.

Observando o comportamento da temperatura da superfície em relação às demais profundidades no primeiro período, conclui-se que ao nascer do sol o gradiente térmico no pavimento é positivo na primeira camada e negativo em parte da segunda camada. Isto indica que o fluxo de calor vem do interior da primeira camada para o ar ambiente. Este fenômeno ocorre nos finais dos 3º e 4º períodos também.

No final do segundo período o gradiente térmico é negativo. Pode-se observar claramente que o fluxo de calor é da superfície para o interior da placa pois, quanto maior a profundidade menor a temperatura.

Pela Figura 15, pode ser observado que as temperaturas se estabilizam no 6º dia. Pela figura 15 (d), percebe-se que ao final da primeira camada 25 cm de profundidade no pavimento rígido já não há mais significativa variação da temperatura.

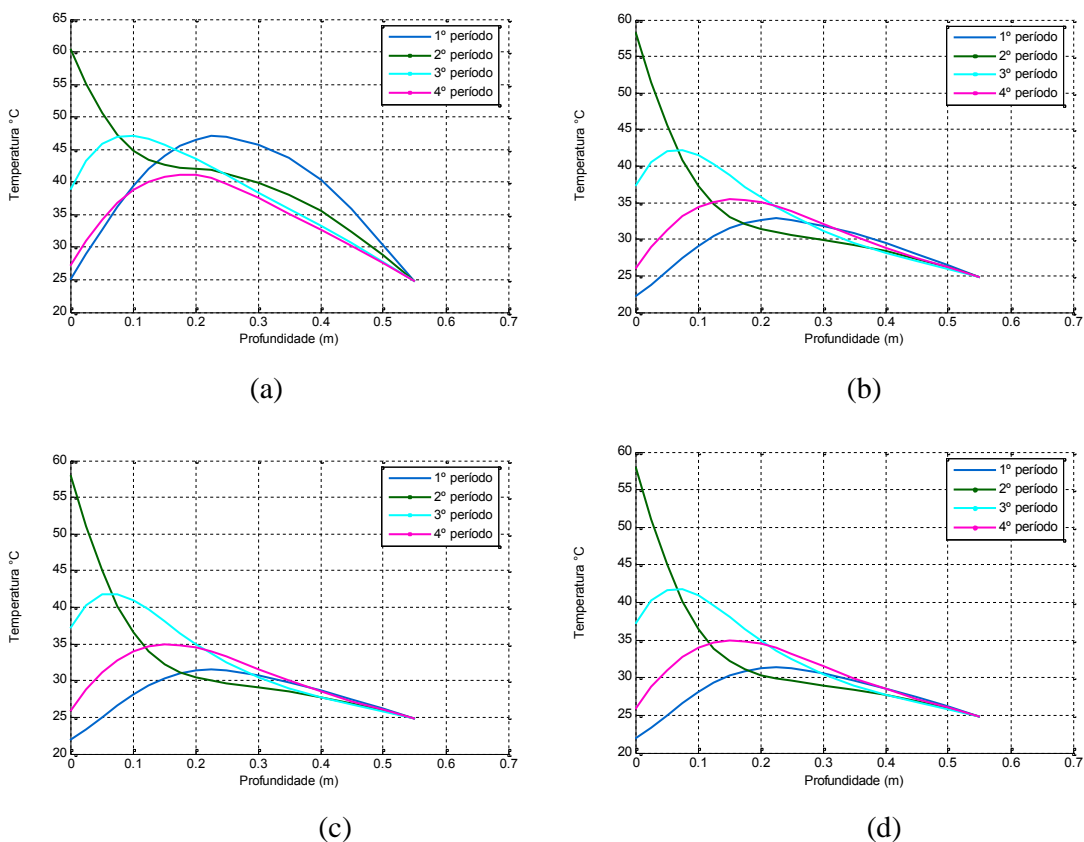
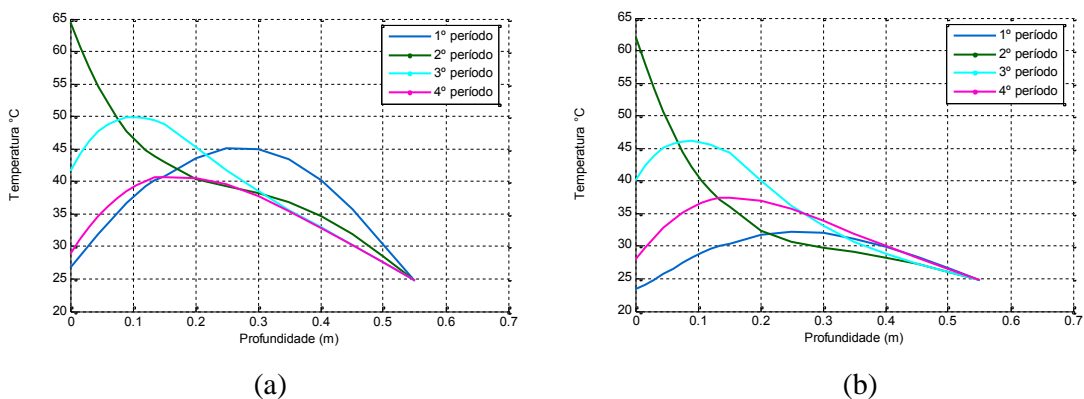
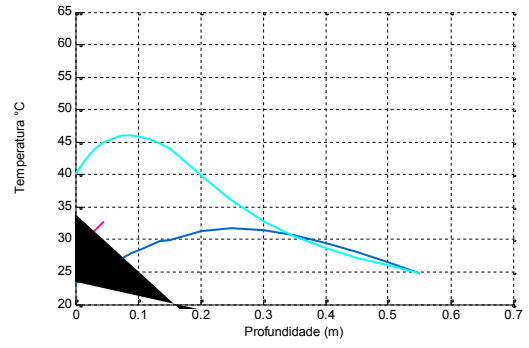
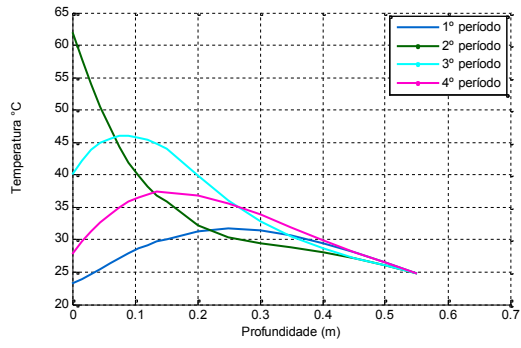


Figura 15: Variação da temperatura com as profundidades no pavimento rígido ao final dos quatro períodos (a) 1º dia, (b) 3º dia, (c) 5º dia e (d) 6º dia.

Uma análise semelhante é feita na Tabela 5 e na Figura 16 para o pavimento flexível. O comportamento da variação climática nos pavimentos rígidos e flexíveis é semelhante, o que difere é a temperatura na superfície do pavimento flexível ser bem maior em relação à do pavimento rígido, também é grande a variação da temperatura na segunda camada do pavimento flexível enquanto que no rígido ao final da primeira camada já não há mais significativa variação da temperatura.





Nas Figuras 17, 18 e 19 é feita uma comparação entre valores das propriedades térmicas dos materiais para ambos os pavimentos na superfície.

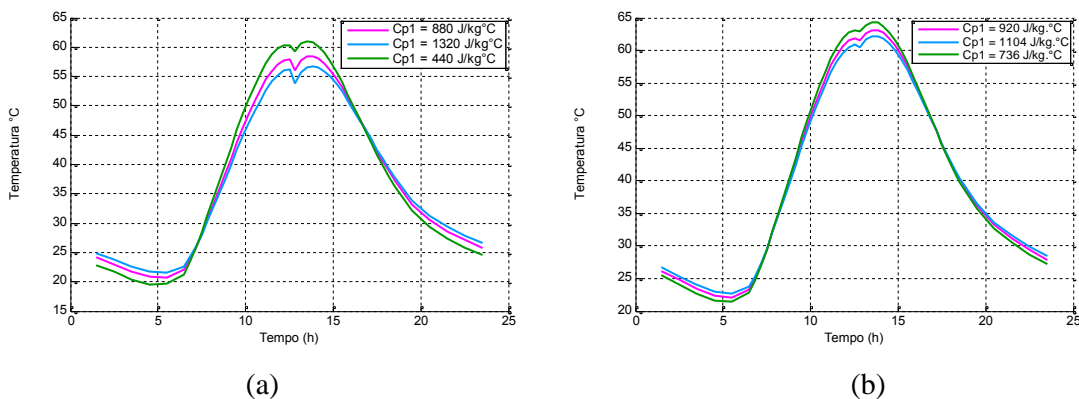


Figura 17: Comparação entre a temperatura na superfície do pavimento aumentando o calor específico do material em $\pm 20\%$ (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível.

Considerando-se a temperatura máxima com $C_{p1} = 880 \text{ J/kg}\cdot\text{°C}$ como base de cálculo, a variação da temperatura máxima para o pavimento rígido é de $56,5^\circ \text{C}$ à $60,5^\circ \text{C}$ se C_{p1} varia a 40%, de $C_{p1} = 704 \text{ J/kg}\cdot\text{°C}$ para $C_{p1} = 1056 \text{ J/kg}\cdot\text{°C}$, então, a variação da temperatura relativa é $(60,5 - 56,5)/58,4 = 6,8\%$. E para o pavimento flexível, a variação é $(64,5 - 62)/63,1 = 4\%$ apenas. Isto indica que a variação do calor específico não influencia muito na temperatura máxima.

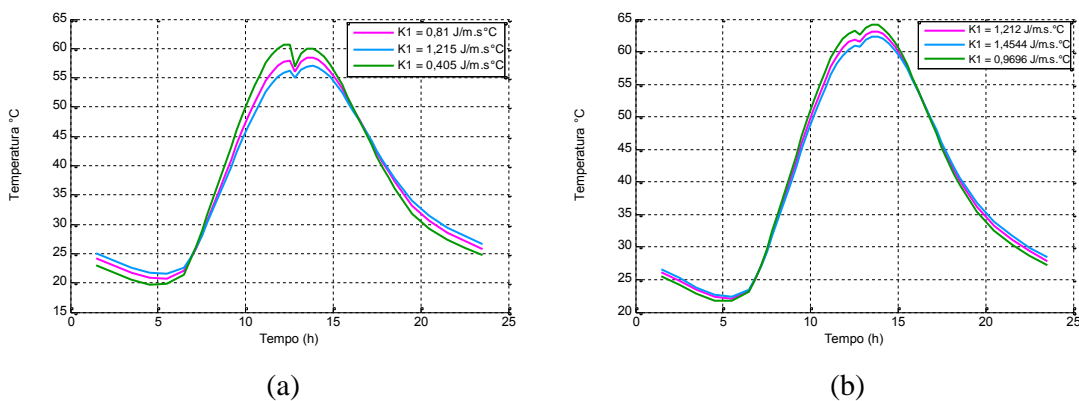
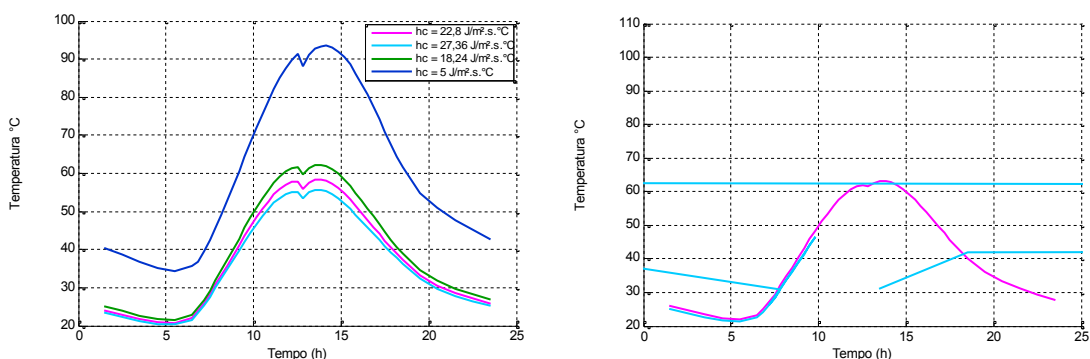


Figura 18: Comparação entre a temperatura na superfície do pavimento variando a condutividade térmica do material em $\pm 20\%$ (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível.

Considerando a temperatura máxima com $K_1 = 0,81 J/m \cdot s \cdot ^\circ C$ como base de cálculo, a variação da temperatura máxima para o pavimento rígido é de $57^\circ C$ à $60,5^\circ C$ se K_1 varia a 40%, de $K_1 = 0,648 J/m \cdot s \cdot ^\circ C$ para $K_1 = 0,972 J/m \cdot s \cdot ^\circ C$, então, a variação da temperatura relativa é $(60,5 - 57)/58,4 = 6,0\%$. E para o pavimento flexível, a variação é $(64,5 - 62,5)/63,1 = 3,2\%$ apenas. Isto também indica que a variação da condutividade térmica não influencia muito na temperatura máxima.

A Figura 19 mostra a temperatura máxima da superfície, variando o coeficiente de convecção do ar h_c . Na realidade, $h_c = 22,8 J/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ corresponde à velocidade média do vento de 11,6 km/h segundo Medina e Motta (2005) e $h_c = 5 J/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ à quase ausência de vento. Considerando a temperatura máxima com $h_c = 22,8 J/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ como base de cálculo, a variação da temperatura máxima para o pavimento rígido é de $56^\circ C$ à $62^\circ C$ se h_c varia a 40%, de $18,24 J/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ para $27,36 J/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$, então, a variação da temperatura relativa é $(62 - 56)/58,4 = 10,3\%$. E para o pavimento flexível, a variação é $(68 - 60)/63,1 = 12,7\%$.

Pela comparação dos resultados, pode-se concluir que a influência do coeficiente de convecção do ar é bem maior do que o calor específico e a condutividade térmica e que a influência do calor específico é quase a mesma da condutividade térmica.



As formas de variação da temperatura com o tempo para os dois tipos de pavimento são muito parecidas. Claramente a temperatura máxima no pavimento flexível é mais alta que no pavimento rígido. Esta diferença de temperatura está relacionada às diferentes frações de absorção do calor dos revestimentos α_{sol} . Para o pavimento flexível $\alpha_{sol} = 0,93$ e para o pavimento rígido $\alpha_{sol} = 0,74$, a diferença é de 25,6%. Pelas figuras a máxima temperatura de sol - ar do pavimento flexível é 79°C sendo 12,9% mais alta que do pavimento rígido.

A temperatura máxima é 58,4° C no pavimento rígido e 63,1° C no pavimento flexível. A diferença da temperatura máxima entre o pavimento rígido e o flexível é $(63,1 - 58,4)/58,4 = 8\%$, que é menor do que a diferença entre os pavimentos em sol - ar (12,9%), sendo ainda menor que a diferença relativa à condutividade (Tabela 3): $(1,212 - 0,81)/0,81 = 49,6\%$ e à difusividade: $(5,88 - 4)/4 = 47\%$. Isto evidencia que a temperatura de sol - ar tem mais influência à temperatura máxima no pavimento do que a condutividade e difusividade térmica do material.

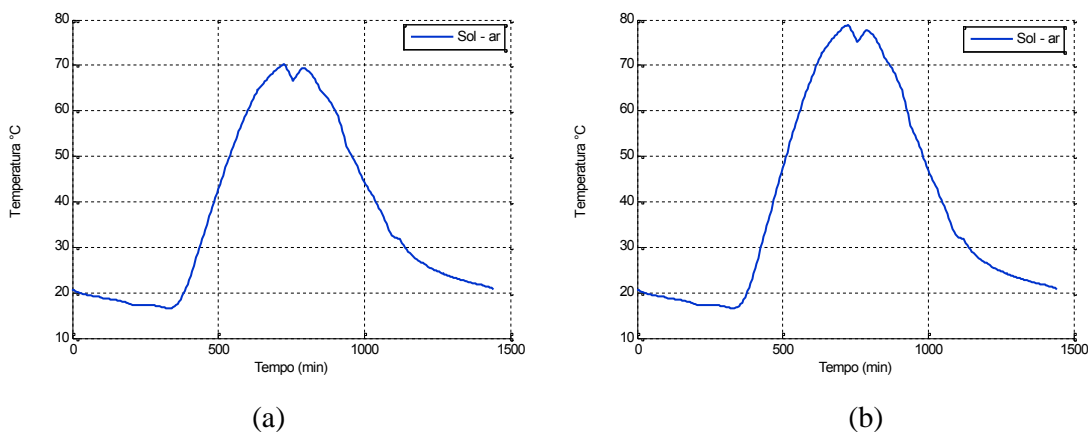


Figura 20: Temperatura de Sol-ar (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível.

Pela Figura 15 (d), obtém-se o gradiente máximo da temperatura no pavimento rígido às 13:30 h que é $(58,4^{\circ}\text{C} - 52,24^{\circ}\text{C})/0,025\text{m} = 246,4^{\circ}\text{C}/\text{m}$ na superfície. Isto, segundo a equação (3.2), gera um fluxo de calor em torno de $200\text{ J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$. O mesmo é analisado na Figura 16 (d) para o pavimento flexível, onde o gradiente máximo da temperatura ocorre às 13:30 h e é $(63,14^{\circ}\text{C} - 59,55^{\circ}\text{C})/0,015\text{m} = 239,3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ na superfície, sendo bem menor em relação ao do pavimento rígido. Este gradiente resulta num fluxo de calor em torno de $290\text{ J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

4.7 AVALIAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS OFERECIDOS PELA LITERATURA

No capítulo 1 alguns modelos matemáticos para calcular a temperatura no pavimento flexível são mencionados.

Para analisar a equação (1.3) precisa-se da média das máximas temperaturas dos sete dias mais quentes do ano.

A Tabela 6 mostra o registro das sete temperaturas mais altas do ano 2000.

Tabela 6

As sete temperaturas mais altas do ano 2000.

	05/01	06/01	07/01	09/01	20/01	21/01	27/02	média
Temperatura °C	36,7	38,5	39,7	37,6	35,4	35,3	36,4	37,1

Analisando a equação (1.3) com $Lat = 28,17^\circ$ e a média $T_{ar} = 37,1^\circ\text{C}$, tem-se:

$$T_{m\acute{a}x} = 0,9545(T_{ar} - 0,00618 Lat^2 + 0,2289 Lat + 42,2) - 17,78 = 59,4 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Que é $(63,1 - 59,4)/59,4 = 6\%$ inferior ao resultado obtido neste trabalho. Por isso, pode-se considerar a equação (1.3) uma fórmula para estimar a temperatura máxima do pavimento. No entanto, precisa-se de mais dados de temperatura do solo adquiridos em locais diferentes para verificar sua precisão.

Com o parâmetro utilizado neste trabalho $T_{ar} = 39,7^\circ\text{C}$ (temperatura máxima do dia), obtem-se a temperatura da superfície através da equação (1.5):

$$T_{sup} = -0,72 + 1,34T_{ar} = -0,72 + 1,34 \times 39,7 = 52,5^\circ\text{C}$$

A temperatura resultante é inferior à temperatura obtida neste trabalho: $63,1^\circ\text{C}$.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que:

A temperatura em pavimentos depende de vários fatores como a temperatura de sol - ar e as propriedades térmicas do pavimento. Comparando as temperaturas de sol - ar e coeficiente de transferência de calor por convecção com as temperaturas obtidas variando o calor específico e condutividade térmica do material verifica-se que o primeiro caso tem maior influência na temperatura máxima do pavimento. Isto quer dizer que a variação da temperatura máxima é mais sensível à mudança da temperatura de sol - ar e do coeficiente de transferência de calor por convecção em relação ao calor específico e à condutividade térmica. A variação do calor específico e da condutividade térmica do revestimento quanto à temperatura máxima do pavimento mantém o mesmo nível de influência.

Pode-se afirmar que a máxima temperatura do pavimento está na superfície em determinados horários do dia e em outros momentos encontra-se numa camada.

A temperatura máxima na superfície do pavimento flexível é 63,1°C no horário mais quente do dia aproximadamente às 13:30 h, enquanto no pavimento rígido é 58,4° C, para uma velocidade média do vento de 11,6 km/h.

Ao final da primeira camada 25 cm de profundidade no pavimento rígido já não há mais significativa variação da temperatura enquanto no pavimento flexível a variação da temperatura ainda é grande da primeira para a segunda camada.

A camada de base do pavimento flexível também sofre consideráveis variações térmicas, o que deve ser analisado, pois o calor retido nesta camada pode influenciar muito na variação da temperatura da camada superior que está diretamente em contato com a temperatura do ar e fatores climáticos.

Ainda não existem fórmulas suficientemente boas e simples para calcular a temperatura máxima e a distribuição da temperatura em pavimentos. A fórmula (1.3) pode ser utilizada para estimar a temperatura máxima no pavimento considerado o valor absoluto da latitude local, mas ainda faltam dados para verificar sua confiabilidade e precisão.

5.2 COMENTÁRIOS

Os autores citados no capítulo 1 apresentam resultados muito semelhantes aos deste trabalho, o que é bastante importante já que não há disponibilidade de dados de temperatura especificamente de pavimentos para esta região. É comum encontrar na literatura que a temperatura da superfície de pavimentos flexíveis no Brasil chega a mais ou menos 65° C e em pavimentos rígidos a uma diferença de 5° ou 10° C para menos a uma temperatura ambiente maior do que a usada como dado de entrada. Porém todos os autores restringem seus estudos à primeira camada do pavimento, a camada de revestimento, que é onde se encontra a maior variação de temperatura no pavimento.

É visível através dos resultados a importância de se verificar a influência da temperatura tanto em pavimentos rígidos como em flexíveis, pois a temperatura da superfície do pavimento é bem maior que a do ambiente, pois está associada ao índice de absorção de calor dos materiais utilizados na construção mais insolação local.

Este estudo teve seus objetivos alcançados, o modelo matemático descrito no capítulo 3 mostra simulações computacionais satisfatórias, os resultados encontrados estão de acordo com resultados apresentados pela literatura e com uma grande diferença que é a não dependência de medições de temperatura específicas do pavimento. É um modelo genérico que poderá ser adaptado a outras situações que envolvam transferência de calor.

5.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a realização de medições de temperatura nos dois tipos de pavimentos, a fim de verificar os resultados aqui apresentados com os medidos.

Também é válido realizar uma análise com novas simulações usando diferentes tipos de agregados com diferentes coeficientes de difusividade térmica inclusive na camada de base.

E a partir de dados medidos calcular o módulo de resiliência de pavimentos flexíveis na região de Ijuí.

Uma tarefa válida é realizar a pesquisa da influência dos gradientes térmicos, sob ou não condições de precipitação, quanto ao estado de tensões dos pavimentos e sua resistência.

REFERÊNCIAS E OBRAS CONSULTADAS

ABNT. Modelo de editoração de normas. Disponível em: <http://www.labeu.ufsc.br/conforto/textos/termica/parte2_set2004.htm> Acesso em: 09 ago. 2006.

ARQUITETURA.COM: Tecnologia. Caminhões gastam 11% menos rodando sobre concreto. 2004. Disponível em: <<http://www.arquitetura.com/tecnologia.php?id=2&id>> Acesso em: 02 jan. 2007.

ASEKA, Ivanilda Basso. **Solução da Equação de Condução do Calor Bidimensional, em meios Multicompostos, pelos Métodos Nodal, com Parâmetros Concentrados, e a Técnica da Transformada de Laplace.** Porto Alegre: UFRGS, 2003. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ASEKA, Ivanilda Basso. VILHENA, Marco Tullio de. BEYER, Paulo Otto. Solução da equação de condução do calor bidimensional, não-estacionária, em um meio constituído de quatro camadas. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING – ENCIT, 2004, Rio de Janeiro. Braz. Soc. Mechanical Sciences and Engineering, ABCM.

ASPHALT INSTITUTE. **Performance Graded Asplalt Binder Specification and Testing.** Superpave Series No. 1 (SP1). U.S.A., 1994.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave Mix Design.** Superpave Series No. 2 (SP2). 3. U.S.A., 1995.

BÄCKSTRÖM, Magnus. Ground Temperature in Porous Pavement During Freezing and Thawing. **Journal of Transportation Engineering**, p. 375-381, set-out, 2000.

BALBO, José Tadeu. et al. **Pesquisa dos efeitos do clima sobre pavimentos de concreto – Instrumentação da Pista Experimental na USP.** São Paulo. Trabalho em andamento. Laboratório de Mecânica de Pavimentos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BARROSO, Leônidas Conceição. et al. **Cálculo Numérico** - com aplicações. 2 ed. São Paulo: Harbra Ltda, 1987. 367p.

BEYER, Paulo Otto. **Condução do calor não-estacionária em paredes externas multicompostas**. UFRGS, 1998. Tese de doutorado, PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BEYER, P. O. VIELMO, H. A. & VILHENA, M. T. Estudo comparativo entre soluções para a transferência de calor em paredes multicompostas. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO e II CONGRESSO ÍBERO – AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1995, Belo Horizonte.

BOYCE, William E.; DIPRIMA, Richard C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 416 p.

BROWN, Stephen F. Achievements and Challenges in Asphalt Pavement Engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS, 8. **Keynote Address**, Nottingham, 1997.

CHEN, H. e LIN, J. Y. Application of the Hybrid Method to Transient Heat Conduction in One-Dimensional Composite Layers. **Computers & Structures**. Vol 39, p. 451 – 458.

CLIMAS DO BRASIL - Geografia. Disponível em: <<http://www.suapesquisa.com/clima>> Acesso em: 03 jan. 2007.

CLIMA DO BRASIL - Wikipédia. Disponível em: <http://www.pt.wikipedia.org/wiki/clima_do_brasil> Acesso em: 03 jan. 2007.

COELHO, Marcos de Amorim. **Geografia do Brasil**. 4 ed. São Paulo: Moderna, 1996.

COUTO, Maurício Barcelos. **Introdução à radiação solar**. Porto Alegre: UFRGS, 1995. PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

De SENÇO, Wlastermiler. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini Ltda, 1997. 746 p.

EPPS, Amy Louise. **Thermal Behavior of Crumb – Rubber Modified Asphalt Concrete Mixtures**. California, 1997. Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley.

FORSDYKE, A. G. **Previsão do Tempo e Clima**. 3. ed. Traduzido por Fernando de Castro Ferro. São Paulo: Prisma, [1969]. Tradução de: The Weather Guide. 159 p.

GASPARIN, Eloi. et al. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, jan.-mar., 2005, n. 1, v. 27, p. 107-115.

HEYDARIAN, M., MULLINEUX, N., and Reed, J., “Solution of Parabolic Partial Differential Equations”, **Appl. Math. Modelling**. Birmingham, dez. 1981. v. 5, p. 448-449.

HILDEBRAND. F. B. **Introduction to Numerical Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1956. 511 p.

HOLMAN, Jack Philip. **Transferência de calor**. São Paulo: McGraw-Hill, 1983. Traduzido por: Luiz Fernando Milanez. Departamento de Engenharia, UNICAMP. Tradução de: Heat Transfer. 639 p.

HUANG, Yang H. **Pavement analysis and design**. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 805 p.

HUSSEIN, H. M. EL; KIM, K. W.; PONNIAH, J. Asphalt Concrete Damage Associated With Extreme Low Temperature. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 269-274, nov. 1996.

INCROPERA, Frank P; De WITT, David P. **Fundamentos de Transferência de calor e de massa**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. Traduzido por: Carlos Alberto Biolchini da Silva. Departamento de Engenharia Mecânica, UERJ. Tradução de: Fundamentals of heat and mass transfer. 698 p.

JAMES & MENDES. **Geografia geral e do Brasil**. Estudos para a compreensão do espaço. São Paulo: FTD, 2004. 591 p.

KILPP, Raquel. **Desenvolvimento de Modelos para Previsão de Temperatura em Pavimentos Flexíveis**. Ijuí: UNIJUÍ, 2004. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

KLIEWER, Julie E.; ZENG, Huayang; VINSON, Ted S. Aging and Low – Temperature Cracking of Asphalt Concrete Mixture. **Journal of Cold Regions Engineering**, p. 134-148, set. 1996.

LEITE, L. F. M., **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LU, Yang; WRIGHT, Peter J. Temperature Related Visco-Elastoplastic Properties of Asphalt Mixtures. **Journal of Transportation Engineering**. Jan.-fev. 2000.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 380 p.

MEDINA, Jacques de. Mecânica dos Pavimentos: Aspectos Geotécnicos. **Solos e Rochas**. São Paulo, p. 137-157, mai.-ago. 2006.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. 570 p.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, Critérios de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991. 382 p.

MURRAY, R. Spiegel. **Análise de Fourier**. São Paulo: McGraw-Hill Ltda, 1976. 249 p.

NÚÑEZ, Washington Peres. et al. Modelos de Estimativa de Temperaturas de Pavimentos: contribuição ao estudo de afundamentos nas trilhas de roda em corredores de ônibus em Porto Alegre. In. **12ª Reunião de Pavimentação Urbana**. Sergipe, nov. 2003.

PAIS, Jorge; PEREIRA, Paulo. A Influência da Temperatura na Rigidez das Misturas Betuminosas. Universidade do Minho Azurém. Portugal, 1999.

PEREIRA, Deividi da Silva. **Estudo do comportamento de pavimentos de concreto simples em condições de aderência entre placa de concreto e base cimentada ou asfáltica**. São Paulo: USP, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, 2003.

PEREIRA, Deividi da Silva. **Estudo de gradientes térmicos e deformações em Whitetopping ultradelgado**. São Paulo: USP, 2001. Universidade de São Paulo.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13 ed. Revisado por: Vladimir Antonio Paulon. São Paulo: Globo, 1998. 307 p.

PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento á fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

SHEN, Weixin; KIRKNER, David J.; Thermal Cracking of Viscoelastic Asphalt-Concrete Pavement. **Journal of Engineering Mechanics**, jul. 2001, p. 700 – 709.

SILVA, M. A. Varejão. **Meteorologia e Climatologia**. 2 ed. Brasília: Pax, 2001.

SIMONSEN, Erik; JANOO, Vincent C.; ISACSSON, Ulf. Prediction of Temperature and Moisture Changes in Pavement Structures. **Journal of Cold Regions Engineering**, dez. 1997, p. 291-307.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Porto Alegre: UFRGS, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

SPIEGEL, Murray R. **Trasformadas de Laplace**. Rio de Janeiro: McGraw – Hill do Brasil Ltda, 1971. Coleção Schaum. Traduzido por: Roberto Ribeiro Baldino. Tradução de: Schaum's Outline of Theory and Problems of Laplace Transforms. 344 p.

ULLIDTZ, Per. **Pavement analysis**. Developments in civil engineering, 19. New York: Elsevier, 1987. 318 p.

WOLFE, R. Kenneth; RANDOLPH, Brian W.; COLONY, David C. Standardized Elastic Moduli of Pavement Layers for Overlay Design. **Journal of Transportation Engineering**, 1995, v. 121, n. 2, p. 221-232.

YODER, E. J; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Desing**. 2. ed. New York: Jonh Wiley & Sons, 1975. 711 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Programa computacional principal

OBS: O programa principal plota todas as figuras referentes ao pavimento flexível apresentados neste trabalho desde que seja observado se os coeficientes referentes a este tipo de pavimento estejam ativos. O mesmo pode ser feito para o pavimento rígido, neste caso os coeficientes do pavimento flexível devem ser desativados. Fazem parte do programa principal o programa adicional Ts4 (apêndice B) e as funções CC2 (apêndice C) e C24 (apêndice D).

```
% programa principal segundo a idéia de aproximação de Heydarian (1981)
clear all
clc
out=fopen('teta.txt','wt');

D=[-39.795288+1338.783902*i -39.795288-1338.783902*i 70.020480-641.933247*i
    70.020480+641.933247*i -34.242643+127.808748*i -34.242643-127.808748*i
    4.517451-6.142475*i 4.517451+6.142475*i]; % --- pontos da quadratura de Gauss
conforme Heydarian (1981);

p=[10.169446+1.649202*i 10.169446-1.649202*i 9.406371+4.969217*i
    9.406371-4.969217*i 7.738688+8.370879*i 7.738688-8.370879*i
    4.685495+12.010579*i 4.685495-12.010579*i]; % --- raízes do polinômio conforme
Heydarian (1981);

%----- figura da temperatura Sol-ar -----
Tsa4 % --- chama o programa Ts4;

cor=['-' '*' '.' '+' 's' 'k' 'r' 'm' 'g'];

%%%%%%%%%%%% DADOS PARA PAVIMENTO FLEXÍVEL %%%%%%%%%%

h1=0.15; % --- m, profundidade da placa 1;
dx(1)=0.015; % --- incremento de profundidade da placa 1 para o cálculo;
K1=1.212*60*60; % --- J/(m.s.°C) condutividade térmica 1;
Cp1=920; % --- J/(kg.°C) calor específico 1;
P1=2400; % --- kg/m^3 densidade do material 1;

%%%%%%%%%%%% DADOS PARA PAVIMENTO RÍGIDO %%%%%%%%%%
% h1=0.25; % --- m, profundidade da placa 1;
% dx(1)=0.025; % --- incremento de profundidade da placa 1 para o cálculo;
% K1=0.81*60*60; % --- J/(m.s.°C) condutividade térmica 1;
% Cp1=880; % --- J/(kg.°C) calor específico 1;
% P1=2300; % --- kg/m^3 densidade do material 1;

alfa1=K1/(Cp1*P1); % --- m^2/hora coeficiente de difusividade térmica 1;

%%%%%%%%%%%% DADOS PARA CAMADA DE BASE %%%%%%%%%%
```

```

h2=0.55;           % --- m, profundidade da placa 2;
dx(2)=0.05;       % --- m, incremento de profundidade da placa 2 para o cálculo;
K2=41.7*60;       % --- J/(m.hora.k), condutividade térmica 2;
Cp2=800;          % --- J/(kg.k), calor específico 2;
P2=1500;          % --- kg/m^3, densidade do material 2;
alfa2=K2/(Cp2*P2); % --- m^2/min coeficiente de difusividade térmica 2;

h(1,1)=0;         % --- inicio de profundidade da placa 1;
h(1,2)=h1;        % --- fim de profundidade da placa 1;
h(2,1)=h1;        % --- inicio de profundidade da placa 2;
h(2,2)=h2;        % --- fim de profundidade da placa 1;
b=h2-h1;          % --- espessura da placa 2;

hc=hc*60;         % --- J/(m^2.hora.K);

%----- Cálculo teta(x,t) -----

for dia=1:6        % --- o ciclo a calcular é de 6 dias;
    tglob=tp(1,1);
    ti=0;
    if dia==1
        Tinicio1(1:2,1:11)=24.9;
    end

    for perio=1:4  % --- o dia é dividido em 4 períodos;
        % --- atualizar a temperatura inicial
        if dia>1 & perio==1
            for pl=1:2
                jx=0;
                for x=h(pl,1):dx(pl):h(pl,2)
                    jx=jx+1;
                    Tinicio1(pl,jx)=teta(dia-1,pl,jx,tfim); % --- toma para as temperaturas iniciais as do
                                                                fim do dia anterior
                end
            end
        elseif dia>1 | perio>1
            for pl=1:2
                jx=0;
                for x=h(pl,1):dx(pl):h(pl,2)
                    jx=jx+1;
                    Tinicio1(pl,jx)=teta(dia,pl,jx,ti); % --- toma para as temperaturas iniciais as do
                                                                fim do período anterior
                end
            end
        end
    end

    %----- Calcula a temperatura no tempo ti e na profundidade x -----
    for t=htp(perio):htp(perio):(tp(perio,2)-tp(perio,1)) % loop de tempo no período;
        tglob=tglob+htp(perio); % tempo global;
        ti=ti+1; % conta os pontos de tempo calculados;
        tempo(ti)=tglob;
    end
end

```

```

dt=htp(perio);
for k=1:8
    s=p(k)/t;
    R1=sqrt(s/alfa1);
    R2=sqrt(s/alfa2);
    C2(k)=-1/(R1*alfa1)*C24(dia,h(1,1),h(1,2),R1,dx(1)/3,ti,1,Tinicio1); %
hx=dx(1)/3=0.005
    C3(k)=K1/alfa1*CC2(dia,h(1,1),h(1,2),R1,dx(1)/3,ti,1,Tinicio1);
    C4(k)=-1/(R2*alfa2)*C24(dia,h(2,1),h(2,2),R2,dx(2)/2,ti,2,Tinicio1); %
hx=dx(2)/2=0.025
end

for pl=1:2          % --- loop de placas;
    jx=0;
    for x=h(pl,1):dx(pl):h(pl,2)
        jx=jx+1
        %---- Calcula F11 e F21
        for k=1:8
            s=p(k)/t;
            R1=sqrt(s/alfa1);
            R2=sqrt(s/alfa2);
            d=hc-K1*R1;
            L=hc+K1*R1;
            deta1=(sinh(R2*b)*(K1*R1)^2+cosh(R2*b)*hc*K2*R2)*sinh(R1*h1);
            deta2=(sinh(R2*b)*hc+cosh(R2*b)*K2*R2)*K1*R1*cosh(R1*h1);
            delta=-2*(deta1+deta2); % denominador;
            if perio==1 | perio==4
                va(k)=0;
                for i=1:4          % transformação de Laplace de um polinômio de 3 grau;
                    va(k)=va(k)+pol(perio,i)*factorial(4-i)/s^(5-i);
                end
            else
                va(k)=0;
                for i=1:5          % transformação de Laplace de um polinômio de 4 grau;
                    va(k)=va(k)+pol(perio,i)*factorial(5-i)/s^(6-i);
                end
            end
            if pl==1 % para a placa 1
                A11=(d*(C4(k)*K2*R2+C2(k)*K2*R2*cosh(R2*b)+C3(k)*sinh(R2*b)))/delta;
                I1xs=1/(R1*alfa1)*C24(dia,h(1,1),x,R1,dx(1)/3,ti,1,Tinicio1);
                F(k)=A11*(exp(-R1*x)-L/d*exp(R1*x))+I1xs; % --- =F11*p/t;
                A12=(exp(R1*h1)*(K2*R2*cosh(R2*b)+K1*R1*sinh(R2*b)))/delta;
                g12(k)=hc*(exp(R1*x)*(1+L*A12)/d-A12*exp(-R1*x)); % --g1(k)*tetaSA(s,t);
                gg(k)=s*(g12(k)*va(k)+F(k));
            else % para a placa 2
                A3=exp(R2*h2)*((C2(k)*(K1*R1)^2-
C3(k)*hc)*sinh(R1*h1)+K1*R1*(C2(k)*hc-C3(k))*cosh(R1*h1));
                A4=C4(k)*exp(R2*h1)*(((K1*R1)^2-K2*R2*hc)*sinh(R1*h1)+K1*R1*(hc-
K2*R2)*cosh(R1*h1));
                A21=(A3+A4)/delta;
            end
        end
    end
end

```



```

F21=A21*(exp(-R2*x)-exp(-R2*(2*h2-x)))+C4(k)*exp(-R2*(h2-x));
I2xs=1/(R2*alfa2)*C24(dia,h(2,1),x,R2,dx(2)/2,ti,2,Tinicio1);
F(k)=F21+I2xs; % --- =F21*p/t
g12(k)=-2*hc*K1*R1*sinh(R2*(h2-x))/delta; %= --- g2(k)*tetaSA(s,t)
gg(k)=s*(g12(k)*va(k)+F(k));
end
end % fim do loop k;
teta(dia,pl,jx,ti)=gg*D; % temperatura teta(x,t);
end % fim do loop x;
end % fim do loop de placas pl;
end % fim do loop de tempo t;
end % fim do período;
tfim=ti;

% --- plotar a temperatura pelas profundidades ao final de cada período;

figure(dia)
hold on
grid on
tponto=0;
for perio=1:4
    tponto=tponto+pn(perio);
    i=0;
    for pl=1:2
        jx=0;
        for x=h(pl,1):dx(pl):h(pl,2)
            i=i+1;
            jx=jx+1;
            x12(i)=x;
            y12(i)=teta(dia,pl,jx,tponto)+Tf; % deve somar Tf que anteriormente foi diminuída;
        end
    end
end
plot(x12,y12,cor(perio))
xlabel('Profundidade (m)')
ylabel('Temperatura °C')
legend('1° período','2° período','3° período','4° período')
end % --- fim do perio

% --- plotar a temperatura da superfície e das profundidades do dia 6;
if dia==6
    figure(8)
    grid on
    hold on
    xlabel('Tempo (h)');
    ylabel('Temperatura °C');
    %%% GRÁFICO DO PAVIMENTO RÍGIDO %%%
    %YB(1:ti)=teta(dia,1,1,1:ti)+Tf; % somar a Tf que foi anteriormente diminuída;
    %YB2(1:ti)=teta(dia,1,2,1:ti)+Tf;
    %YB3(1:ti)=teta(dia,1,5,1:ti)+Tf;
    %YB4(1:ti)=teta(dia,1,7,1:ti)+Tf;

```

```

%plot(tempo,YB,cor(dia),tempo,YB2,cor(dia),tempo,YB3,cor(dia),tempo,YB4,cor(dia))
%legend('0 m','0,025 m','0,1 m','0,15 m')

%%%%% GRÁFICO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL %%%%
YB(1:ti)=teta(dia,1,1,1:ti)+Tf;
YB2(1:ti)=teta(dia,1,2,1:ti)+Tf;
YB3(1:ti)=teta(dia,1,3,1:ti)+Tf;
YB4(1:ti)=teta(dia,1,6,1:ti)+Tf;
YB5(1:ti)=teta(dia,1,11,1:ti)+Tf;
YB6(1:ti)=teta(dia,2,2,1:ti)+Tf;
YB7(1:ti)=teta(dia,2,3,1:ti)+Tf;
plot(tempo,YB,cor(dia),tempo,YB2,cor(dia),tempo,YB3,cor(dia),tempo,YB4,cor(dia),tempo,
YB5,cor(dia),tempo,YB6,cor(dia),tempo,YB7,cor(dia))
legend('0 m','0,015 m','0,03 m','0,075 m','0,15 m','0,2 m','0,3 m')

end

% --- chegar a diferença entre dois dias seqüenciais às 12;20 h (horário mais quente):
if dia>1
    p12=pn(1)+pn(2);    % no ponto referente às 12:20 h;
    for i=1:11
        defe(i)=abs(1-teta(dia-1,1,i,p12)/teta(dia,1,i,p12));
    end
    ero=mean(defe);
    if ero<0.001        % se a diferença for menor que 1%, parar de rodar o programa;
        break
    end
end
end                % --- fim do dias
fclose(out);      % --- fecha arquivode saida

for dia=1:6
    j=0;
    for pl=1:2
        jx=0;
        for x=h(pl,1):dx(pl):h(pl,2)
            jx=jx+1;
            j=j+1;
            T24(j,dia)=teta(dia,pl,jx,27)+Tf    % somar Tf que foi anteriormente diminuído;
        end
    end
end
end
end

```

APÊNDICE B - Programa que calcula Ts_a

```

%--- O tempo inicial é 12 minutos e tem uma leitura a cada 30.5 minutos;
Tinf=[21.9; 21.4; 21.1; 20.6; 20.4; 19.9; 19.3; 19.3; 19.3; 18.9; 18.5; 18.2; 18.9; 21.1; ...
      23.2; 25.3; 27.3; 29.4; 31.4; 33.2; 35.1; 35.9; 37.1; 38.3; 34.9; 39.1; 39.7; 38.4; ...
      39; 39.1; 35.8; 36.2; 36; 36.7; 36.5; 34.3; 33.7; 30.7; 29.2; 27.8; 26.8; 26; 25.3; ...
      24.7; 24.1; 23.7; 23.2]; %temperatura da atmosfera;

hc=22.8*60;          % --- J/(m^2.min.K) coeficiente de convecção do ar;
ht=5;              % --- passo para integral g(x,u);
Go=1367*60;        % --- J/(m^2.min), constante solar. Go=442 Btu/h pé^2;
fi=-28.1733*pi/180; % --- latitude de Panambi;
aSOL=0.93;         % --- absorvidade asfáltica;
%aSOL=0.74;        % --- absorvidade do concreto de cimento Portland;
dn=7;              % --- dn representa o dia do ano no calendário Juliano;
S=23.45*sin((360/365)*(dn+284)*180/pi); % --- S é declinação solar em grau;
Sc=S*pi/180;       % --- em radiano;
E=0.7;             % --- emitância hemisférica da superfície em onda longa.
                  % para superfície comum E=1
SR=63*60;          % --- J/(m^2.min);
Nd=acos(-tan(fi)*tan(Sc))*180/pi*2/15*60; % --- número de horas de nd;
                  % tau=0.7; % --- média do
                  % coeficiente de transmissão p/ massa de ar
                  % unitária em dias claros ou nublados;
Tf=24.9;           % --- temperatura (em grau C) de x=55 cm;
deltaT=30.5;       % --- passo do tempo dos dados de entrada;
tx=0:ht:1440;
mt=size(tx,2);
ar=zeros(mt,1);
tetaSA=zeros(mt,1);

tp(1,1)=20;   tp(1,2)=380; htp(1)=60; % tempo inicial, final e de incremento p/ 1°
período;
tp(2,1)=tp(1,2); tp(2,2)=740; htp(2)=20; % tempo inicial, final e de incremento p/ 2°
período;
tp(3,1)=tp(2,2); tp(3,2)=1120; htp(3)=htp(2); % tempo inicial, final e de incremento p/ 3°
período;
tp(4,1)=tp(3,2); tp(4,2)=1420; htp(4)=60; % tempo inicial, final e de incremento p/ 4°
período;

pn(1)=round((tp(1,2)-tp(1,1))/htp(1)); % o número de pontos de tempo a ser calculado
para 1° período;
pn(2)=round((tp(2,2)-tp(2,1))/htp(2));
pn(3)=round((tp(3,2)-tp(3,1))/htp(3));
pn(4)=round((tp(4,2)-tp(4,1))/htp(4));

% ----- Calculo teta_ar -----
for perio=1:4
ui=0; % --- contador;

```

```

for u=tp(perio,1):htp(perio):tp(perio,2)
    ui=ui+1;
    for j=1:47
        tempo=(j-1)*deltaT+12;

%--- diferença em tempo entre último dado (23.58333h=1415min) e
% primeiro 12 minutos=0.2 hora é 0.616666667 h =37 min;
        if abs(u-tempo)<0.0001
            ar(ui)=Tinf(j);
            break
        elseif u<12.0
            ar(ui)=Tinf(47)+(Tinf(1)-Tinf(47))*(u+24*60-1415)/37;
            break
        elseif u>1415
            ar(ui)=Tinf(47)+(Tinf(47)-Tinf(46))*(u-1415)/deltaT;
            break
        elseif u<tempo
            ar(ui)=Tinf(j-1)+(Tinf(j)-Tinf(j-1))*(u-(tempo-deltaT))/deltaT;
            break
        end
    end
    ar(ui)=ar(ui)-Tf; % --- a temperatura: teta que deve menos Tf
    %--- w é angulo hora, considerando 'zero' p/ meio dia e +15°a cada hora, pela manhã é
    negativo;
    w=(u-12*60)*15/60*pi/180;
    z=sin(fi)*sin(Sc)+cos(fi)*cos(Sc)*cos(w); % z=cos(z)
%--- precisa-se separar os tempos antes do sol nascer e depois de se pôr;
    if (u-12*60)<-Nd/2 | (u-12*60)>Nd/2
        tSA(perio,ui)=ar(ui)-E*SR/hc;
    else
        Gn=Go*tau^(1/z);
        Ib=Gn*abs(z)*aSOL;
        It=1.1*Ib;
        tSA(perio,ui)=ar(ui)+(It-E*SR)/hc; % --- temperatura Sol-AR
    end
end % --- fim do tempo u

tempp(perio,1:ui)=tp(perio,1):htp(perio):tp(perio,2);
A=zeros(ui,1); B=zeros(ui,1);
ri=tp(perio,1);
A(1:ui)=(tempp(perio,1:ui)-ri)/60; % --- tempo em horas
B(1:ui)=tSA(perio,1:ui);
if perio==1 | perio==4
    z=polyfit(A,B,3); % aproximar a temperatura por um polinômio de 3°;
    pol(perio,1:4)=z;
    for i=1:ui
        r=(tempp(perio,i)-ri)/60; % --- tempo em horas
        tempol(perio,i)=polyval(z,r);
    end
else

```

```

zp=polyfit(A,B,4);           % aproximar a temperatura por um polinômio de 4°;
pol(perio,1:5)=zp;
for i=1:ui
    r=(tempp(perio,i)-ri)/60;
    tempol(perio,i)=polyval(zp,r);
end
end % --- fim do periodo
figure(10)
hold on
grid on
Bb=B+Tf;
plot(A,Bb,'b')
B(1:ui)=tempol(perio,1:ui)+Tf;
plot(A,B,'m.')
xlabel('Tempo no período (h)')
ylabel('Temperatura °C')
legend('1° p','int 1h','2° p','20 min','3° p','20 min','4° p','int 1h')
end % --- fim do período

tp=tp/60;                   % --- tempo em horas
htp=htp/60;

ui=0;                       % --- contador;

% ----- Calculo teta_ar -----
for u=0:ht:1440
% for u=12:12
    ui=ui+1;
    for j=1:47
        tempo=(j-1)*deltaT+12;
%--- diferença em tempo entre último dado (23.58333h=1415min) e
% primeiro 12 minutos=0.2 hora é 0.616666667 h =37 min;
        if abs(u-tempo)<0.0001
            ar(ui)=Tinf(j);
            break
        elseif u<12.0
            ar(ui)=Tinf(47)+(Tinf(1)-Tinf(47))*(u+24*60-1415)/37;
            break
        elseif u>1415
            ar(ui)=Tinf(47)+(Tinf(1)-Tinf(47))*(u-1415)/37;
            break
        elseif u<tempo
            ar(ui)=Tinf(j-1)+(Tinf(j)-Tinf(j-1))*(u-(tempo-deltaT))/deltaT;
            break
        end
    end
end
ar(ui)=ar(ui)-Tf; % --- temperatura de Kelvin
%--- w é angulo hora, considerando 'zero' p/ meio dia e +15°a cada hora, pela manhã é
negativo;
w=(u-12*60)*15/60*pi/180;

```

```

z=sin(fi)*sin(Sc)+cos(fi)*cos(Sc)*cos(w); % z=cos(z)
%--- precisa-se separar os tempos antes do nascer e depois do pôr do sol;
if (u-12*60)<-Nd/2 | (u-12*60)>Nd/2
    tetaSA(ui)=ar(ui)-E*SR/hc;
else
    Gn=Go*tau^(1/z);
    Ib=Gn*abs(z)*aSOL;
    It=1.1*Ib;
    tetaSA(ui)=ar(ui)+(It-E*SR)/hc; % --- temperatura em Kelvin;
end
end

tmed=mean(tetaSA);
figure(11)
hold on
grid on
plot(tx,tetaSA+Tf,'b')
xlabel('Tempo (min)')
ylabel('Temperatura °C')
legend('Sol - ar')

```

APÊNDICE C - Função que calcula CC2

```

function rap=CC2(dia,x1,x2,R,hx,ti,pL,Tinicio)
T0=Tinicio(pL,:);

divi=3;
if pL==2
    divi=2;
end
x=[1 0.5 0.01];          % --- m, profundidades dadas;
y=[22.4 24.8 22.8];     % --- °C, temperaturas medidas 0 hora;
T=polyfit(x,y,2);       % --- comando que calcula os coeficientes do polinômio;
I=0;
m=round((x2-x1)/hx)+1; % --- numero de pontos que serão calculados na integral;
for i=1:m
    E=x1+(i-1)*hx;      % --- variavel da integral;
                        % --- inicialmente a
                        % --- temperatura será obtida pela interpolação das medidas
    tetaE=T(1)*E^2+T(2)*E+T(3)-24.9;
    elseif i==1
        jx=1;
        tetaE=T0(1);    % --- a temperatura é igual a inicialmente dada;
    elseif mod(i-1,divi)==0
        jx=jx+1;
        tetaE=T0(jx);   % --- a temperatura é exatamente a inicial;
    else
        % --- a temperatura será obtida pela interpolação das iniciais;
        tetaE=T0(jx)+(T0(jx+1)-T0(jx))*mod(i-1,divi)/divi;
    end
    if i==1 | i==m
        fator=1;
    else
        fator=2;
    end
    I=I+fator*tetaE*cosh(R*(E-x2));
end
rap=(hx/2)*I;

```

APÊNDICE D - Função que calcula C24

```

function trap=C24(dia,x1,x2,R,hx,ti,pL,Tinicio)

T0=Tinicio(pL,:);

divi=3;
if pL==2
    divi=2;
end
x=[1 0.5 0.01];          % --- m, profundidades dadas;
y=[22.4 24.8 22.8];      % --- °C, temperaturas medidas 0 hora;
T=polyfit(x,y,2);        % --- comando que calcula os coeficientes do polinômio;
I=0;
m=round((x2-x1)/hx)+1;   % --- número de pontos que serão calculados na integral;
for i=1:m
    E=x1+(i-1)*hx; % --- variavel da integral;
    if dia==1 & ti==1 % Para começa de tudo (dia=1) e ti=1,
        % a temperatura sera obtida pela interpolacao das medidas
        tetaE=T(1)*E^2+T(2)*E+T(3)-24.9;
    elseif i==1
        jx=1;
        tetaE=T0(1);          % --- a temperatura é a inicialmente dada;
    elseif mod(i-1,divi)==0
        jx=jx+1;
        tetaE=T0(jx);        % --- a temperatura é exatamente a inicial;
    else
        % --- a temperatura será obtida pela interpolação das temperaturas iniciais;
        tetaE=T0(jx)+(T0(jx+1)-T0(jx))*mod(i-1,divi)/divi;
    end
    if i==1 | i==m
        fator=1;
    else
        fator=2;
    end
    I=I+fator*tetaE*sinh(R*(E-x2));
end
trap=(hx/2)*I;

```


Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)