

UNIJUÍ – UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA – DETEC

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA PREVISÃO DE TEMPERATURA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

RAQUEL KILPP

Trabalho de Conclusão do Curso

Ijuí – RS, março de 2004

RAQUEL KILPP

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA PREVISÃO DE
TEMPERATURA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão do Curso

Trabalho apresentado ao corpo docente do Programa de Graduação em Engenharia Civil do Curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para aprovação na disciplina e formação de nível superior no curso de Engenharia Civil.

Orientador

M. Eng. Luciano Pivoto Specht

Ijuí

2004

RAQUEL KILPP

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA PREVISÃO DE
TEMPERATURA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão do Curso

Aprovação na disciplina e formação de nível superior no curso de Engenharia Civil

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

Aprovado em Março de 2004

M. Eng. Prof. Luciano Pivoto Specht
Orientador

M. Eng. Prof. Cristina Eliza Pozzobon
Banca Examinadora

M. Eng. Prof. Luciana Londero Brandli
Banca Examinadora

M. Eng. Prof. Luís Eduardo Mödler
Coordenador do Curso de Engenharia Civil

Dedico esta conquista aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me apoiando no que fosse necessário.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão pelo grande incentivo e auxílio em todos os momentos da minha vida.

Agradeço ao meu namorado pela paciência, principalmente nos momentos de maior nervosismo.

Agradeço aos demais familiares pelo estímulo e interesse sempre demonstrado aos meus estudos.

Agradeço às minhas grandes amigas e colegas Angélica e Mariela pelo companheirismo e bons momentos que passamos durante a graduação.

Agradeço ao professor Luciano pela orientação deste trabalho, pelos ensinamentos e pela sua dedicação à engenharia.

Agradeço às professoras Cristina e Raquel pelo grande exemplo de profissionalismo e pela amizade.

Agradeço aos demais professores e pessoas que, de uma forma ou outra, contribuíram para a conclusão deste curso.

Quando você realmente quer uma coisa, o universo inteiro conspira para que você consiga.

Paulo Coelho

RESUMO

No Brasil, os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis não consideram as condições climáticas, o solo e a vegetação; embora se tenha conhecimento de que o desempenho destes pavimentos é função da atuação conjunta das cargas de tráfego, das características de suas camadas, dos processos de manutenção empregados, da idade e do ambiente em que estiverem inseridos. Desenvolveu-se, com a elaboração deste trabalho, modelos para previsão de temperatura de pavimentos flexíveis. Esses modelos foram obtidos com o monitoramento das temperaturas do ar, da superfície do pavimento e à 2 e 5 cm de profundidade, em duas condições: exposto ao sol e à sombra. O monitoramento das temperaturas e o desenvolvimento dos modelos foram realizados nas cidades de Ijuí, localizada na região Noroeste, e em Sobradinho, na região Centro Serra, ambas no Rio Grande do Sul. Observou-se e relatou-se os dados peculiares de cada região para, primeiramente, elaborar, de forma individualizada, modelos de previsão de temperatura em pavimentos flexíveis para as duas cidades (Ijuí e Sobradinho). Posteriormente, utilizou-se dados de ambas as cidades para desenvolver um modelo genérico que pode ser utilizado em todo o estado do Rio Grande do Sul e demais regiões que apresentam clima subtropical, uma vez que o clima das duas regiões ora analisadas é este. Pelos resultados obtidos, pode-se perceber que a correlação da temperatura ambiente com a temperatura dos pavimentos é de extrema importância e servirá não só para auxiliar no dimensionamento de pavimentos (caracterização dos materiais nas temperaturas adequadas), como também na seleção de asfálticos e em levantamentos deflectométricos.

Palavras-chave:

Pavimentos flexíveis – temperatura – irradiação

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| Lista de Figuras | 10 |
| Lista de Quadros | 12 |
| Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos | 13 |
| INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 Delimitação do Tema | 15 |
| 1.2 Formulação da Questão de Estudo | 15 |
| 1.3 Definição dos Objetivos do Estudo | 16 |
| 1.3.1 Objetivo Geral | 16 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 16 |
| 1.4 Justificativa | 17 |
| 1.5 Organização do Trabalho | 19 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 2.1 Clima | 21 |
| 2.1.1 O Clima Brasileiro | 22 |
| 2.1.2 O Clima do Rio Grande do Sul | 26 |
| 2.2 Transmissão de Calor | 27 |
| 2.2.1. Transmissão de Calor por Condução – Lei de Fourier | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.2 Transmissão de Calor por Convecção – Lei de Newton do resfriamento | 28 |
| 2.2.3 Transmissão de Calor por Irradiação – Lei de Stefan-Boltzmann | 28 |
| 2.2.4 A radiação solar e a atmosfera terrestre | 29 |
| 2.3 Pavimentos Flexíveis | 31 |
| 2.3.1 A ação da Temperatura nos Pavimentos Flexíveis | 32 |
| 2.3.2 A ação da Chuva nos Pavimentos Flexíveis | 33 |
| 2.3.3 A Pesquisa SHRP | 34 |
| 2.3.4 Modelos de Previsão de Temperatura | 35 |
| 3 METODOLOGIA | 38 |
| 3.1 Classificação do estudo | 38 |
| 3.2 Coleta de Dados | 38 |
| 3.2.1 Caracterização dos locais de estudo | 39 |
| 3.2.2 Caracterização do instrumento de medida | 40 |
| 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 42 |
| 4.1 Análise do comportamento térmico das camadas asfálticas ao longo do dia | 42 |
| 4.2 Modelos de temperatura do pavimento versus temperatura do ar | 45 |
| 4.2.1 Ijuí | 45 |
| 4.2.2 Sobradinho | 48 |
| 4.2.3 Modelo Global | 52 |
| 4.3 Modelos de temperatura do pavimento versus temperatura da superfície | 56 |
| 4.3.1 Ijuí | 57 |
| 4.3.2 Sobradinho | 59 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.3 Modelo Global | 62 |
| 4.4 Modelo Geral | 64 |
| 4.5 Modelos Gerados x Existentes | 67 |
| 4.6 Resumo | 69 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 75 |
| 5.1 Conclusões | 75 |
| 5.2 Sugestões para trabalhos futuros | 76 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 78 |
| BIBLIOGRAFIA CONSULTADA | 82 |
| ANEXOS | 83 |
| ANEXO A – Temperaturas medidas em Ijuí | 84 |
| ANEXO B – Temperaturas medidas em Sobradinho | 85 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Fator de correção da temperatura | 18 |
| Figura 2: Classificação do clima brasileiro segundo Köppen | 23 |
| Figura 3: Unidades climáticas do Brasil segundo IBGE | 25 |
| Figura 4: Localização dos municípios estudados | 40 |
| Figura 5: Termômetro digital empregado para medir as temperaturas | 41 |
| Figura 6: Variação da temperatura do ar e das camadas asfálticas ao longo do dia | 43 |
| Figura 7: Gradientes térmicos no interior do revestimento | 44 |
| Figura 8: Regressão linear para a temperatura máxima na cidade de Ijuí | 46 |
| Figura 9: Regressão linear para a temperatura mínima na cidade de Ijuí | 48 |
| Figura 10: Regressão linear para a temperatura máxima na cidade de Sobradinho | 50 |
| Figura 11: Regressão linear para a temperatura mínima na cidade de Sobradinho | 52 |
| Figura 12: Regressão linear para a temperatura máxima em regiões de clima subtropical | 54 |
| Figura 13: Regressão linear para a temperatura mínima em regiões de clima subtropical | 55 |
| Figura 14: Regressão linear para temperatura máxima em Ijuí | 58 |
| Figura 15: Regressão linear para a temperatura mínima em Ijuí | 59 |

| | |
|--|----|
| | 11 |
| Figura 16: Regressão linear para a temperatura máxima em Sobradinho | 60 |
| Figura 17: Regressão linear para a temperatura mínima em Sobradinho | 61 |
| Figura 18: Regressão linear para a temperatura máxima em regiões de clima subtropical | 63 |
| Figura 19: Regressão linear para a temperatura mínima em regiões de clima subtropical | 64 |
| Figura 20: Temperaturas previstas e observadas ao sol | 65 |
| Figura 21: Temperaturas previstas e observadas à sombra | 66 |
| Figura 22: Comparação entre temperaturas medidas e temperaturas estimadas pelo Modelo SHRP (1994) | 68 |
| Figura 23: Comparação entre temperaturas medidas e temperaturas estimadas pelo Modelo Motta (1991) | 69 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas máximas, através da temperatura do ar | 70 |
| Quadro 2: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas mínimas, através da temperatura do ar | 71 |
| Quadro 3: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas máximas, através da temperatura da superfície do pavimento | 72 |
| Quadro 4: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas mínimas, através da temperatura da superfície do pavimento | 73 |
| Quadro 5: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas máximas e mínimas, entre as profundidades 2 e 5 cm | 74 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Irrad.: Irradiação

lat: latitude

Prof.: Profundidade

T_{ar} : Temperatura do ar

T_{min} : Temperatura mínima do pavimento

T_{rev} : Temperatura do revestimento

T_{sup} : Temperatura da superfície do pavimento

$T(x)$: Temperatura na profundidade x do revestimento

$T_{2\text{ cm}}$: Temperatura do pavimento a 2 cm de profundidade

$T_{5\text{ cm}}$: Temperatura do pavimento a 5 cm de profundidade

$T_{9\text{ cm}}$: Temperatura do pavimento a 9 cm de profundidade

R^2 : coeficiente de determinação linear

μm : micrometros

W/m^2 : Watts por metro quadrado

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado à Quente

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

PG: Performance Grade (Grau de Desempenho)

SHRP: Strategic Highway Research Program (Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária)

SUPERPAVE: Superior PERformance Asphalt PAVements (Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior)

INTRODUÇÃO

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Por meio deste trabalho desenvolveram-se modelos de correlação da temperatura ambiente com a temperatura do pavimento, em diferentes profundidades. Também foram desenvolvidos modelos de correlação da temperatura superficial de pavimentos flexíveis com a sua temperatura até 5 cm de profundidade. Os dados para a realização desta pesquisa foram coletados nos municípios de Ijuí e Sobradinho, ambos no estado do Rio Grande do Sul. Com este estudo iniciou-se o desenvolvimento de modelos estatísticos e a criação de um banco de dados de temperatura para as regiões em que os dois municípios estão situados.

1.2 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO

Qual é a relação entre a temperatura do pavimento, em diferentes profundidades, com a temperatura do ar? Quais são os parâmetros envolvidos nesta variação? Os modelos já desenvolvidos podem ser empregados nas regiões em estudo?

1.3 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DO ESTUDO

1.3.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo gerar modelos de correlação da temperatura do ar com a temperatura do pavimento em diferentes profundidades, em diferentes condições (exposta ao sol e à sombra) e em duas regiões distintas do estado do Rio Grande do Sul (região Noroeste e região Centro Serra).

1.3.2 Objetivos Específicos

?? Verificar se há diferença na variação da temperatura do pavimento em locais expostos ao sol e à sombra;

?? Obter gráficos de variação da temperatura do pavimento em diferentes profundidades no decorrer do dia;

?? Verificar se há diferença na variação da temperatura dos pavimentos em Ijuí e Sobradinho e, caso houver, relacionar os parâmetros que influenciam esta diferença;

?? Fazer um levantamento de modelos já apresentados na literatura e compará-los com os modelos gerados neste trabalho.

1.4 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a principal via utilizada para a realização do transporte de bens e pessoas é a malha rodoviária. Aproximadamente 63% das cargas e 97% dos passageiros são transportados através de via rodoviária (MELLO, 2001). Além disso, as rodovias representam um importante patrimônio a ser preservado, uma vez que, com a melhoria das condições das estradas há redução de acidentes rodoviários e de perdas de safra por tempo excessivo no transporte, há diminuição do consumo de combustível e do custo de manutenção dos veículos, entre outros aspectos. Atualmente, 10% da malha rodoviária brasileira é pavimentada, da qual 97% são em revestimentos asfálticos.

O desempenho de um pavimento é função da atuação conjunta das cargas de tráfego, dos processos de manutenção utilizados, da sua idade e do ambiente em que estiver inserido. Embora se tenha conhecimento de que o clima é um dos fatores que mais degradam os pavimentos, no Brasil, os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) não consideram os fatores ambientais.

Sabendo-se do alto custo de construção de uma rodovia, o conhecimento da variação da temperatura do pavimento pode auxiliar no seu dimensionamento pela caracterização dos materiais nas temperaturas adequadas, visando obter pavimentos mais apropriados para as regiões onde serão executados e, conseqüentemente, de maior vida útil. Assim, não haverá necessidade de tantos investimentos para a manutenção das rodovias, pois, no Brasil, há falta de investimentos em diversos setores e o setor de infra-estrutura viária é um deles.

O conhecimento das reais temperaturas dos pavimentos pode, também, auxiliar na seleção de ligantes asfálticos. As novas especificações de ligantes asfálticos

(SUPERPAVE™ - Superior PERformance Asphalt PAVements) discriminam ligantes com base em seus desempenhos, sendo estes selecionados a partir das temperaturas dos pavimentos e, conseqüentemente, das características climáticas da região onde serão inseridos. Os requisitos das propriedades físicas, como rigidez, são constantes para todos os ligantes, o que difere os ligantes é a temperatura em que estes requisitos passam, ou seja, as temperaturas máxima e mínima em que suas propriedades físicas são aceitas.

Como as propriedades dos pavimentos asfálticos são altamente dependentes da temperatura, as deformações e as deflexões lidas nos levantamentos deflectométricos devem ser corrigidas para uma temperatura de referência (usualmente 25 °C). Essas correções podem ser feitas através de curvas que indicam, em função da temperatura, as correções a serem aplicadas, conforme ilustra a Figura 1. Com o conhecimento da temperatura do pavimento esses levantamentos tornam-se mais representativos.

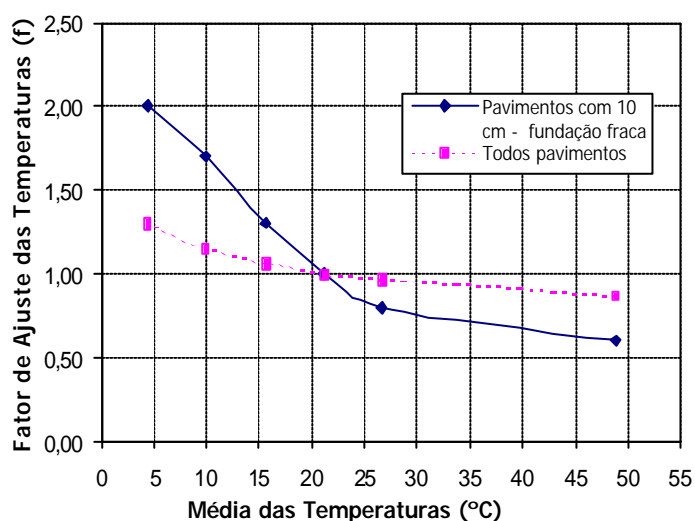


Figura 1: Fator de correção da temperatura

A tendência de projetar pavimentos levando em conta as condições peculiares de cada material remete a sua adequada caracterização. O conhecimento da temperatura que irá atuar em determinado pavimento levará a uma caracterização mais realista, visto que as misturas asfálticas (concreto asfáltico e pré-misturados a frio e a quente, por exemplo) têm suas características de deformabilidade e resistência alteradas com a temperatura.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O presente capítulo traz uma breve introdução sobre a pesquisa realizada, bem como a delimitação do tema abordado, a formulação da questão de estudo, as definições dos objetivos gerais e específicos, as justificativas do trabalho e sua organização.

Aborda-se, no segundo capítulo, a revisão bibliográfica pertinente ao tema do estudo que trata dos seguintes assuntos: clima, processos de transmissão de calor, radiação solar e pavimentos flexíveis.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada para a realização do trabalho. Contém informações sobre a coleta de dados, os locais de estudo e o instrumento de medição.

Os resultados obtidos são analisados no quarto capítulo, onde são apresentados modelos de correlação da temperatura do ar com as diferentes profundidades do pavimento, bem como modelos de correlação da temperatura superficial do pavimento com a temperatura a diferentes profundidades. Ambos os modelos foram desenvolvidos tanto ao sol quanto à sombra e para as regiões de Sobradinho e Ijuí. No final do capítulo, são apresentadas fórmulas genéricas onde,

através da temperatura ambiente e da temperatura superficial do pavimento, pode-se prever a temperatura máxima e mínima para profundidades entre 2 e 5 cm.

A conclusão do trabalho está no quinto capítulo. Neste são apresentadas, também, as considerações finais, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente são apresentadas as referências bibliográficas, a bibliografia consultada e os Anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CLIMA

Muitas são as atividades humanas influenciadas pelo clima: a indústria, o turismo, os transportes, as obras civis, entre outras. Motta (1991) afirma, em sua tese de doutorado, que o clima e as condições ambientais são fatores que estão diretamente ligados ao desempenho de um pavimento.

Sorre (apud VESENTINI, 1988) define clima como a sucessão habitual dos diferentes tipos de tempo, que ocorrem em um determinado local da superfície terrestre. Sendo assim, clima e tempo não são a mesma coisa, embora estejam interligados. O tempo é formado pelas características atmosféricas de um lugar qualquer, em um dado espaço de tempo (horas, dias, semanas), ao passo que o clima depende dos tipos de massas de ar que predominam ou se sucedem em uma região ao longo das estações do ano.

De acordo com Vesentini (1988), para compreender o clima de um local é necessário estudar os diversos tipos de tempos que costumam ocorrer neste local. Esse estudo é realizado durante vários anos seguidos. O resultado, uma espécie de síntese dos tipos de tempos que geralmente ocorrem no local, será o clima. Mas tanto o tempo como o clima referem-se aos mesmos fenômenos atmosféricos: a temperatura e a

insolação, a pressão atmosférica, os ventos, a umidade do ar e as precipitações (chuva, neve, geada, orvalho e granizo).

Os elementos do clima sofrem influência direta de determinados fatores locais, entre os principais estão: o relevo, a existência ou não de cobertura vegetal, a altitude, a proximidade ou distância do oceano, a circulação atmosférica e a presença das massas de ar (SILVA; AZZI, 1994). Belloni (19??) afirma que até mesmo as atividades humanas são capazes de influenciar o clima.

2.1.1 O Clima Brasileiro

O Brasil ocupa uma área de 8,5 milhões de km², sendo que a maior parte desse total está localizada entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, estando, então, na zona tropical. Apenas a região Sul e o sul de São Paulo se localizam abaixo do trópico de Capricórnio e pequena parte da região Norte se encontra acima da linha do Equador (KRAJEWSKI, 19??).

Em consequência de fatores variados, a diversidade climática do território brasileiro é muito grande. Dentre estes fatores, destacam-se a fisionomia geográfica, a extensão territorial, o grande e extenso litoral, o relevo e a dinâmica das massas de ar. Este último é de suma importância porque atua diretamente tanto na temperatura quanto na pluviosidade, provocando as diferenciações climáticas regionais (CLIMA DO BRASIL, 19??).

Várias são as classificações climáticas apresentadas pela literatura, sendo cada uma delas baseada em alguns elementos do clima (KRAJEWSKI, 19??).

O norte americano Arthur Strahler, a partir do estudo da dinâmica das massas de ar, analisa alterações e comportamentos climáticos das regiões, partindo dos mecanismos das massas e de sua origem. Esta classificação não trabalha com a análise das temperaturas e da umidade, mas sim com a gênese de cada clima, com a explicação de sua dinâmica.

A classificação do alemão Wilhelm Köppen parte da análise em separado dos elementos do clima. Utiliza-se letras maiúsculas (1ª letra) para determinar os diferentes tipos de clima e letras minúsculas para a distribuição das chuvas (2ª letra) e médias das temperaturas (3ª letra), conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2: Classificação do clima brasileiro segundo Köppen

A geógrafa Lysia Maria Cavalcante Bernardes, do Conselho Nacional de Geografia, adaptou a classificação de Köppen para o Brasil. Segundo sua proposta, o Brasil tem cinco tipos de clima:

- a) Equatorial (Af e Am): apresenta temperaturas médias elevadas, ausência de estação seca e reduzida amplitude térmica anual;
- b) Tropical (Aw e As): presente na maior parte do território brasileiro. As temperaturas são altas, a média é de 25 °C, e há uma clara distinção entre a temporada seca (inverno) e a chuvosa (verão);
- c) Semi-árido (Bsh): as chuvas são escassas e irregulares: chove menos de 600 mm anuais. As temperaturas são altas o ano todo, ficando em torno de 26 °C;
- d) Tropical de Altitude (Cwa, Cwb e Csa): a média de temperaturas fica em torno de 18 °C, é mais baixa do que no clima tropical. O índice de pluviosidade é influenciado pela proximidade do oceano. As chuvas são bem distribuídas durante o ano;
- e) Subtropical (Cfa e Cfb): apresenta grande variação de temperatura entre verão e inverno. As chuvas são bem distribuídas durante o ano e não há uma estação seca.

Já o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (1990) baseia-se nas temperaturas médias, nos índices pluviométricos e na umidade do ar, além da classificação clássica de Köppen, para o clima brasileiro. Como baseia-se em diversos fatores, algumas regiões estão incluídas em uma classe, quando se considera um aspecto e quando se leva em conta outro aspecto, enquadram-se em outra região, conforme ilustra a Figura 3.

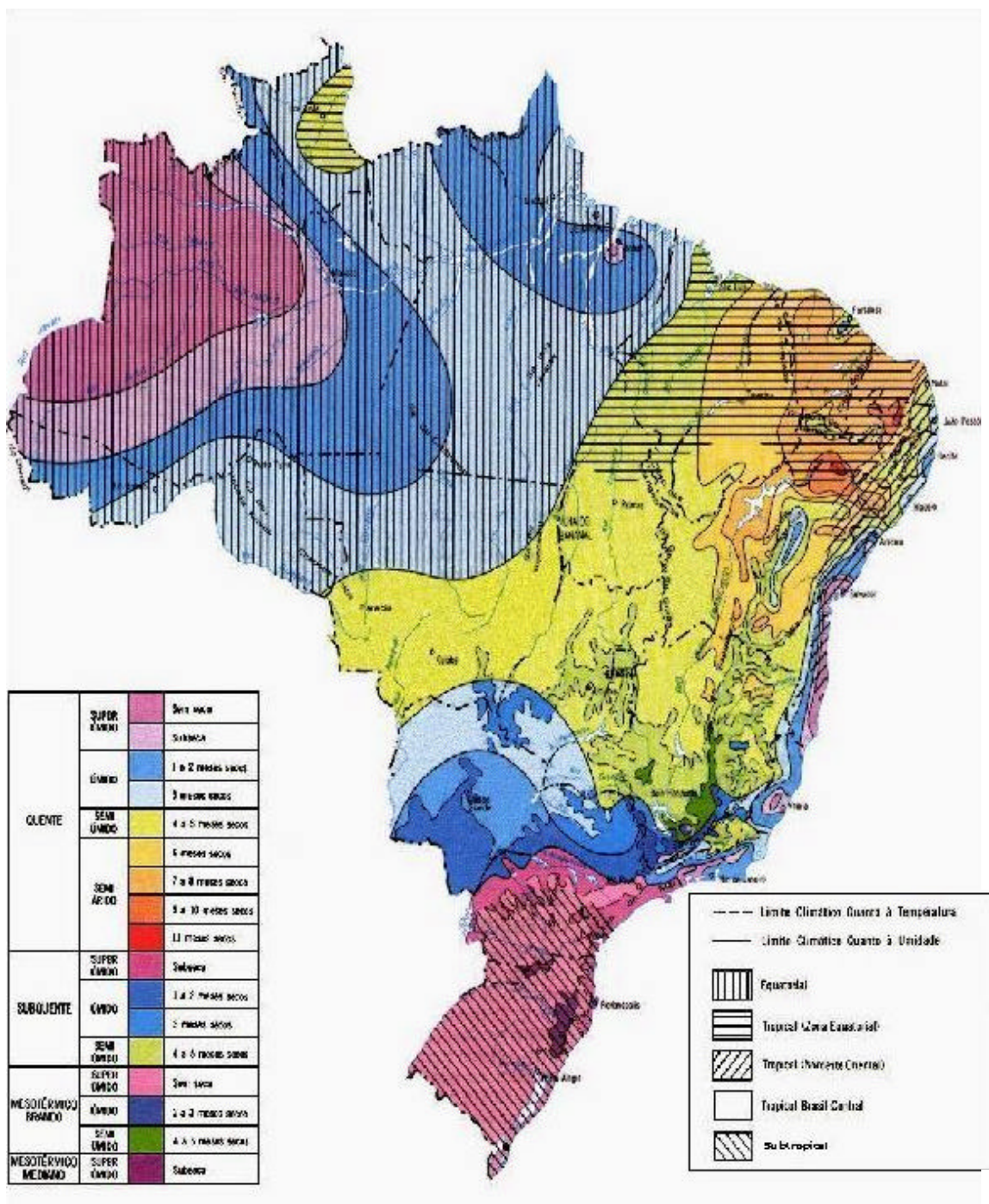


Figura 3: Unidades climáticas do Brasil segundo o IBGE

Porém qualquer que seja o modelo de classificação usado, a distribuição dos tipos climáticos em mapas-múndi, indica os tipos que tendem a ser zonais quanto à localização, ressaltando o papel dominante da radiação solar e da latitude que a controla, no clima (MOTTA, 1991, p. 62).

A radiação solar está intimamente ligada à época do ano, ao período do dia e à latitude. A quantidade de radiação solar incidente em determinado local é afetada também pela duração do dia, além da presença ou não de nebulosidade e de água e da altitude do local considerado (MOTTA, 1991).

2.1.2 O Clima do Rio Grande do Sul

O Estado do Rio Grande do Sul situa-se no extremo sul do Brasil, entre as latitudes de 27° e 34° Sul e as longitudes de 50° e 57° Oeste. O clima do sul do Brasil, por estar quase que completamente abaixo do trópico de Capricórnio e por ter grande parte de seu território acima de 300 metros, se difere bastante do clima das outras regiões do país. É a única região do país que pode sofrer com fenômenos como neve, chuva congelada e geada. As características são de clima subtropical com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Fatores geográficos, como a continentalidade e a maritimidade e fenômenos relacionados com a dinâmica da atmosfera, são determinantes das principais características climáticas do extremo sul do Brasil (CUNHA, 2003).

Pela classificação climática de Köppen, o Rio Grande do Sul enquadra-se na zona temperada (C), tipo fundamental úmido (Cf), com duas variedades específicas: subtropical (Cfa) e temperado (Cfb).

2.2 TRANSMISSÃO DE CALOR

Calor é a passagem de energia de um corpo para o outro, devido à diferença de temperatura entre eles (BONJORNO; CLINTON, 1992). Já temperatura é definida por Omote (1986) como a medida do grau de agitação térmica, ou seja, é uma função da energia cinética média das partículas constituintes da substância.

Em virtude do que foi exposto anteriormente, deve-se observar que o termo calor só deve ser usado para designar a energia em trânsito, ou seja, quando ela está sendo transferida de um corpo para outro, devido a uma diferença de temperatura. A transferência de calor para um corpo acarreta um aumento na energia de agitação de seus átomos e moléculas, ou seja, geralmente provoca uma elevação em sua temperatura. Não se pode, portanto, dizer que um corpo possui calor ou que a temperatura é uma medida do calor no corpo. Na realidade, o que um corpo possui é energia interna e quanto maior for a sua temperatura, maior será esta energia interna. Naturalmente, se um corpo está a uma temperatura mais elevada do que outro, ele pode transferir parte de sua energia interna para este outro. Esta energia que está passando de um corpo para outro é o calor (ÁLVARES; LUZ, 1986).

Existem três processos de transmissão de calor: condução, convecção e irradiação, descritos a seguir:

2.2.1 Transmissão de Calor por Condução – Lei de Fourier

Transmissão de calor por condução é o fenômeno que ocorre quando corpos em diferentes temperaturas são postos em contato. A condução é explicada pela teoria cinética: “As moléculas do corpo mais quente têm maior energia cinética. Assim,

através de choques entre as moléculas, a energia se transfere do corpo mais quente para o mais frio” (CHIQUELTO; PARADA, 1992, p. 54).

2.2.2 Transmissão de Calor por Convecção – Lei de Newton do resfriamento

Transmissão de calor por convecção é um fenômeno que ocorre em fluidos, ou seja, em líquidos ou gases. A transferência de calor em fluidos pode até ser feita por condução, mas a convecção é responsável pela maior parte do calor transferido nestes materiais. Este fenômeno não pode ocorrer em um corpo sólido, pois a propagação do calor, neste caso, se deve a um movimento de matéria (ÁLVARES; LUZ, 1986).

O calor se propaga por convecção quando as diferenças de densidade entre as várias partes do fluido (devido às diferenças de temperatura) geram correntes que transportam o calor pelo interior de sua massa (AMALDI, 1997).

2.2.3 Transmissão de Calor por Irradiação – Lei de Stefan-Boltzmann

O processo de transmissão de calor por irradiação apresenta características que o distingue dos outros antes apresentados. Enquanto a condução e a convecção ocorrem somente em meios materiais, a irradiação ocorre também no vácuo. A irradiação ou radiação é o processo mais importante de propagação de calor, pois é através dela que o calor do Sol chega até a Terra. Sem esse processo não haveria vida na Terra (ÍNDIAS, 1992). Esta forma de propagação de calor ocorre através de ondas eletromagnéticas, chamadas ondas de calor ou calor radiante. Tais ondas são emitidas pelo sol e se propagam com velocidade de $3,0 \times 10^8$ m/s (MEDINA, 1997).

De um modo geral pode-se dizer que, em diferentes quantidades, todos os corpos emitem energia radiante devido a sua temperatura. Estas radiações ao serem absorvidas por outro corpo provocam nele uma elevação de temperatura (IRRADIAÇÃO TÉRMICA, 2007?).

Segundo Tashibana et al. (1994), uma onda eletromagnética, quando incide em uma superfície, pode ser refletida, absorvida ou transmitida, dependendo de sua frequência e da superfície atingida. Os fenômenos de reflexão, absorção e transmissão não ocorrem isoladamente, porém um deles pode predominar sobre os outros.

2.2.4 A radiação solar e a atmosfera terrestre

O espectro da radiação solar distribui-se por comprimentos de onda que vão de 0,15 μm a 4 μm , sendo visível apenas a zona compreendida entre 0,38 μm e 0,78 μm . Alguns acidentes como difusão, absorção, difração, refração e reflexão contribuem para reduzir a intensidade ou modificar a composição do trajeto da radiação solar através da atmosfera terrestre. De todos os acidentes, a difusão e a absorção são os que mais influem na redução da intensidade da radiação solar (ÍNDIAS, 1992).

Ainda Índias (1992) afirma que a radiação global compreende a radiação solar direta e a radiação que é difundida pelas moléculas e poeiras existentes na atmosfera. Assim, medindo-se a radiação global e a radiação difusa, ter-se-á acesso ao valor da radiação direta, calculando-se a diferença das outras duas. Isso é o que muitas estações meteorológicas fazem quando não possuem equipamentos para medir a radiação solar direta.

A insolação é o número de horas de sol por dia. No caso de um dia de céu limpo, esse número coincide com o número de horas que o sol está acima do horizonte. Quando há nuvens a encobrir o sol, a insolação é menor que este número de horas. Para medir a radiação global usam-se os piranômetros, para medir a radiação difusa utilizam-se os difusômetros, que são piranômetros aos quais se adaptou um arco metálico, de modo a fazer sombra sobre a parte sensível e evitar que a radiação solar direta incida nele. Deste modo só a radiação difusa é absorvida pela placa negra do disco do piranômetro. Quando se torna necessário conhecer com rigor o valor da radiação direta usam-se os pirheliômetros. Nestes aparelhos existe um tubo que se aponta diretamente para o sol e que só detecta os raios paralelos, através de um sistema de colimadores são eliminados todos os outros raios de direções variadas, provenientes da difusão. Uma outra característica do pirheliômetro é a de permitir medir a radiação de um determinado comprimento de onda, para isso existem filtros apropriados (ÍNDIAS, 1992).

Finalmente no que se refere à insolação, mede-se o seu valor por meio dos solarígrafos. Estes pequenos dispositivos possuem, como órgãos principais, uma lente convergente para concentrar os raios solares e uma fita de papel enegrecido que vai sendo queimada à medida que os raios solares nela incidem. Ao longo do dia e à medida que o sol no seu movimento aparente, vai percorrendo um arco no céu, o papel vai sendo queimado progressivamente, se aparecerem nuvens a encobrir o sol ficam zonas de papel por queimar (ÍNDIAS, 1992).

2.3 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Segundo Yoder (1975), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas, cujas principais funções são:

- ?? Melhorar as condições de conforto e segurança;
- ?? Resistir e distribuir os esforços causados pelo tráfego no subsolo;
- ?? Resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando-o mais durável à superfície de rolamento;
- ?? Resistir às intempéries e variações climáticas.

Ainda Yoder (1975) afirma que, de maneira geral os pavimentos podem ser classificados em rígidos e flexíveis. Pavimento rígido é aquele pouco deformável, rompe por tração na flexão, quando sujeito à deformação. Já pavimento flexível é aquele em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. É dimensionado normalmente à compressão e à tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes e ao rompimento por fadiga. É uma estrutura constituída de uma ou mais camadas de espessura finita, assente sobre um semi-espaço infinito, cujo revestimento é do tipo betuminoso. Em um pavimento flexível, o dimensionamento é comandado pela resistência do subleito. No caso geral, o pavimento flexível é constituído das seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito.

Os pavimentos flexíveis são formados pela mistura de agregados e ligantes asfálticos. O material asfáltico é o elemento cimentado que une as partículas do agregado e as mantém na posição adequada para transmitir o carregamento aplicado pelos veículos às camadas inferiores. O agregado constitui o esqueleto que suporta e transmite as cargas aplicadas na superfície do pavimento (ASPHALT INSTITUTE, 1994).

Segundo Pinto (1998), os revestimentos betuminosos têm por objetivos principais:

- ?? Suportar às cargas provenientes do tráfego;
- ?? Proteger as camadas subjacentes do pavimento;
- ?? Ter boa condição de rolamento;
- ?? Flexibilidade;
- ?? Resistir à ação abrasiva do tráfego;
- ?? Resistência ao intemperismo.

Toda rodovia pavimentada está submetida a um conjunto de esforços que possuem origem principalmente no clima e no tráfego. O clima, por sua vez, age por dois fatores principais: a temperatura e a pluviometria (DNER-DAER/RS, 1980).

2.3.1 A Ação da Temperatura nos Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos flexíveis, como já foi exposto anteriormente, são formados pela mistura de agregados e ligantes asfálticos. O material asfáltico é termo-sensível, tornando-se rígido a temperaturas baixas e fluído a altas temperaturas. "Assim, a deformabilidade maior ou menor do pavimento é condicionada pelas variações da temperatura do ar ou das condições meteorológicas de um modo geral" (MEDINA, 1997, p.59).

A temperatura é um dos aspectos do clima que deve ser destacado no projeto de pavimentos, tendo em vista sua atuação específica nos revestimentos e conseqüente efeito na deformabilidade da estrutura bem como no desempenho (MOTTA, 1991, p. 59).

Modificações sofridas pelo asfalto, como oxidação e polimerização, tornam as misturas asfálticas mais sensíveis, principalmente a baixas temperaturas, já que estas misturas são enrijecidas. Em regiões de clima temperado é comum encontrar-se pavimentos com fissuração por retração térmica e pavimentos com fissuração por fadiga induzida por variações de temperatura. As fissuras de retração ocorrem em temperaturas muito baixas (abaixo de 7 °C negativos) ou, então, quando ocorre grande queda de temperatura. Já as fissuras térmicas de fadiga ocorrem em temperaturas entre -7 °C e 21 °C (EPPS, 1997).

Em altas temperaturas podem ocorrer o descolamento e o envelhecimento do ligante. Devido à diminuição da viscosidade do ligante, este pode fluir ou exsudar, formando assim, trilhas de roda ou escorregamentos da camada tratada, que podem ser acompanhados de ruptura. Devido às altas temperaturas, os materiais tratados com ligantes betuminosos perdem parte de sua capacidade de distribuição das cargas mas, em contrapartida, se tornam mais flexíveis (DNER-DAER/RS, 1980).

2.3.2 A Ação da Chuva nos Pavimentos Flexíveis

As chuvas podem ocasionar o umedecimento do sub-leito, tornando este menos resistente e mais flexível, o que acarreta maior fadiga dos materiais constituintes da estrutura. Quando o leito da estrada é formado por material expansivo, em presença de água, este pode inchar e/ou retrain, provocando deformações na estrutura e podendo vir a rompê-la (DNER-DAER/RS, 1980).

Já o umedecimento das camadas que constituem a estrutura do pavimento pode reduzir suas características mecânicas, o atrito e a coesão e pode, também, ocasionar o deslocamento da película do ligante (DNER-DAER/RS, 1980).

O polimento dos agregados pelo tráfego torna os revestimentos mais susceptíveis à água na derrapagem. Quando as superfícies estão molhadas diminui a resistência à derrapagem e o acúmulo de óleo e resíduos dos pneumáticos também torna os pavimentos escorregadios quando chove (MEDINA, 1997).

Estes são alguns dos fatores que justificam a importância que se deve ter quanto a drenagem de uma estrada, seja ela superficial, profunda ou mesmo interna da estrutura.

2.3.3 A Pesquisa SHRP

Em 1987, um conjunto de universidades americanas e órgãos governamentais estabeleceu o Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária – Strategic Highway Research Program - SHRP, que desenvolveu um novo sistema de especificação de materiais asfálticos. O novo sistema denominado SUPERPAVE™ (Superior PERformance Asphalt PAVements – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior) é o produto final desse programa de pesquisa. As especificações americanas de cimento asfáltico, assim como as brasileiras, baseiam-se nos ensaios de penetração a 25 °C e viscosidade a 60 °C. Os pesquisadores do SHRP não concordando com o empirismo destas especificações desenvolveram requisitos com base em ensaios reológicos com critérios relacionados ao desempenho em serviço (LEITE, 1999).

O sistema SUPERPAVE™ é o único que se baseia no grau de desempenho (PG – *Performance Grade*) do material para especificação do ligante, sob as condições climáticas e de tráfego específicas. O desempenho é apresentado por dois valores, o grau de alta e de baixa temperatura. Além disso, devem ser feitas considerações adicionais em relação ao tráfego, como volume e tempo de aplicação de carga, selecionando um ligante com PG superior ao especificado (ASPHALT INSTITUTE, 1994).

2.3.4 Modelos de Previsão de Temperatura

Os primeiros estudos realizados pelo programa SHRP (ASPHALT INSTITUTE, 1994) para a estimar as máximas temperaturas do pavimento estabeleceram a Equação 1. A temperatura máxima do pavimento corresponde à temperatura à 2 cm de profundidade.

$$T_{2\text{cm}} = 0,9545 (T_{\text{ar}} - 0,0061 \text{ lat}^2 + 0,2289 \text{ lat} + 42,2) - 17,78 \text{ (Equação 1)}$$

onde: $T_{2\text{cm}}$ = temperatura do pavimento à 2 cm de profundidade em °C,

T_{ar} = média da temperatura máxima de 7 dias consecutivos em °C,

lat = latitude de projeto em graus.

Já a temperatura inferior do pavimento no SUPERPAVE™ é determinada de dois modos. O primeiro admite que a temperatura do pavimento é igual a temperatura mínima do ar, o que deve ser muito bem analisado, já que a temperatura do pavimento geralmente é superior a do ar. O segundo modo utiliza a Equação 2 para a determinação da temperatura mínima do pavimento.

$$T_{\text{min}} = 0,859 T_{\text{ar}} + 1,7 \text{ °C (Equação 2)}$$

onde: T_{min} = temperatura mínima de pavimento de projeto em °C,

T_{ar} = temperatura mínima do ar em um ano típico em °C.

Já Rodrigues apud Motta (1991), desenvolveu a Equação 3 para a determinação da temperatura do pavimento.

$$T(x) = T_{\text{sup}} + (T_{\text{sup}} - T_{\text{ar}}) [1 - \exp (0,06855 - 0,002633 x) x]$$

(Equação 3)

onde: $T(x)$ = temperatura na profundidade x do revestimento,

T_{sup} = temperatura da superfície do pavimento,

T_{ar} = temperatura do ar próxima ao pavimento

Motta (1991), em sua tese de doutorado, desenvolveu diferentes equações para cada região do Brasil. Para a região sul, que é o caso do estudo, apresentou 2 equações. A Equação 4 é utilizada para concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), cujas temperaturas foram medidas entre 3 e 4 cm de profundidade, em camadas de até 6 cm de espessura, para temperaturas do revestimento entre 14 °C e 60 °C e para temperaturas do ar entre 12 °C e 37 °C.

$$T_{rev} = - 6,51 + 1,61 T_{ar} \text{ (Equação 4)}$$

Para temperaturas medidas em CBUQ entre 5 e 7 cm de profundidade, em revestimentos com espessura entre 8 e 11,5 cm, Motta (1991) apresentou a Equação 5, sendo que a temperatura do revestimento deve estar entre 13 °C e 63 °C e a temperatura do ar deve estar entre 8 °C e 39 °C.

$$T_{rev} = -1,18 + 1,45 T_{ar} \text{ (Equação 5)}$$

Gonçalves et al. (2002) apresentam a Equação 6 para previsão da temperatura de pavimentos na profundidade de 5 cm e a Equação 7 para temperatura a 9 cm de profundidade.

$$T_{5\text{ cm}} = 1,0469 T_{ar} + 4,9618 \text{ (Equação 6)}$$

$$T_{9\text{ cm}} = 0,9898 T_{ar} + 4,0849 \text{ (Equação 7)}$$

Nos anos de 2000 e 2001, Viera (2002) apud Núñez et al. (2003), mediu temperaturas nas profundidades de 5 cm e 9 cm, bem como registrou as temperaturas do ar e a irradiação solar. Com os dados coletados propôs as Equações 8 e 9.

$$T_{5 \text{ cm}} = 2,6 + 0,88 T_{\text{ar}} + 0,014 \text{ Irrad (Equação 8)}$$

$$T_{9 \text{ cm}} = 3,0 + 0,92 T_{\text{ar}} + 0,006 \text{ Irrad (Equação 9)}$$

onde: $T_{5 \text{ cm}}$ = temperatura, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 5 cm de profundidade;

$T_{9 \text{ cm}}$ = temperatura, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 9 cm de profundidade;

T_{ar} = temperatura do ar, em °C,

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

Com o objetivo de aperfeiçoar as Equações 8 e 9 e melhor analisar a distribuição de temperaturas no interior do pavimento, medições foram realizadas, de setembro de 2002 a maio de 2003, às profundidades de 1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm e 9 cm, bem como na superfície do pavimento. As Equações 10 e 11 foram, então, propostas por Núñez et al. (2003).

$$T_{5 \text{ cm}} = 1,11 T_{\text{ar}} + 0,012 \text{ Irrad} - 0,25 \text{ (Equação 10)}$$

$$T_{9 \text{ cm}} = 1,19 T_{\text{ar}} + 0,006 \text{ Irrad} - 1,02 \text{ (Equação 11)}$$

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo teve como propósito obter modelos de correlação da temperatura do pavimento com a temperatura do ar, para as cidades de Ijuí e Sobradinho.

A pesquisa realizada foi do tipo quantitativa, sendo que os dados coletados, através de medições, foram submetidos à análise estatística. Esta forma de tratamento de dados já foi utilizada por Gonçalves et al. (2002), Motta (1991) e Núñez et al. (2003), com dados de natureza semelhante aos apresentados nesta pesquisa.

3.2 COLETA DE DADOS

Para a realização deste trabalho foram feitos oito furos em pavimentos flexíveis, executados com misturas asfálticas, dos quais quatro foram feitos na cidade de Ijuí e quatro na cidade de Sobradinho. De cada quatro furos, um par esteve exposto ao sol, enquanto que o outro par à sombra, em ambas as cidades. Cada par de furos era composto por um furo de 2 cm de profundidade e outro de 5 cm de profundidade.

Também foram medidas as temperaturas da superfície do pavimento (no sol e na sombra). As leituras foram realizadas entre 07 de maio e 28 de novembro do ano de 2003.

3.2.1 Caracterização dos locais de estudo

O município de Ijuí está situado na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul (veja Figura 4), na latitude 28° 23' 17" Sul e longitude 53° 54' 50" Oeste e à 409,80 m acima do nível do mar. O clima da região é subtropical úmido, sem estação seca. As temperaturas observadas mostram uma máxima de 38 °C, no mês de janeiro, e uma mínima de 4 °C, no mês de julho, sendo que a média anual oscila em torno de 21 °C (IJUÍ – ATLAS ESCOLA, 1994).

A pluviosidade anual em Ijuí está na faixa de 1.600 mm, com uma média de 100 dias de chuva por ano. O mês mais seco é janeiro e o excedente hídrico médio anual é de 350 a 400 mm, de maio a outubro (IJUÍ – GUIA TURÍSTICO E MAPA, 2001).

O município de Sobradinho localiza-se na região Centro Serra do estado do Rio Grande do Sul, indicado na Figura 4, mais precisamente, na latitude 29° 25' 15" Sul e longitude 53° 17' 24" Oeste. A cidade está a 450 m acima do nível do mar (SOBRADINHO – GUIA TURÍSTICO, 2003).

Os meses mais quentes do ano são novembro e dezembro, com temperaturas oscilando entre 30 °C e 40 °C, principalmente entre os dias 20 de novembro e 15 de dezembro. Os meses mais frios são julho e agosto, com temperaturas mínimas médias entre 7 °C e 9 °C e com máximas médias entre 19 °C e 21 °C. A média de chuvas no município é de 2.056,80 mm (SOBRADINHO – GUIA TURÍSTICO, 2003).

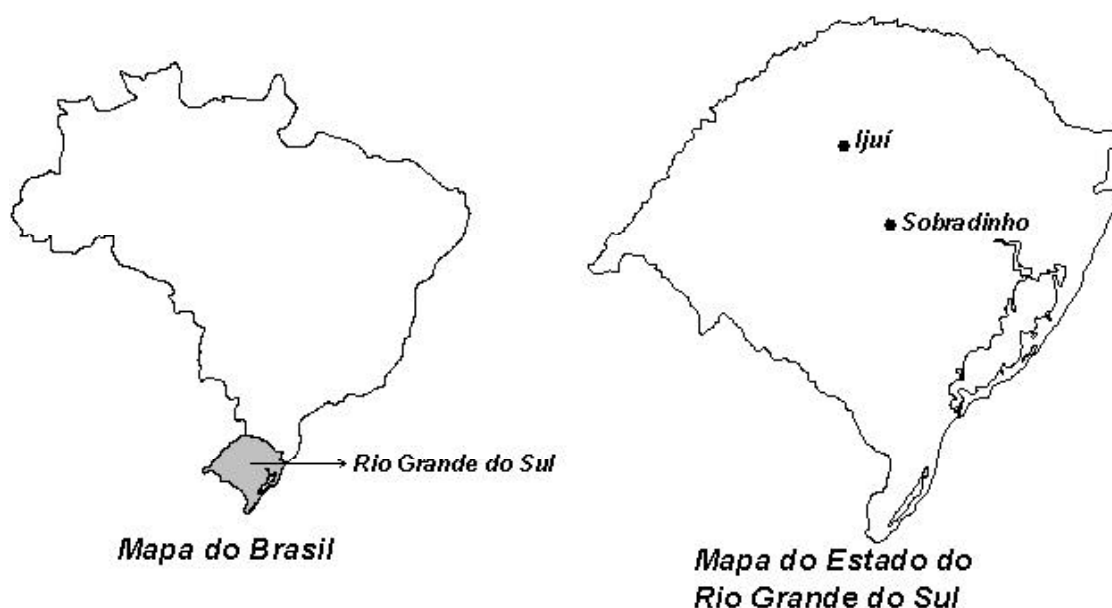


Figura 4: Localização dos municípios estudados

3.2.2 Caracterização do instrumento de medida

Os dados do trabalho foram coletados através de um termômetro digital, ilustrado na Figura 5. O termômetro possui resolução de 0,1 °C, com precisão de 0,8% da faixa \pm último dígito. A frequência de amostragem do termômetro é de três leituras por segundo.

Os dados medidos foram: a temperatura do ar, a temperatura da superfície do pavimento, tanto à sombra quanto ao sol, e as temperaturas no interior da camada asfáltica, nas profundidades de 2cm e 5cm, no sol e na sombra. Essas medições foram realizadas em diferentes horas do dia, a fim de se obter o maior número de dados que pudessem expressar o comportamento dos pavimentos flexíveis em relação aos fatores ambientais.

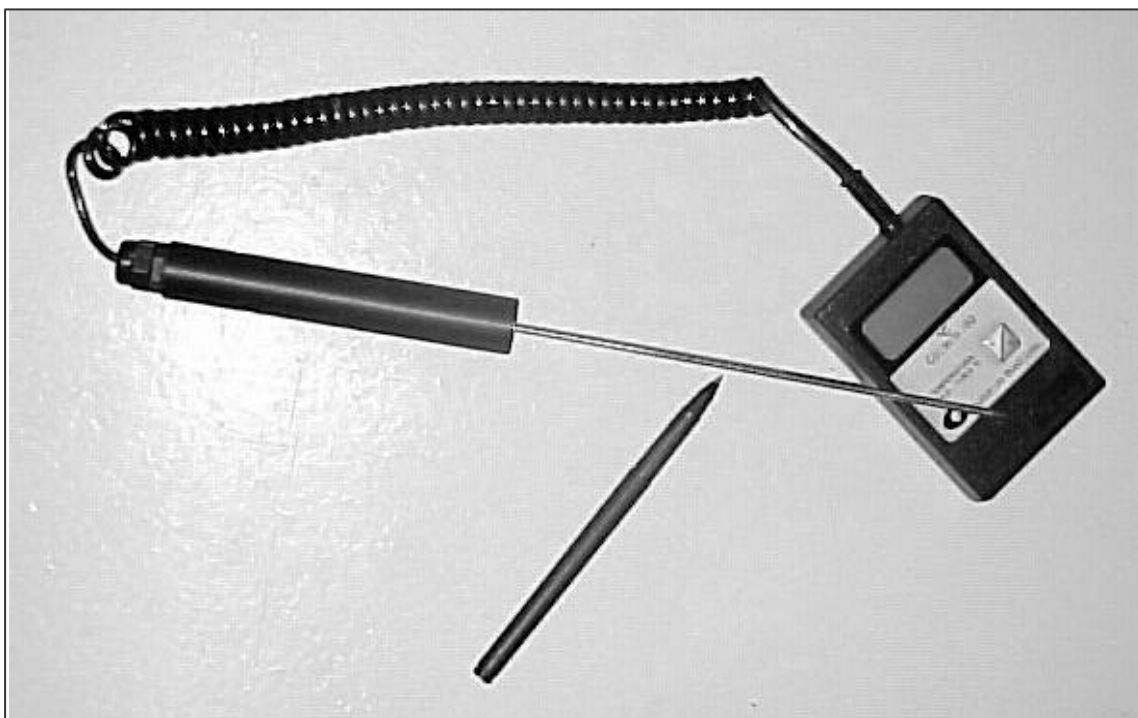


Figura 5: Termômetro digital empregado para medir as temperaturas

Durante o período de coleta de dados, embora havendo modificação no horário (horário brasileiro de verão), o horário das medições não foi alterado. Isso significa que a partir de 19 de outubro de 2003 o horário de leitura está uma hora atrasado em relação ao horário oficial brasileiro.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS CAMADAS ASFÁLTICAS AO LONGO DO DIA

Com a análise do comportamento térmico das camadas asfálticas ao longo do dia, percebe-se a notável diferença de amplitudes térmicas diárias entre o pavimento asfáltico e o ar. Nota-se, também, que nas primeiras horas da manhã a temperatura do ar é muito próxima, ou até superior a temperatura do pavimento. À tarde, devido à insolação, há uma diferença bem maior entre a temperatura do ar e a do pavimento, como pode ser visto na Figura 6.

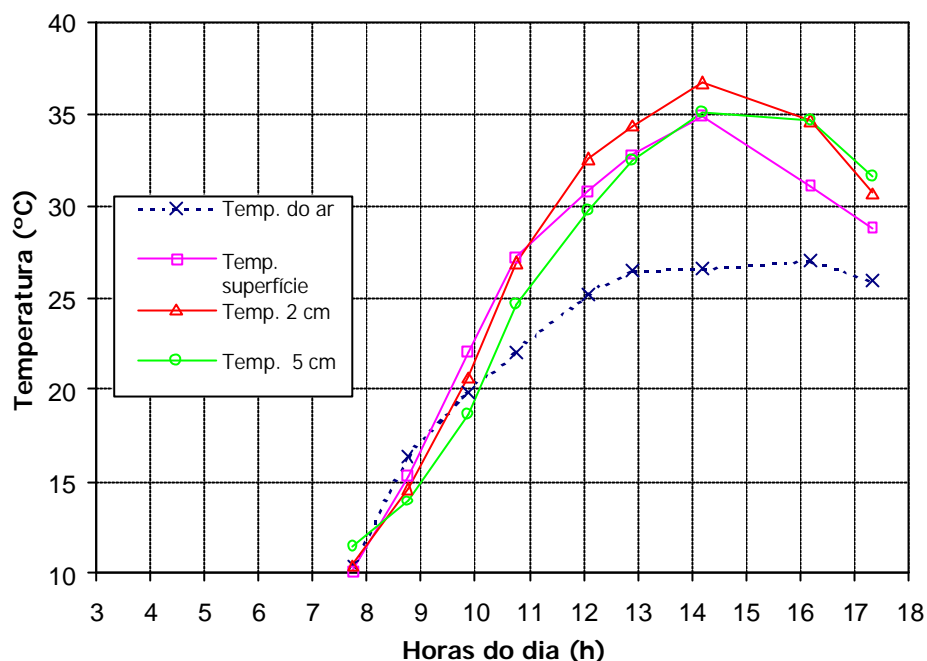


Figura 6: Variação da temperatura do ar e das camadas asfálticas ao longo do dia

No que se refere à influência da radiação solar na temperatura do revestimento, é interessante observar os gradientes térmicos registrados em 03 de setembro de 2003, mostrados na Figura 7. Percebe-se que nas primeiras horas do dia a temperatura à 5 cm de profundidade é maior que a temperatura da superfície do pavimento (0 cm). Com o aumento da temperatura do ar, a temperatura da superfície passa a ser maior que as temperaturas à 2 e à 5 cm de profundidade. A temperatura do pavimento se eleva até, aproximadamente, às 14 horas.

Próximo das 16 horas começa a haver uma inversão. As maiores temperaturas são registradas à 5 cm e as menores na superfície do pavimento. Essa inversão ocorre devido ao resfriamento do ar, consequência da diminuição da irradiação. Como a superfície está em contato direto com o ar, essa se resfria mais rapidamente. Enquanto que, quanto mais profunda a camada do pavimento, mais devagar será o resfriamento. O mesmo processo ocorre para o aquecimento, ou seja, com o aumento

da temperatura do ar, a superfície do pavimento aumenta rapidamente de temperatura, enquanto que as camadas mais profundas se aquecem mais lentamente.

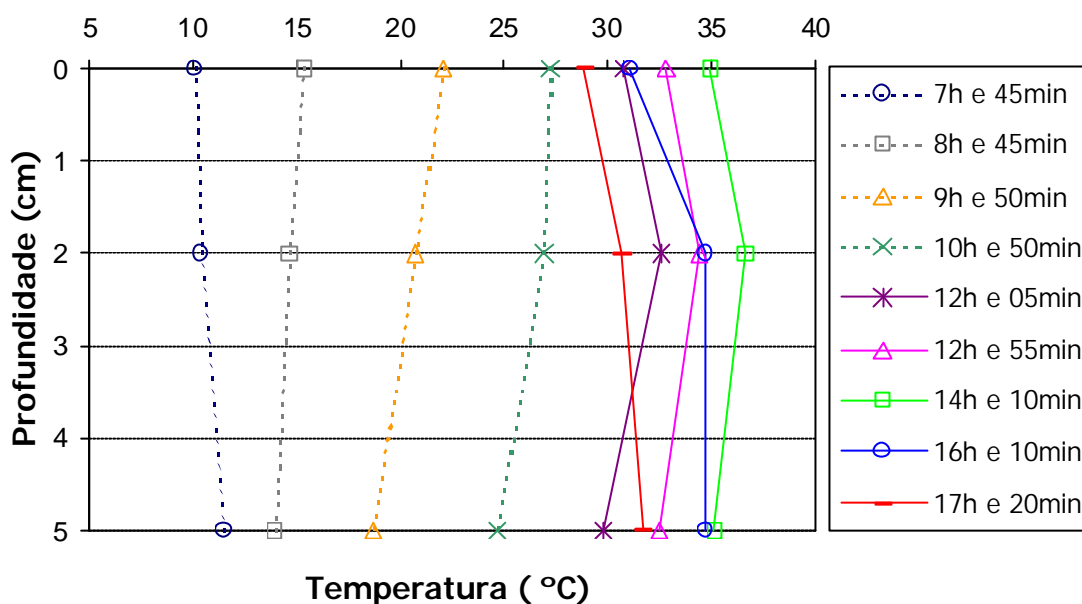


FIGURA 7: Gradientes térmicos no interior do revestimento

Registrou-se, para um dia típico de sol de primavera (20/11/2003), gradiente térmico do ar de aproximadamente 8 °C, enquanto na superfície do pavimento mediu-se uma variação de 19,30 °C. Nas profundidades 2 e 5 cm as variações térmicas foram de 23,90 °C e 24,20 °C, respectivamente. As máximas temperaturas do ar e da superfície do pavimento registradas nesse dia ocorreram às 15 horas e 20 minutos enquanto que as máximas registradas para as profundidades 2 e 5 cm ocorreram às 14 horas e 15 minutos.

4.2 MODELOS DE TEMPERATURA DO PAVIMENTO *VERSUS* TEMPERATURA DO AR

Para o estabelecimento dos modelos a seguir utilizou-se o software Excel versão 7, de 1998, da Microsoft Corporation.

4.2.1 Ijuí

Entre os meses de maio e setembro mediu-se a temperatura nas profundidades de 2 e 5 cm, bem como, a temperatura superficial do pavimento e a temperatura do ar, na cidade de Ijuí. Os dados obtidos podem ser verificados no ANEXO A.

Foram desenvolvidos modelos de previsão de temperatura máxima (exposto ao sol) e temperatura mínima (à sombra). Para ambos os casos, obteve-se modelos que prevêem a temperatura superficial do pavimento e a temperatura a 2 e a 5 cm de profundidade.

Para temperaturas máximas os modelos desenvolvidos para Ijuí são:

$$T_{\text{sup}} = 2,28 + 1,09 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 12)}$$

$$T_{2 \text{ cm}} = 0,48 + 1,23 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 13)}$$

$$T_{5 \text{ cm}} = -0,06 + 1,28 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 14)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C, $T_{2\text{ cm}}$ e $T_{5\text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente, e T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C.

A Figura 8 a, b e c apresenta os modelos gráficos das Equações 12, 13 e 14. Onde pode ser visto que a Equação 12 possui um R^2 de 0,82, a Equação 13 um R^2 de 0,75 e a Equação 14 um R^2 de 0,68. Apesar de possuírem um erro significativo (R^2 baixo), há uma boa distribuição de dados entre 12 e 27 °C para os três casos, o que valida o modelo apenas para este intervalo.

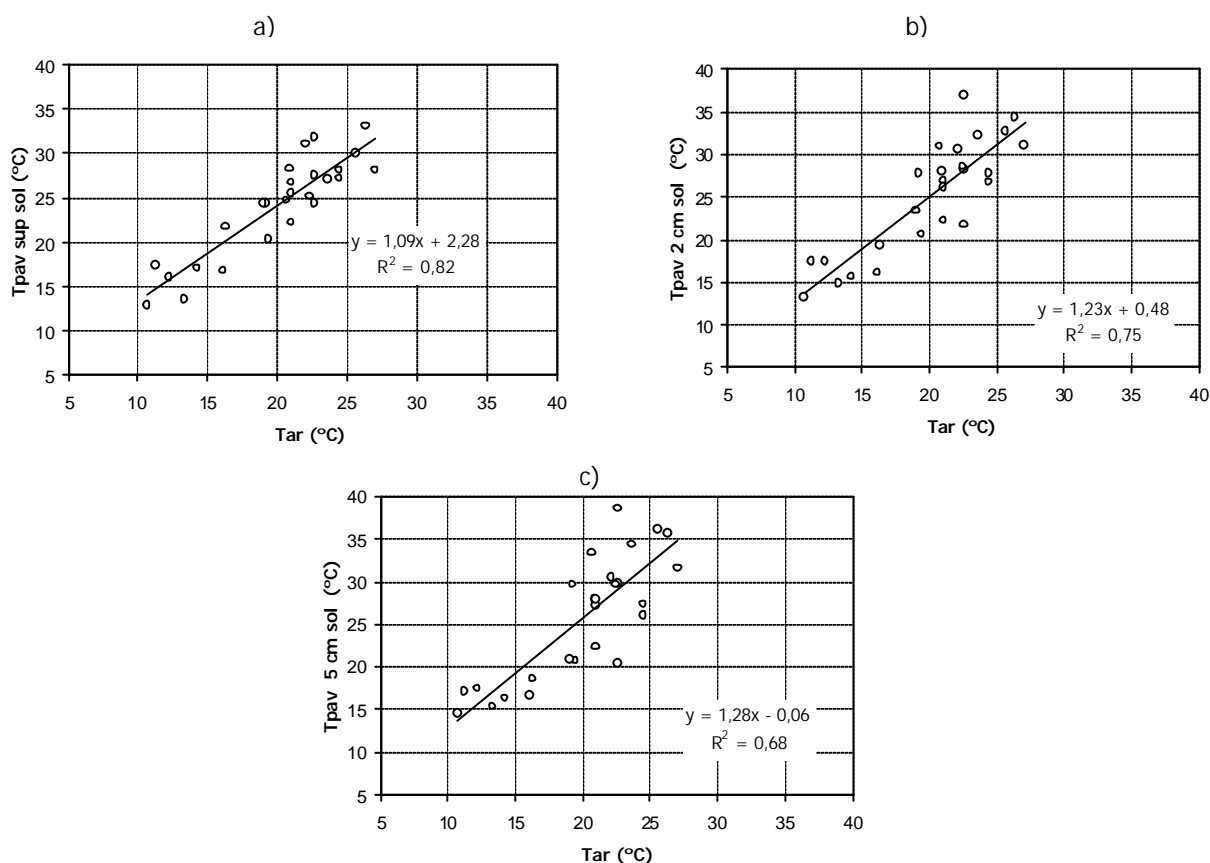


Figura 8: Gráficos de regressão linear para a temperatura máxima na cidade de Ijuí:

- a) temperatura do ar *versus* temperatura na superfície
- b) temperatura do ar *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
- c) temperatura do ar *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

Para temperaturas mínimas os modelos desenvolvidos para Ijuí são:

$$T_{\text{sup}} = - 0,50 + 1,04 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 15)}$$

$$T_{2 \text{ cm}} = - 1,21 + 1,07 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 16)}$$

$$T_{5 \text{ cm}} = - 0,09 + 1,00 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 17)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C, $T_{2 \text{ cm}}$ e $T_{5 \text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente, e T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C.

A Figura 9 a, b e c apresenta os modelos gráficos das Equações 15, 16 e 17. Onde pode ser visto que a Equação 15 possui um R^2 de 0,90, a Equação 16 um R^2 de 0,88 e a Equação 17 um R^2 de 0,84. As equações geradas para temperaturas mínimas apresentam um R^2 maior do que as geradas para temperaturas máximas. O que pode ser explicado pelo fato de, neste caso, a irradiação ser menos significativa que no caso exposto ao sol, como era de se esperar.

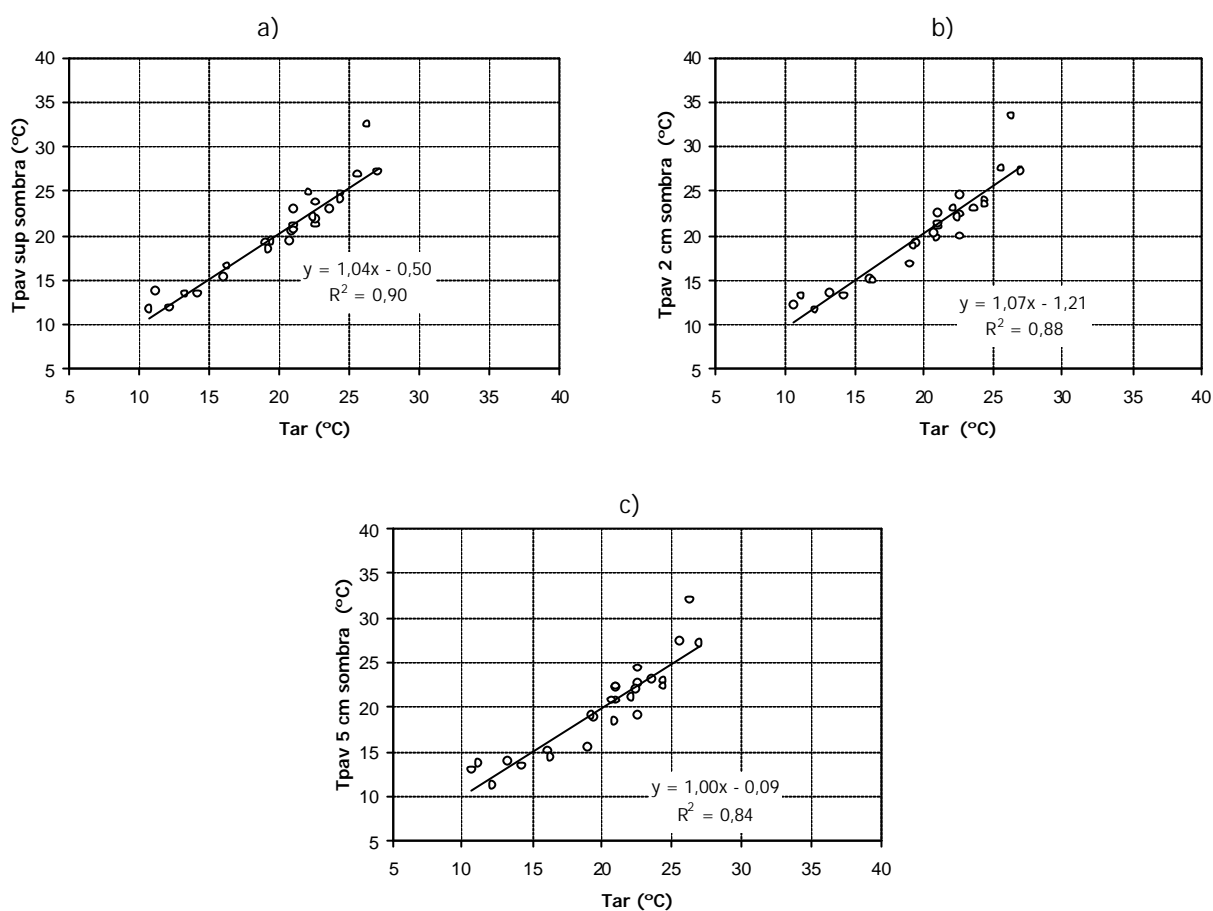


Figura 9: Gráficos de regressão linear para a temperatura mínima na cidade de Ijuí:
 a) temperatura do ar *versus* temperatura na superfície
 b) temperatura do ar *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
 c) temperatura do ar *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

4.2.2 Sobradinho

Entre os meses de setembro e novembro mediu-se a temperatura nas profundidades de 2 e 5 cm, bem como, a temperatura superficial do pavimento e a temperatura do ar, na cidade de Sobradinho. Os dados obtidos podem ser vistos no ANEXO B.

Para Sobradinho foram desenvolvidos modelos de previsão de temperatura máxima (exposto ao sol) e temperatura mínima (à sombra). Para ambos os casos obteve-se modelos que prevêem a temperatura superficial do pavimento e a temperatura a 2 e a 5 cm de profundidade.

Para temperaturas máximas os modelos desenvolvidos para Sobradinho são:

$$T_{\text{sup}} = - 0,40 + 1,35 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 18)}$$

$$T_{2 \text{ cm}} = - 1,08 + 1,47 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 19)}$$

$$T_{5 \text{ cm}} = 0,30 + 1,44 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 20)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C, $T_{2 \text{ cm}}$ e $T_{5 \text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente, e T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C.

A Figura 10 a, b e c apresenta os modelos gráficos das Equações 18, 19 e 20. Onde pode ser visto que a Equação 18 possui um R^2 de 0,68, a Equação 19 um R^2 de 0,59 e a Equação 20 um R^2 de 0,50. As equações de temperatura máxima geradas para Sobradinho apresentam um erro muito maior que as geradas para Ijuí. Esse erro deve-se ao fato de as medições feitas em Sobradinho terem sido realizadas em um período maior, havendo uma variação de clima neste período, o que aumenta a variabilidade dos dados. Percebe-se que existe um elemento que não consta nessas equações e que está diretamente ligado à maior ou menor elevação da temperatura do pavimento, a irradiação.

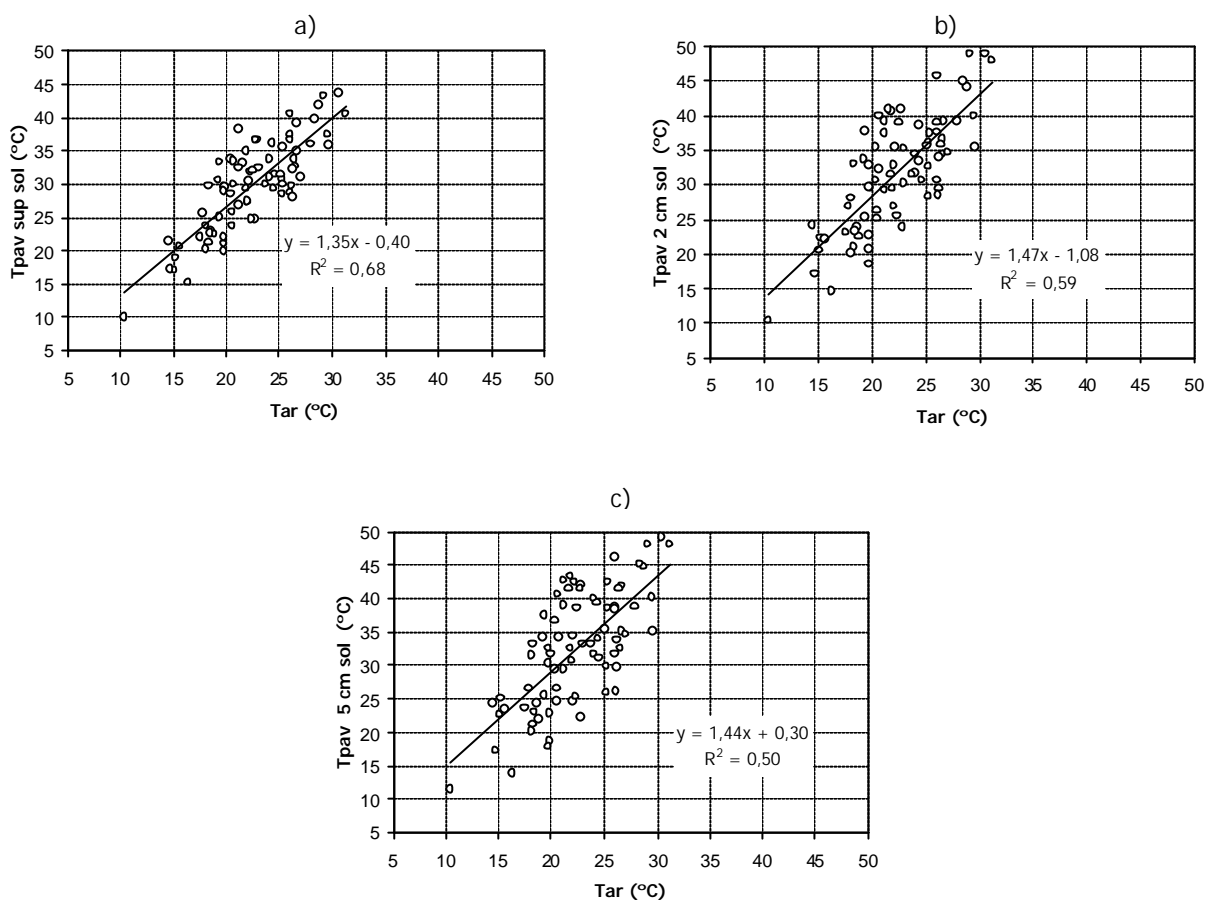


Figura 10: Gráficos de regressão linear para a temperatura máxima na cidade de Sobradinho:

- a) temperatura do ar *versus* temperatura na superfície
- b) temperatura do ar *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
- c) temperatura do ar *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

Para temperaturas mínimas os modelos desenvolvidos para Sobradinho são:

$$T_{sup} = 3,57 + 1,02 T_{ar} \text{ (Equação 21)}$$

$$T_{2\ cm} = 6,55 + 0,94 T_{ar} \text{ (Equação 22)}$$

$$T_{5\ cm} = 5,99 + 0,99 T_{ar} \text{ (Equação 23)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C, $T_{2\text{ cm}}$ e $T_{5\text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente, e T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C.

A Figura 11 a, b e c apresenta os modelos gráficos das Equações 21, 22 e 23. Onde pode ser visto que a Equação 21 possui um R^2 de 0,70, a Equação 22 um R^2 de 0,47 e a Equação 23 um R^2 de 0,45. As equações geradas para temperaturas mínimas em Sobradinho apresentam um erro maior do que as geradas para Ijuí, principalmente para as profundidades de 2 e 5 cm. Explica-se esse erro devido a exposição dos furos, que deveriam estar à sombra, ficarem ao sol no período da manhã.

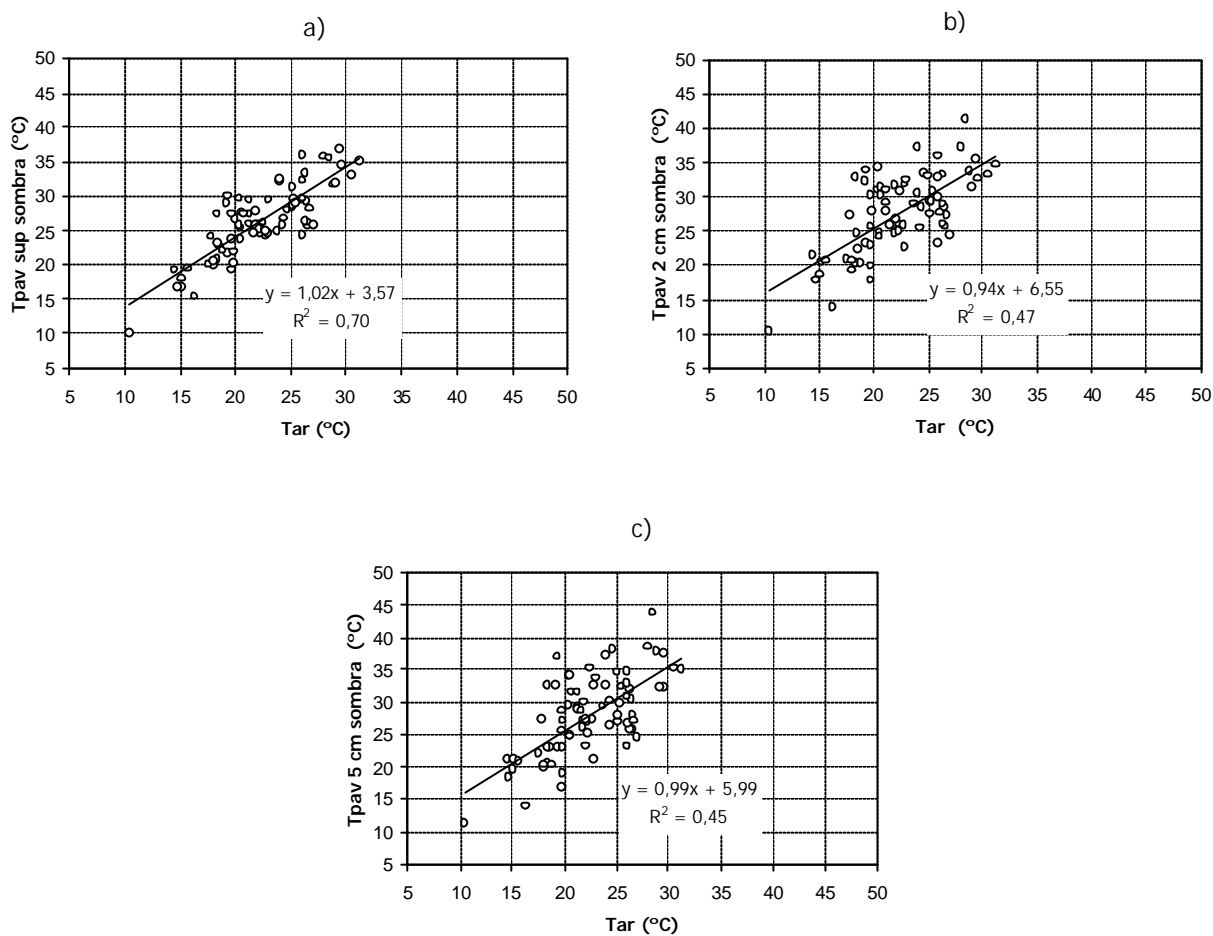


Figura 11: Gráficos de regressão linear para a temperatura mínima na cidade de Sobradinho:

- a) temperatura do ar *versus* temperatura na superfície
- b) temperatura do ar *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
- c) temperatura do ar *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

4.2.3 Modelo Global

Embora as duas cidades em estudo localizarem-se em regiões distintas do estado do Rio Grande do Sul, ambas possuem a mesma classificação climática, segundo bibliografia consultada. Sendo assim, utilizaram-se os dados obtidos em ambas as

regiões e desenvolveram-se modelos que tivessem maior abrangência, podendo ser utilizados em regiões de clima subtropical.

Estes modelos, igualmente aos já apresentados no trabalho, prevêm temperatura máxima (exposto ao sol) e temperatura mínima (à sombra). Para ambos os casos as temperaturas previstas são: a da superfície do pavimento e à 2 e 5 cm de profundidade.

Para temperaturas máximas os modelos globais desenvolvidos são:

$$T_{\text{sup}} = - 0,72 + 1,34 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 24)}$$

$$T_{2 \text{ cm}} = - 2,10 + 1,48 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 25)}$$

$$T_{5 \text{ cm}} = - 1,39 + 1,48 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 26)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C, $T_{2 \text{ cm}}$ e $T_{5 \text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente, e T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C.

A Figura 12 a, b e c apresenta os modelos gráficos das Equações 24, 25 e 26, onde pode ser visto que a Equação 24 possui um R^2 de 0,71, a Equação 25 um R^2 de 0,63 e a Equação 26 um R^2 de 0,56. Apesar de possuírem um erro significativo (R^2 baixo), há uma boa distribuição de dados entre 17 e 27 °C para os três casos, o que valida o modelo apenas para este intervalo.

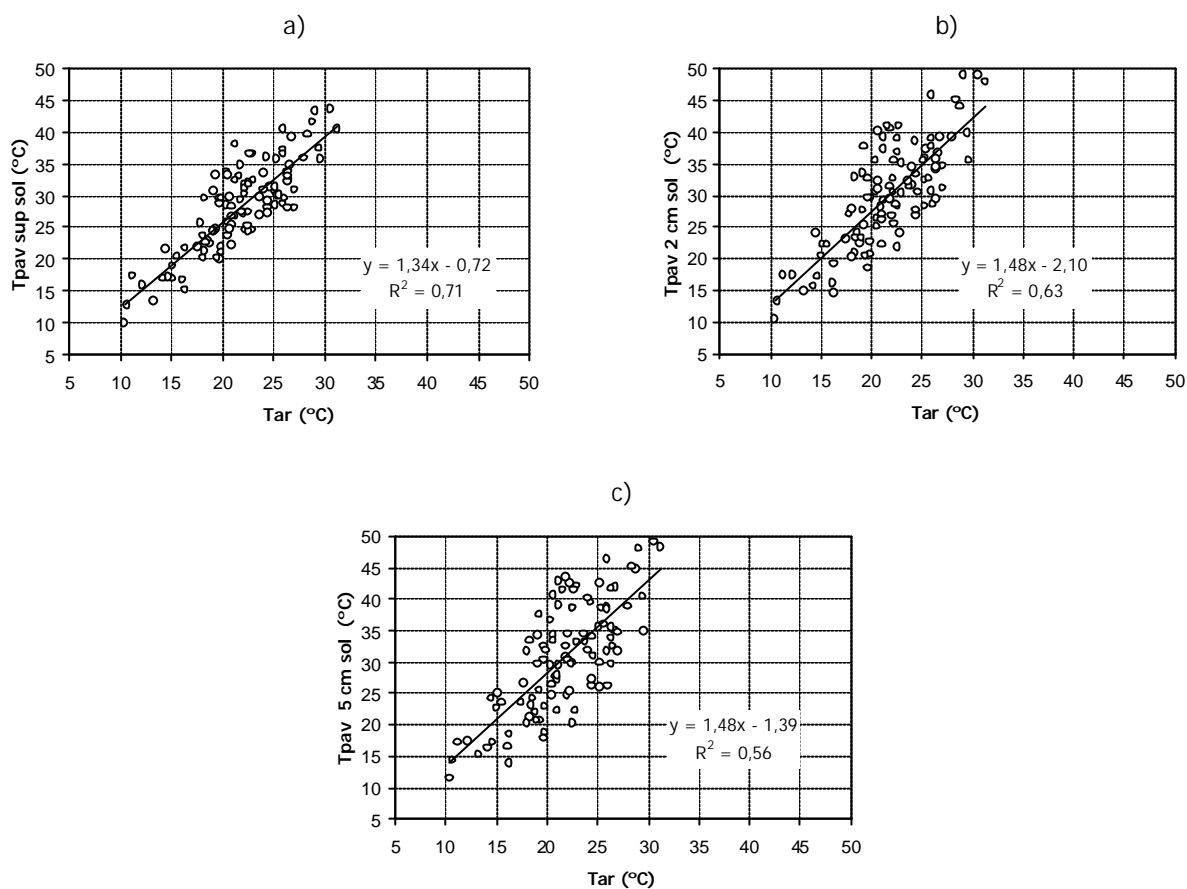


Figura 12: Gráficos de regressão linear para temperatura máxima em regiões de clima subtropical:

- a) temperatura do ar *versus* temperatura na superfície
- b) temperatura do ar *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
- c) temperatura do ar *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

Para temperaturas mínimas os modelos globais desenvolvidos são:

$$T_{\text{sup}} = 0,78 + 1,11 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 27)}$$

$$T_{2 \text{ cm}} = 1,98 + 1,09 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 28)}$$

$$T_{5 \text{ cm}} = 1,60 + 1,12 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 29)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C, $T_{2\text{ cm}}$ e $T_{5\text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente, e T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C.

A Figura 13 a, b e c apresenta os modelos gráficos das Equações 27, 28 e 29, onde pode ser visto que a Equação 27 possui um R^2 de 0,71, a Equação 28 um R^2 de 0,63 e a Equação 29 um R^2 de 0,56. Apesar de possuírem um R^2 baixo, o modelo é válido entre 17 e 27 °C, para os três casos, onde há uma boa distribuição de dados.

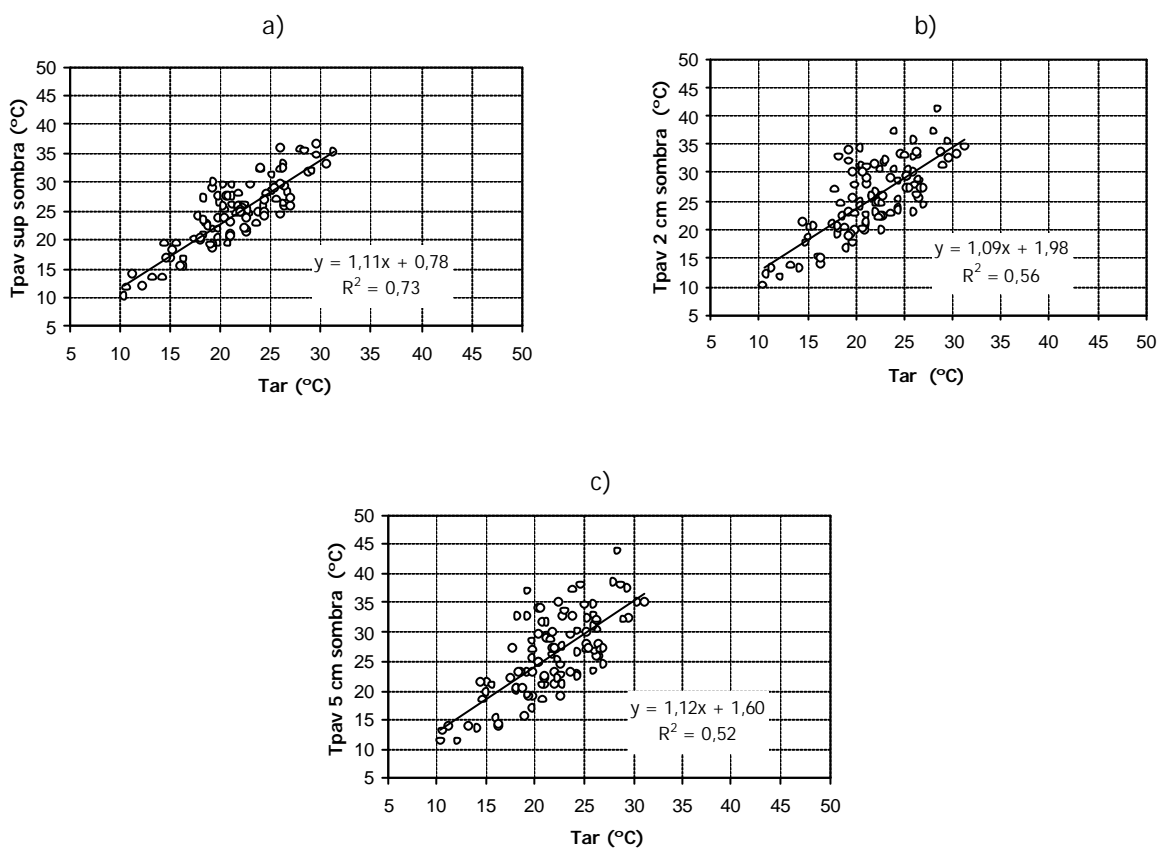


Figura 13: Gráficos de regressão linear para temperatura mínima em regiões de clima subtropical:

- a) temperatura do ar *versus* temperatura na superfície
- b) temperatura do ar *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
- c) temperatura do ar *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

4.3 MODELOS DE TEMPERATURA DO PAVIMENTO *VERSUS* TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

Levando-se em consideração que os modelos anteriormente desenvolvidos apresentam erros consideráveis, percebe-se que um fator muito importante não está sendo utilizado, a irradiação.

Inicialmente buscou-se utilizar valores de irradiação nos modelos. No caso de Ijuí, a irradiação fornecida pelo centro meteorológico da cidade era apenas a média do dia. Este valor não poderia ser utilizado, já que se necessitava de valores de irradiação correspondentes ao momento (horário exato) da medição da temperatura em campo. Já no caso de Sobradinho a dificuldade de se obter esses dados era ainda maior, pois a cidade não possui nenhum centro de meteorologia.

Tais fatos levaram os pesquisadores a uma pergunta: Para que serve desenvolver modelos com uma variável que não poderá ser utilizada por falta de dados?

Através dessa pergunta e de conhecimentos prévios obtidos pela revisão de literatura, chegou-se ao consenso de que o valor da irradiação estaria envolvido com a temperatura superficial do pavimento.

Através do conhecimento da temperatura superficial do pavimento desenvolveu-se modelos de previsão de temperatura para as profundidades de 2 e 5 cm. As temperaturas previstas são a máxima, utilizado-se os dados coletados ao sol, e a mínima, utilizado-se os dados coletados à sombra.

4.3.1 Ijuí

Para Ijuí os modelos de previsão da temperatura máxima, através do conhecimento da temperatura superficial do pavimento são:

$$T_{2\text{ cm}} = - 1,77 + 1,11 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 30)}$$

$$T_{5\text{ cm}} = - 2,27 + 1,16 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 31)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C e $T_{2\text{ cm}}$ e $T_{5\text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente.

A Figura 14 a e b apresenta os modelos gráficos das Equações 30 e 31. Nessa figura pode ser visto que a Equação 30 possui um R^2 de 0,89 e a Equação 31 um R^2 de 0,80. Comparando esses modelos com os apresentados para a mesma situação no item 4.2.1, percebe-se que o coeficiente de correlação R^2 aumenta indicando uma redução do erro. Tal fato é explicado pelo que já era previsto: a importância do fator irradiação. Esse fator está indiretamente contido no modelo através da temperatura da superfície do pavimento.

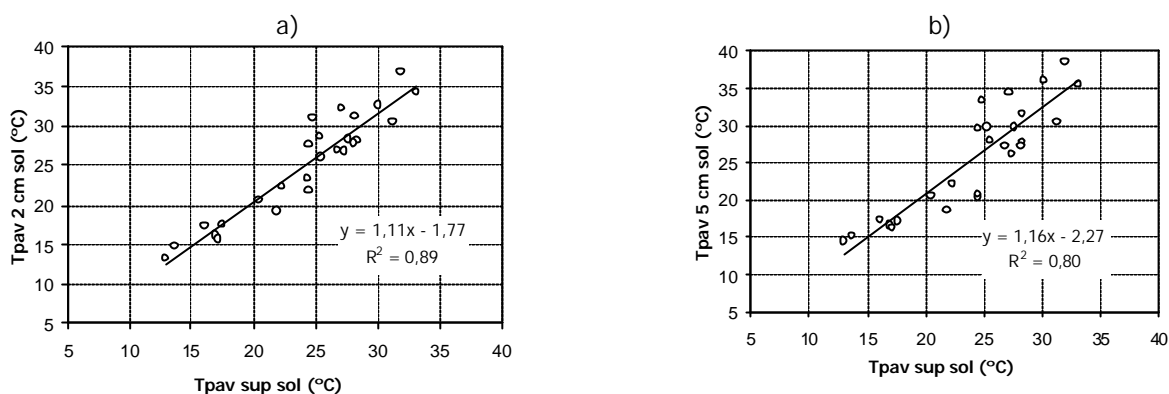


Figura 14: Gráficos de regressão linear para temperatura máxima em Ijuí:
 a) temperatura da superfície *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
 b) temperatura da superfície *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

Para Ijuí os modelos de previsão da temperatura mínima, através do conhecimento da temperatura superficial do pavimento são:

$$T_{2\ cm} = - 0,72 + 1,03 T_{sup} \text{ (Equação 32)}$$

$$T_{5\ cm} = 0,49 + 0,95 T_{sup} \text{ (Equação 33)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C e $T_{2\ cm}$ e $T_{5\ cm}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente.

A Figura 15 a e b apresenta os modelos gráficos das Equações 32 e 33. Onde pode ser visto que a Equação 32 possui um R^2 de 0,98 e a Equação 33 um R^2 de 0,92. Comparando esses modelos com os apresentados para a mesma situação no item 4.2.1, percebe-se que o erro é pequeno, o que leva a acreditar que, apesar de não haver incidência direta do sol, a irradiação é tão importante à sombra quanto ao sol.

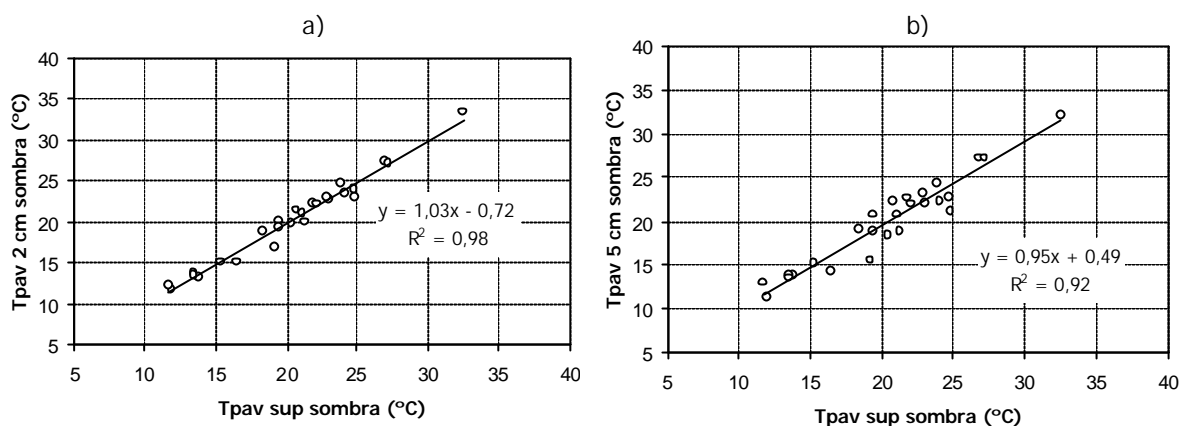


Figura 15: Gráficos de regressão linear para temperatura mínima em Ijuí:
 a) temperatura da superfície *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
 b) temperatura da superfície *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

4.3.2 Sobradinho

Para Sobradinho os modelos de previsão da temperatura máxima, através do conhecimento da temperatura superficial do pavimento são:

$$T_{2\text{ cm}} = - 1,92 + 1,13 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 34)}$$

$$T_{5\text{ cm}} = - 2,57 + 1,18 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 35)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C e $T_{2\text{ cm}}$ e $T_{5\text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente.

A Figura 16 a e b apresenta os modelos gráficos das Equações 34 e 35, onde pode ser visto que a Equação 34 possui um R^2 de 0,93 e a Equação 35 um R^2 de 0,89. Comparando esses modelos com os apresentados para a mesma situação no item

4.2.2, percebe-se que o erro diminui, uma vez que, o fator irradiação, que tem influência na temperatura dos pavimentos, está indiretamente contido no modelo através da temperatura da superfície do pavimento.

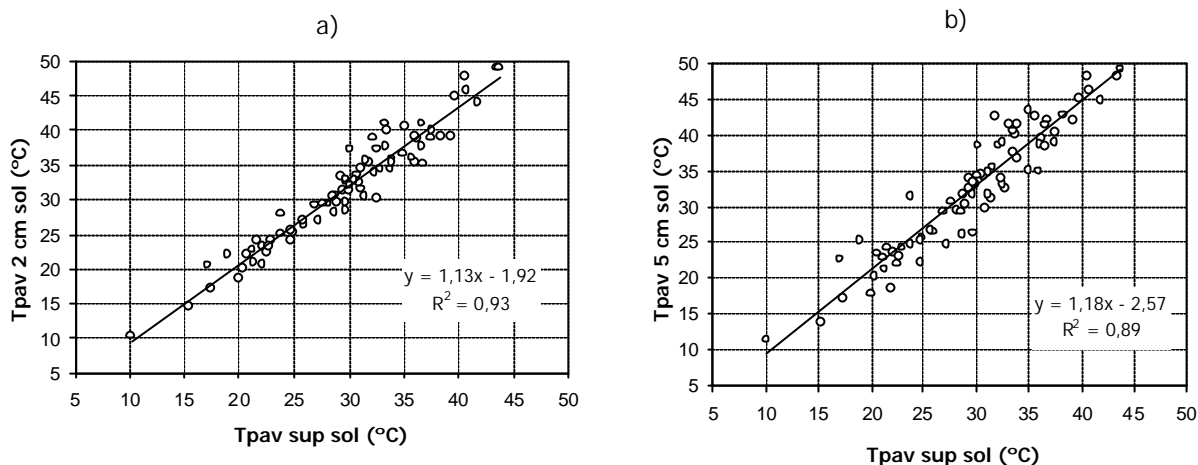


Figura 16: Gráficos de regressão linear para temperatura máxima em Sobradinho:
 a) temperatura da superfície *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
 b) temperatura da superfície *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

Os modelos, embora altamente significativos (coeficiente de determinação $R^2 = 93\%$ e 89%), foram estabelecidos a partir de uma base de dados que incorporava poucas medidas de temperaturas do ar muito baixas. De fato, os intervalos de variação de temperaturas eram:

$$T_{ar}: [10,40^{\circ}\text{C}; 31,20^{\circ}\text{C}]$$

Para Sobradinho os modelos de previsão da temperatura mínima, através do conhecimento da temperatura superficial do pavimento são:

$$T_{2\text{ cm}} = 0,24 + 1,04 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 36)}$$

$$T_{5\text{ cm}} = -0,30 + 1,08 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 37)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C e $T_{2\text{ cm}}$ e $T_{5\text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente.

A Figura 17 a e b apresenta os modelos gráficos das Equações 36 e 37, onde pode ser visto que a Equação 36 possui um R^2 de 0,86 e a Equação 37 um R^2 de 0,80. Comparando os coeficientes de determinação (R^2) de T_{min} com os coeficientes de T_{max} , percebe-se, no caso de Sobradinho, que os coeficientes de temperatura máxima são maiores que os da temperatura mínima, o que nos outros casos é o contrário. Acontece que os furos que deveriam estar localizados à sombra (em Sobradinho), estavam expostos ao sol, no período da manhã. O pavimento neste local não tem, portanto, um comportamento específico para T_{min} .

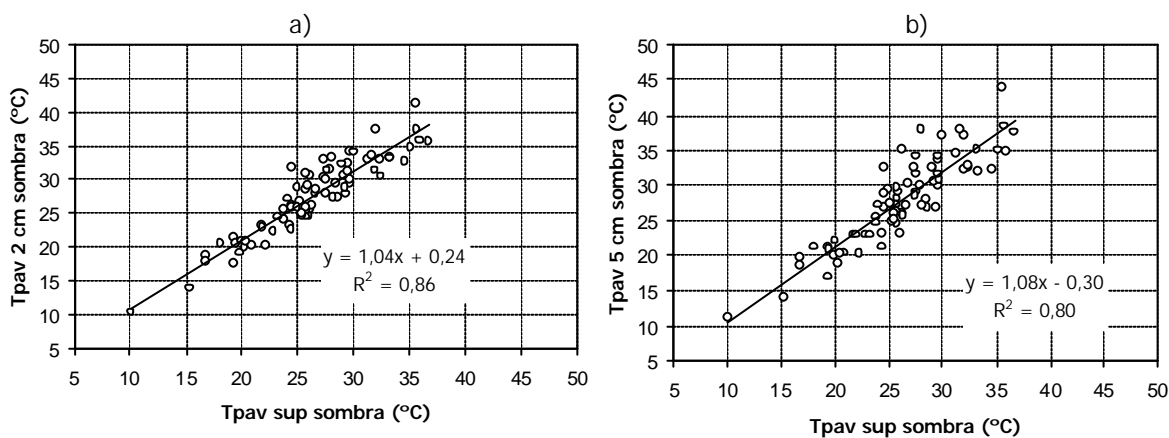


Figura 17: Gráficos de regressão linear para temperatura mínima em Sobradinho:

- a) temperatura da superfície versus temperatura a 2 cm de profundidade
- b) temperatura da superfície versus temperatura a 5 cm de profundidade

4.3.3 Modelo Global

Como já mencionado, as duas cidades em estudo localizam-se em regiões distintas do estado do Rio Grande do Sul, mas possuem a mesma classificação climática, segundo bibliografia consultada. Assim sendo, utilizou-se os dados coletados nas duas cidades e desenvolveu-se modelos para previsão de temperaturas máximas e mínimas, para as profundidades de 2 e 5 cm, medindo-se apenas a temperatura superficial do pavimento.

Para temperaturas máximas os modelos são:

$$T_{2\text{ cm}} = - 2,15 + 1,14 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 38)}$$

$$T_{5\text{ cm}} = - 2,70 + 1,18 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 39)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C, $T_{2\text{ cm}}$ e $T_{5\text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente, e T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C.

A Figura 18 a e b apresenta os modelos gráficos das Equações 38 e 39, onde pode ser visto que a Equação 38 possui um R^2 de 0,93 e a Equação 39 um R^2 de 0,89. Comparando esses modelos com os apresentados nas Equações do item 4.2.3, para o mesmo caso, percebe-se que o erro diminuiu, o que é explicado pelo fator irradiação, que está, indiretamente, contido no modelo através da temperatura da superfície do pavimento.

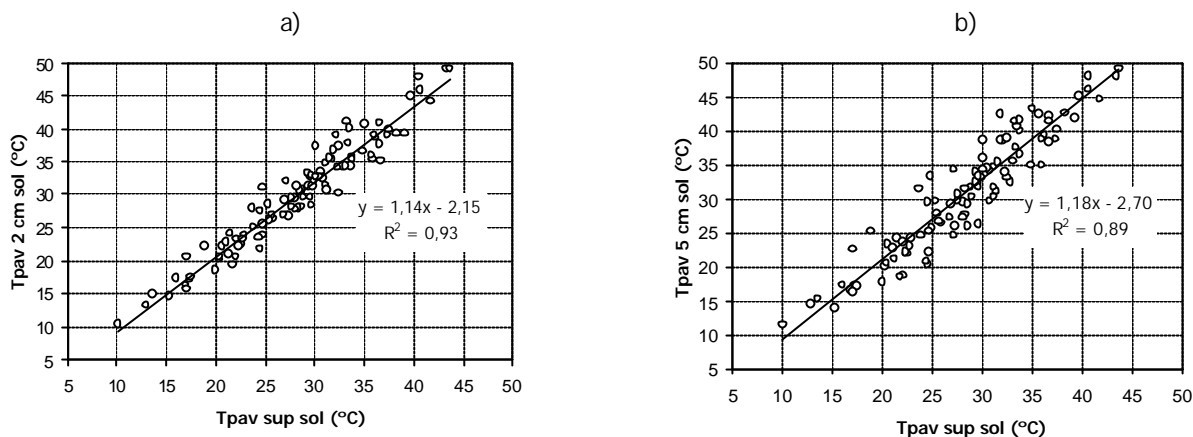


Figura 18: Gráficos de regressão linear para temperatura máxima em regiões de clima subtropical:

- a) temperatura da superfície *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
 b) temperatura da superfície *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

Para temperaturas mínimas os modelos desenvolvidos são:

$$T_{2\text{ cm}} = -0,99 + 1,07 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 40)}$$

$$T_{5\text{ cm}} = -1,61 + 1,11 T_{\text{sup}} \text{ (Equação 41)}$$

onde: T_{sup} é a temperatura da superfície do pavimento, em °C, $T_{2\text{ cm}}$ e $T_{5\text{ cm}}$ são as temperaturas, em °C, no interior do revestimento asfáltico a 2 e 5 cm de profundidade, respectivamente, e T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C.

A Figura 19 a e b apresenta os modelos gráficos das Equações 40 e 41, onde pode ser visto que a Equação 40 possui um R^2 de 0,93 e a Equação 41 um R^2 de 0,89. O erro das duas equações diminuiu, se comparado com as equações do item 4.2.3, para o mesmo caso. O que mostra como o fator irradiação é importante, já que está inserido nestas equações através da temperatura da superfície do pavimento.

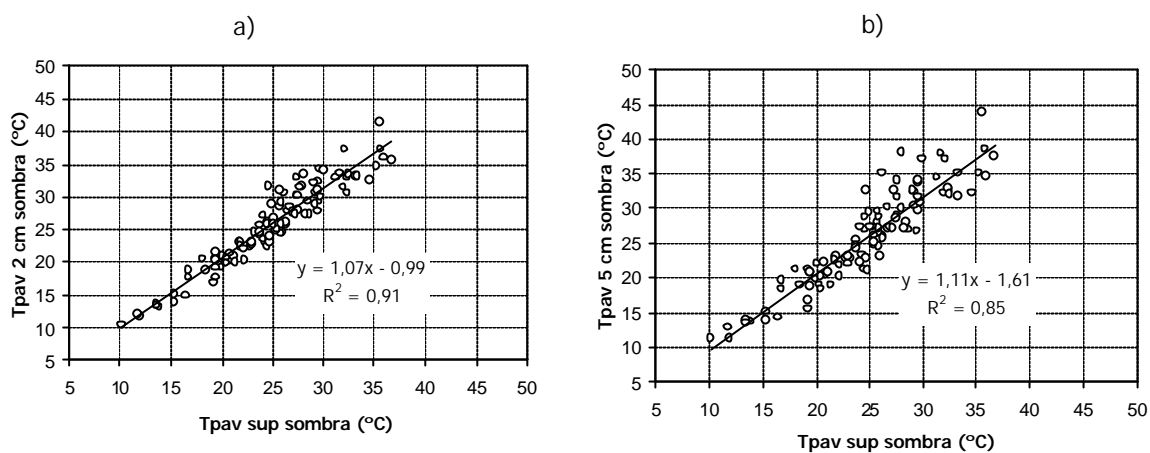


Figura 19: Gráficos de regressão linear para temperatura mínima em regiões de clima subtropical:

- a) temperatura da superfície *versus* temperatura a 2 cm de profundidade
- b) temperatura da superfície *versus* temperatura a 5 cm de profundidade

4.4 MODELO GERAL

Considerando um banco de dados constituído por 208 casos, propõe-se, finalmente, um modelo geral que permite estimar a temperatura a qualquer profundidade entre 2 e 5 cm no interior de um revestimento em concreto asfáltico.

Para a elaboração dos modelos de previsão de temperatura máxima (Equação 42) e de temperatura mínima (Equação 43) buscou-se estabelecer relações estatísticas correlacionando dados de temperatura medidas no interior das camadas do pavimento (2 e 5 cm de profundidade), na superfície do pavimento e da temperatura do ar.

Para o estabelecimento do modelo utilizou-se o software Statistic for Windows versão 4.3, de 1993, da Stat Soft Incorporation.

O modelo geral de previsão de temperatura máxima é:

$$T_{\text{máx}} = - 1,58 + 1,29 T_{\text{sup}} - 0,24 T_{\text{ar}} + 0,22 \text{ Prof. (Equação 42)}$$

onde: $T_{\text{máx}}$ é a temperatura máxima do pavimento na profundidade desejada, em °C. T_{sup} é a temperatura medida na superfície do pavimento, em °C. T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C e Prof. é a profundidade na qual se deseja prever a temperatura, em cm.

O modelo para temperatura máxima é estatisticamente significativo, conforme atesta o elevado valor do coeficiente de determinação de 91%, sendo que o modelo apresenta um erro padrão de estimativa de $\pm 2,50^{\circ}\text{C}$.

Na Figura 20 comparam-se valores medidos e estimados de temperatura no interior do revestimento asfáltico. Observa-se que todos os pontos se agrupam em torno da reta de igualdade, e que as hipérboles que definem um intervalo de confiança de 95% estão muito próximas entre si e da reta de igualdade. Isto significa que o modelo estima com precisão as temperaturas às profundidades consideradas.

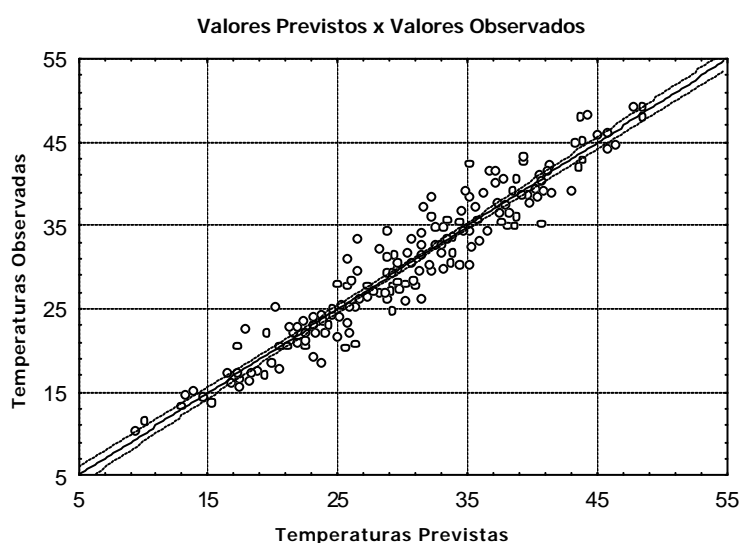


Figura 20: Temperaturas previstas e observadas ao sol

O modelo geral de previsão de temperatura mínima é:

$$T_{\min} = 0,24 + 1,34 T_{\text{sup}} - 0,37 T_{\text{ar}} \text{ (Equação 43)}$$

onde: T_{\min} é a temperatura mínima do pavimento na profundidade desejada, em °C. T_{sup} é a temperatura medida na superfície do pavimento, em °C. T_{ar} é a temperatura do ar, também em °C

A Equação 43, para temperatura mínima, apresenta um erro padrão de 2,14°C, para mais ou para menos. Seu coeficiente de determinação linear é de 89%. Na Figura 21 podem ser vistos os valores medidos e estimados das temperaturas no interior do revestimento asfáltico.

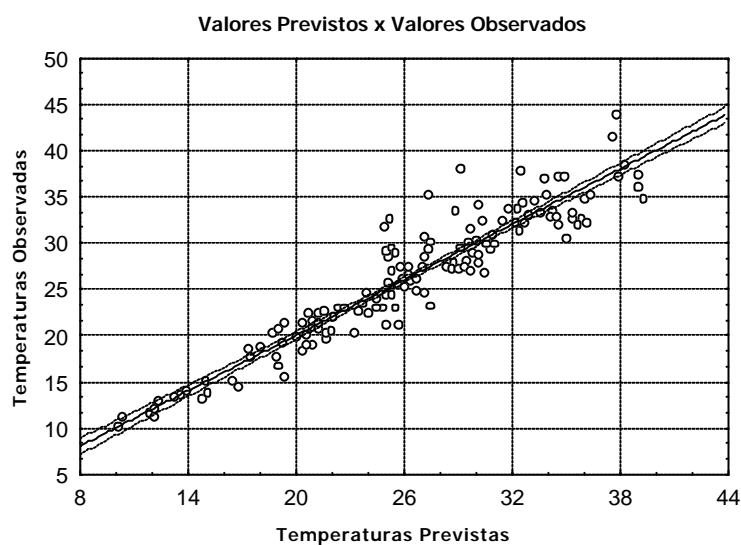


Figura 21: Temperaturas previstas e observadas à sombra

A Equação 43 não apresenta a variável de entrada profundidade. Isso não quer dizer que as temperaturas a 2 e a 5 cm de profundidade são iguais. O que acontece é que a diferença entre as medidas a 2 e 5 cm é menor que o erro padrão

(2,14°C), e que a partir dos dados obtidos e com o nível de confiabilidade utilizado, a equação contendo a variável profundidade não pode ser modelada.

Todos os modelos desenvolvidos no trabalho são lineares, já que apresentam melhor coeficiente de correlação, além do que, os modelos anteriormente apresentados para outras regiões também utilizam este tipo de modelo.

4.5 MODELOS GERADOS X EXISTENTES

Comparando os modelos globais gerados neste trabalho com os apresentados na revisão bibliográfica, percebe-se a importância deste estudo, uma vez que nenhum modelo se adaptou bem aos dados coletados senão os modelos aqui gerados.

Os modelos que apresentam irradiação não puderam ser testados, pois este fator é desconhecido para Sobradinho e Ijuí.

O modelo de previsão de temperatura mínima, desenvolvido pelo programa SHRP, se adapta a valores de temperatura do ar menores que 10°C, como pode ser visto na Figura 22. Valores de temperatura do ar maiores que 10°C não podem ser utilizados para previsão de temperatura da superfície do pavimento, já que quanto maior a temperatura do ar, maior a diferença entre os valores medidos e os estimados a partir do modelo SHRP. Talvez essa maior diferença para maiores temperaturas do ar seja pelo fato de o modelo ter sido desenvolvido nos EUA, onde a irradiação pode ser menor e as temperaturas do pavimento não se elevam tanto quanto no Brasil.

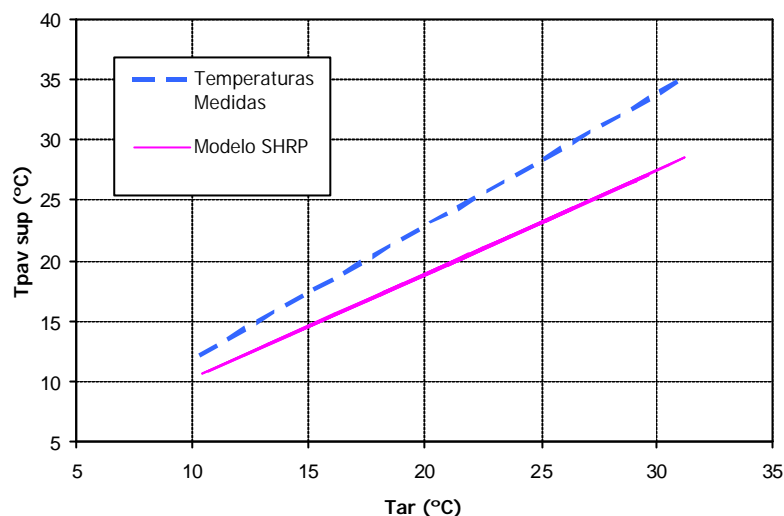


Figura 22: Comparação entre temperaturas medidas e temperaturas estimadas pelo modelo SHRP (ASPHALT INSTITUTE, 1994)

Já o modelo de previsão de temperatura máxima para o revestimento, proposto por Motta (1991), só se adapta a temperaturas próximas dos 20 °C, como pode ser visto na Figura 23. Esse modelo foi desenvolvido no Rio de Janeiro e, portanto, é preferível a sua não utilização no Rio Grande do Sul e demais regiões de clima subtropical.

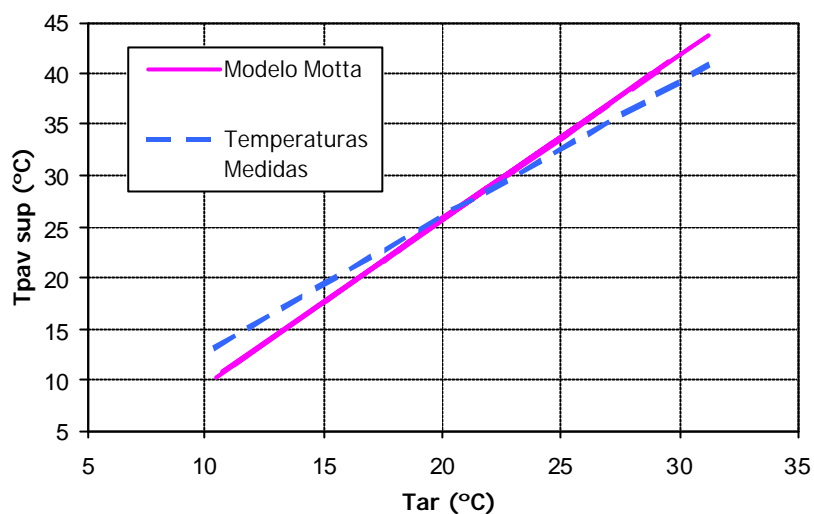


Figura 23: Comparação entre temperaturas medidas e temperaturas estimadas através do modelo Motta (1991)

4.6 RESUMO

Devido à quantidade de informações apresentadas no Capítulo 4 julgou-se necessário a montagem de quadros-resumo com as principais equações.

Os modelos que relacionam temperatura do ar com temperatura do pavimento estão nos quadros a seguir. O Quadro 1 contém as equações de previsão de temperatura máxima e o Quadro 2 as equações para previsão de temperaturas mínimas.

| <i>Equação</i> | <i>R² (%)</i> | <i>Aplicação</i> |
|--|---------------------------------|---|
| $T_{\text{sup}} = 2,28 + 1,09 T_{\text{ar}}$ | 82 | Para determinar a temperatura máxima da superfície em Ijuí |
| $T_{\text{sup}} = - 0,40 + 1,35 T_{\text{ar}}$ | 68 | Para determinar a temperatura máxima da superfície em Sobradinho |
| $T_{\text{sup}} = - 0,72 + 1,34 T_{\text{ar}}$ | 71 | Para determinar a temperatura máxima da superfície em clima Subtropical |
| $T_{2\text{cm}} = 0,48 + 1,23 T_{\text{ar}}$ | 75 | Para determinar a temperatura máxima à 2 cm em Ijuí |
| $T_{2\text{cm}} = - 1,08 + 1,47 T_{\text{ar}}$ | 59 | Para determinar a temperatura máxima à 2 cm em Sobradinho |
| $T_{2\text{cm}} = - 2,10 + 1,48 T_{\text{ar}}$ | 63 | Para determinar a temperatura máxima à 2 cm em clima Subtropical |
| $T_{5\text{cm}} = - 0,06 + 1,28 T_{\text{ar}}$ | 68 | Para determinar a temperatura máxima à 5 cm em Ijuí |
| $T_{5\text{cm}} = 5,99 + 0,99 T_{\text{ar}}$ | 50 | Para determinar a temperatura máxima à 5 cm em Sobradinho |
| $T_{5\text{cm}} = - 1,39 + 1,48 T_{\text{ar}}$ | 56 | Para determinar a temperatura máxima à 5 cm em clima Subtropical |

Quadro 1: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas máximas, através da temperatura do ar

| <i>Equação</i> | <i>R² (%)</i> | <i>Aplicação</i> |
|--|--------------------------|---|
| $T_{\text{sup}} = - 0,50 + 1,04 T_{\text{ar}}$ | 90 | Para determinar a temperatura mínima da superfície em Ijuí |
| $T_{\text{sup}} = 3,57 + 1,02 T_{\text{ar}}$ | 70 | Para determinar a temperatura mínima da superfície em Sobradinho |
| $T_{\text{sup}} = 0,78 + 1,11 T_{\text{ar}}$ | 73 | Para determinar a temperatura mínima da superfície em clima Subtropical |
| $T_{2\text{cm}} = - 1,21 + 1,07 T_{\text{ar}}$ | 88 | Para determinar a temperatura mínima à 2 cm em Ijuí |
| $T_{2\text{cm}} = 6,55 + 0,94 T_{\text{ar}}$ | 47 | Para determinar a temperatura mínima à 2 cm em Sobradinho |
| $T_{2\text{cm}} = 1,98 + 1,09 T_{\text{ar}}$ | 56 | Para determinar a temperatura mínima à 2 cm em clima Subtropical |
| $T_{5\text{cm}} = - 0,09 + 1,00 T_{\text{ar}}$ | 84 | Para determinar a temperatura mínima à 5 cm em Ijuí |
| $T_{5\text{cm}} = 5,99 + 0,99 T_{\text{ar}}$ | 45 | Para determinar a temperatura mínima à 5 cm em Sobradinho |
| $T_{5\text{cm}} = 1,60 + 1,12 T_{\text{ar}}$ | 52 | Para determinar a temperatura mínima à 5 cm em clima Subtropical |

Quadro 2: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas mínimas, através da temperatura do ar

Os modelos que relacionam temperatura da superfície do pavimento com temperatura à 2 e 5 cm de profundidade estão nos quadros a seguir. O Quadro 3 apresenta as equações de previsão de temperatura máxima e o Quadro 4 as equações para previsão de temperaturas mínimas.

| Equação | R² (%) | Aplicação |
|---|--------------------------|--|
| $T_{2\text{cm}} = - 1,77 + 1,11 T_{\text{sup}}$ | 89 | Para determinar a temperatura máxima à 2 cm em Ijuí |
| $T_{2\text{cm}} = - 1,92 + 1,13 T_{\text{sup}}$ | 93 | Para determinar a temperatura máxima à 2 cm em Sobradinho |
| $T_{2\text{cm}} = - 2,15 + 1,14 T_{\text{sup}}$ | 93 | Para determinar a temperatura máxima à 2 cm em clima Subtropical |
| $T_{5\text{cm}} = - 2,27 + 1,16 T_{\text{sup}}$ | 80 | Para determinar a temperatura máxima à 5 cm em Ijuí |
| $T_{5\text{cm}} = - 2,57 + 1,18 T_{\text{sup}}$ | 89 | Para determinar a temperatura máxima à 5 cm em Sobradinho |
| $T_{5\text{cm}} = - 2,70 + 1,18 T_{\text{sup}}$ | 89 | Para determinar a temperatura máxima à 5 cm em clima Subtropical |

Quadro 3: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas máximas, através da temperatura da superfície do pavimento

| Equação | R² (%) | Aplicação |
|---|--------------------------|--|
| $T_{2\text{cm}} = - 0,72 + 1,03 T_{\text{sup}}$ | 98 | Para determinar a temperatura mínima à 2 cm em Ijuí |
| $T_{2\text{cm}} = 0,24 + 1,04 T_{\text{sup}}$ | 86 | Para determinar a temperatura mínima à 2 cm em Sobradinho |
| $T_{2\text{cm}} = - 0,99 + 1,07 T_{\text{sup}}$ | 91 | Para determinar a temperatura mínima à 2 cm em clima Subtropical |
| $T_{5\text{cm}} = 0,49 + 0,95 T_{\text{sup}}$ | 92 | Para determinar a temperatura mínima à 5 cm em Ijuí |
| $T_{5\text{cm}} = - 0,30 + 1,08 T_{\text{sup}}$ | 80 | Para determinar a temperatura mínima à 5 cm em Sobradinho |
| $T_{5\text{cm}} = - 1,61 + 1,11 T_{\text{sup}}$ | 85 | Para determinar a temperatura mínima à 5 cm em clima Subtropical |

Quadro 4: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas mínimas, através da temperatura da superfície do pavimento

Os modelos de previsão de temperatura, entre as profundidades 2 e 5 cm, através do conhecimento da temperatura do ar e da superfície do pavimento estão no Quadro 5.

| <i>Equação</i> | <i>R² (%)</i> | <i>Aplicação</i> |
|---|--------------------------|---|
| $T_{\text{máx}} = - 1,58 + 1,29 T_{\text{sup}} - 0,24 T_{\text{ar}} + 0,22 \text{ Prof.}$ | 91 | Para determinar a temperatura máxima em clima Subtropical |
| $T_{\text{mín}} = 0,24 + 1,34 T_{\text{sup}} - 0,37 T_{\text{ar}}$ | 89 | Para determinar a temperatura mínima em clima Subtropical |

Quadro 5: Quadro-resumo com as equações para previsão de temperaturas máximas e mínimas, entre as profundidades e 2 e 5 cm

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com o término deste trabalho obtiveram-se as seguintes conclusões:

Os modelos que relacionam temperatura da superfície do pavimento com temperatura do seu interior e também, os que ainda apresentam uma relação com a temperatura ambiente, são uma importante ferramenta para a previsão de temperatura, pois apresentam grande significância estatística. Já os modelos que relacionam a temperatura do ar com a temperatura do pavimento, para diferentes profundidades, apresentam maiores erros, pois não consideram a irradiação.

A variação de temperatura do pavimento de locais expostos ao sol é diferente de locais à sombra, devido, principalmente, a propagação de calor por irradiação.

Os modelos desenvolvidos para Ijuí e Sobradinho, embora diferentes, não apresentam grandes disparidades, contudo qualquer análise mais profunda sobre o assunto requer de um número maior de dados medidos em mesma época do ano.

Os modelos que relacionam temperatura do pavimento com temperatura do ar são muito importantes para a construção de novas rodovias onde não há nenhum pavimento asfáltico por perto para se obter medidas de temperatura. Já os modelos que relacionam temperatura da superfície com temperatura de camadas interiores do pavimento e o modelo geral, que relaciona também a temperatura do ar, são indicados para correção de temperatura em ensaios deflectométricos.

Os modelos já existentes não se adaptam tão bem aos dados coletados quanto os gerados neste trabalho. Os modelos que melhor se adaptaram aos dados coletados, ou seja, apresentaram menores erros, são os que relacionam a temperatura da superfície do pavimento com a temperatura de suas camadas.

Enfim, os modelos de previsão de temperatura, propostos neste trabalho são uma importante ferramenta para a previsão da temperatura em ambiente subtropical para pavimentos flexíveis. Estudos futuros devem ser realizados, em diferentes épocas do ano para validar, implementar ou até rejeitar os modelos aqui desenvolvidos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como tema para futuros trabalhos e continuidade ao presente trabalho sugere-se:

Fazer medições durante um ano inteiro, pelo menos, já que este trabalho não apresenta dados de todas as estações do ano.

Outra sugestão, mas ainda sobre o mesmo assunto, seria utilizar sensores para fazer as medições de temperatura, obtendo-se, assim, leituras contínuas, durante

as 24 horas do dia, o que possibilitaria obter o conhecimento do comportamento térmico das camadas asfálticas durante o dia inteiro.

Sugere-se, também, medir as temperaturas em profundidades diferentes das medidas neste estudo.

Outra pesquisa que seria muito interessante é a de gerar modelos para prever, ao invés da temperatura (superfície e camadas do pavimento), a umidade das camadas que constituem os pavimentos (sub-leito, base, sub-base).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVARES, Beatriz Alvarenga; LUZ, Antonio Máximo Ribeiro da. **Curso de Física 2**. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1986.

AMALDI, Ugo. **Imagens da Física - As idéias e as experiências, do Pêndulo aos Quarks**. São Paulo: Scipione, 1997.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave – performance grade asphalt – binder specification and testing**. Lexington, Superpave Series Nº2 (SP-1), 1994.

BELLONI, Marli. **Os Climas do Brasil**. Disponível em: http://www.cptec.inpe.br/well_come/noticias/noticias00/klick_educacao/200008d.html#21 Acesso em: 24 ago. 2003.

BONJORNO, José Roberto; RAMOS, Clinton Márcico. **Física 2 : termologia, óptica geométrica, ondulatória**. São Paulo:FTD,1992.

CHIQUETTO, Marcos José; PARADA, Antonio Augusto. **Física Volume 2: Termologia, Óptica, Ondas**. São Paulo: Scipione, 1992 .

Clima do Brasil. Disponível em: <http://www.profvaldir.hpg.ig.com.br/pesquisa.htm>Acesso em 23 ago. 2003.

CUNHA, Gilberto R. **Clima do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/agromet/cli_pf8.html> Acesso em: 23 ago. 2003.

ENECON – INGEROUTE. República Federativa do Brasil. Ministério dos Transportes. Secretaria dos Transportes. DNER – DAER-RS. **Guia para conservação periódica e reforço dos pavimentos** – Programa de Conservação Rodoviária do Estado do Rio Grande do Sul. 1980.

EPPS, A. L. **Thermal Behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixtures**. Berkeley, 1997. Dissertation (Doctor of Philosophy) – ITS/UCB, 1997.

GONÇALVES, Fernando Pugliero; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOMACAL, Luiz. **Desempenho de Pavimentos Flexíveis em Concreto Asfáltico**. Revista Estradas, Porto Alegre, p.39-45, abr. 2002.

IBGE. **Diagnóstico Brasil**. Disponível em: <http://www2.ibge.gov.br/pub/cartas_e_mapas/documentos> Acesso em: 29 jul. 2003.

IJUÍ - Atlas Escola. Ijuí: Unijuí, 1994.

IJUÍ – GUIA TURÍSTICO E MAPA. (2201).

ÍNDIAS, Maria Amélia Cutileiro. **Curso de Física**. Lisboa: McGraw-Hill, 1992.

Irradiação Térmica. Disponível em: <<http://if.ufrgs.br/mpef/mef008/Beatriz/irradiação.htm>> Acesso em: 18 out. 2003.

KRAJEWSKI, Angela Corrêa. **Geografia do Brasil**. Disponível em: <<http://www.professora-angela.pro.br/site%20original/textos/Brasil/GEOGBRA.htm>> Acesso em: 07 set. 2003.

LEITE, Leni Figueiredo Mathias. **Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1999. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

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

MELLO, José Carlos. **Transportes: Presente e Futuro**. 33ª Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, 2001.

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

NÚÑEZ, Washington Peres; CERATTI, Jorge Augusto; et al. **Modelos de estimativa de temperaturas de pavimentos: contribuição ao estudo de afundamentos nas trilhas de roda em corredores de ônibus de Porto Alegre**. 12ª Reunião de Pavimentação Urbana, Aracaju, 2003.

OMOTE, Noriyasu. **FÍSICA: 2º grau**. São Paulo: Moderna, 1986.

PINTO, Salomão. **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico: Conceituação e Dosagem**. Rio de Janeiro: IME, 1998.

SILVA, José Herculano da; AZZI, Ricardo Gurgel. **Novo Manual Nova Cultural de Geografia**. São Paulo: Nova Cultural, 1994.

SOBRADINHO – GUIA TURÍSTICO. 2003.

TASHIBANA, Armando T.; FERREIRA, Gil M.; ARRUDA, Miguel. ***Novo Manual Nova Cultural de Física***. São Paulo: Nova Cultural, 1994.

VESENTINI, José William. ***Brasil Sociedade e Espaço: Geografia do Brasil***. 8.ed. São Paulo: Ática, 1988.

YODER, E. J.; TCZAK, M. W. W. ***Principles of Pavement Design***. Nova Iorque: John Willey e Sons, INC, 1975.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BALBO, José Tadeu; SEVERI, Andréa Arantes; RODOLFO, Marcos Paulo; PEREIRA, Deividi da Silva. ***Pesquisa dos efeitos do clima sobre pavimentos de concreto: Instrumentação da pista experimental na USP.*** In: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes. 2000. p.533-8.

FURASTÉ, Pedro Augusto. ***Normas Técnicas para o Trabalho Científico.*** 12.ed. Porto Alegre: [s.ed], 2003.

SEVERI, Andréa Arantes; BALBO, José Tadeu. ***Gradientes térmicos em pavimentos de concreto nas condições de clima tropical.*** In: XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2001. **Anais.** v. 1, 299 - 307

SEVERI, Andréa Arantes; BALBO, José Tadeu. ***Modelo para previsão de diferenciais térmicos diurnos em pavimentos de concreto simples no clima tropical.*** In: XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2002. **Anais.** v. 1, 43 – 54.

ANEXOS

ANEXO A – Temperaturas medidas em Ijuí

| Data | Hora | T ar | Temperatura do Pavimento | | | | | |
|----------|-------------|-------|--------------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | | | Sol | | | Sombra | | |
| | | | superfície | 2 cm | 5 cm | superfície | 2 cm | 5 cm |
| 07/05/03 | 10h e 20min | 11,20 | 17,50 | 17,50 | 17,20 | 13,80 | 13,20 | 13,80 |
| 12/05/03 | 8h | 16,10 | 16,90 | 16,20 | 16,60 | 15,30 | 15,10 | 15,20 |
| 12/05/03 | 11h e 40min | 22,10 | 31,20 | 30,60 | 30,40 | 24,80 | 23,10 | 21,10 |
| 13/05/03 | 10h e 50min | 20,90 | 28,30 | 28,10 | 27,80 | 20,40 | 19,80 | 18,50 |
| 14/05/03 | 15h e 20min | 25,60 | 30,10 | 32,70 | 36,10 | 26,90 | 27,50 | 27,30 |
| 16/05/03 | 11h | 24,40 | 28,10 | 27,80 | 27,30 | 24,70 | 24,00 | 22,90 |
| 17/05/03 | 11h e 10min | 24,40 | 27,30 | 26,80 | 26,10 | 24,10 | 23,50 | 22,40 |
| 19/05/03 | 9h e 25min | 21,00 | 22,30 | 22,30 | 22,30 | 21,10 | 21,00 | 20,80 |
| 19/05/03 | 12h e 50min | 26,30 | 33,10 | 34,40 | 35,60 | 32,50 | 33,50 | 32,10 |
| 20/05/03 | 10h e 50min | 21,00 | 26,80 | 27,00 | 27,20 | 23,00 | 22,60 | 22,20 |
| 26/05/03 | 10h e 05min | 12,20 | 16,00 | 17,40 | 17,40 | 11,90 | 11,70 | 11,30 |
| 09/06/03 | 8h e 05min | 13,30 | 13,60 | 14,80 | 15,30 | 13,50 | 13,60 | 13,90 |
| 10/06/03 | 9h e 40min | 22,60 | 24,50 | 21,80 | 20,40 | 21,30 | 20,00 | 19,00 |
| 24/06/03 | 17h e 46min | 21,00 | 25,50 | 26,10 | 27,90 | 20,70 | 21,40 | 22,30 |
| 26/07/03 | 12h | 22,60 | 27,60 | 28,30 | 29,80 | 21,80 | 22,40 | 22,60 |
| 29/07/03 | 9h e 35min | 19,40 | 20,40 | 20,60 | 20,70 | 19,40 | 19,20 | 18,90 |
| 04/08/03 | 15h e 45min | 27,00 | 28,20 | 31,20 | 31,60 | 27,20 | 27,30 | 27,20 |
| 11/08/03 | 16h e 22min | 20,70 | 24,80 | 31,00 | 33,40 | 19,40 | 20,20 | 20,80 |
| 11/08/03 | 17h e 25min | 19,20 | 24,50 | 27,70 | 29,60 | 18,40 | 18,80 | 19,10 |
| 18/08/03 | 16h e 15min | 23,60 | 27,10 | 32,20 | 34,40 | 22,90 | 23,00 | 23,10 |
| 18/08/03 | 17h e 35min | 22,40 | 25,30 | 28,60 | 29,70 | 22,10 | 22,10 | 22,00 |
| 01/09/03 | 16h e 30min | 22,60 | 31,90 | 36,90 | 38,60 | 23,80 | 24,60 | 24,40 |
| 02/09/03 | 7h e 45min | 10,70 | 12,90 | 13,30 | 14,50 | 11,70 | 12,10 | 13,00 |
| 02/09/03 | 8h e 45min | 14,20 | 17,10 | 15,70 | 16,30 | 13,50 | 13,30 | 13,50 |
| 02/09/03 | 9h e 45min | 16,30 | 21,80 | 19,30 | 18,60 | 16,50 | 15,00 | 14,40 |
| 02/09/03 | 10h e 45min | 19,00 | 24,40 | 23,40 | 20,80 | 19,20 | 16,80 | 15,50 |

ANEXO B – Temperaturas medidas em Sobradinho

| Data | Hora | T ar | Temperatura do Pavimento | | | | | |
|----------|-------------|-------|--------------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | | | Sol | | | Sombra | | |
| | | | superfície | 2 cm | 5 cm | superfície | 2 cm | 5 cm |
| 03/09/03 | 7h e 45min | 10,40 | 10,10 | 10,40 | 11,50 | 10,10 | 10,30 | 11,30 |
| 03/09/03 | 8h e 45min | 16,30 | 15,30 | 14,60 | 13,90 | 15,30 | 13,90 | 13,90 |
| 03/09/03 | 9h e 50min | 19,80 | 22,00 | 20,70 | 18,70 | 20,30 | 19,80 | 19,00 |
| 03/09/03 | 10h e 50min | 22,00 | 27,20 | 26,90 | 24,70 | 26,00 | 24,70 | 23,20 |
| 03/09/03 | 12h e 05min | 25,20 | 30,80 | 32,60 | 29,80 | 28,40 | 29,40 | 28,00 |
| 03/09/03 | 12h e 55min | 26,50 | 32,80 | 34,40 | 32,50 | 25,70 | 28,50 | 28,10 |
| 03/09/03 | 14h e 10min | 26,60 | 34,90 | 36,70 | 35,10 | 26,20 | 25,60 | 25,90 |
| 03/09/03 | 16h e 10min | 27,00 | 31,10 | 34,70 | 34,70 | 25,80 | 24,40 | 24,50 |
| 03/09/03 | 17h e 20min | 26,00 | 28,80 | 30,70 | 31,70 | 24,30 | 23,10 | 23,30 |
| 05/09/03 | 8h e 50min | 19,70 | 20,00 | 18,60 | 17,80 | 19,30 | 17,70 | 16,90 |
| 05/09/03 | 10h | 22,80 | 24,70 | 24,00 | 22,20 | 24,40 | 22,50 | 21,20 |
| 05/09/03 | 17h e 10min | 26,30 | 28,10 | 29,50 | 29,60 | 26,30 | 26,10 | 25,80 |
| 15/09/03 | 13h e 20min | 19,70 | 29,60 | 32,80 | 32,60 | 23,80 | 25,70 | 25,60 |
| 15/09/03 | 17h e 10min | 15,20 | 18,90 | 22,30 | 25,20 | 18,10 | 20,50 | 21,30 |
| 16/09/03 | 13h e 10min | 14,50 | 21,50 | 24,10 | 24,20 | 19,30 | 21,50 | 21,30 |
| 16/09/03 | 15h e 40min | 15,60 | 20,60 | 22,20 | 23,50 | 19,40 | 20,60 | 20,90 |
| 16/09/03 | 17h e 20min | 15,10 | 17,10 | 20,60 | 22,70 | 16,80 | 18,70 | 19,70 |
| 17/09/03 | 12h e 20min | 19,90 | 29,60 | 29,60 | 31,80 | 26,60 | 27,90 | 27,10 |
| 17/09/03 | 17h e 55min | 18,10 | 23,70 | 28,00 | 31,60 | 19,90 | 19,20 | 19,90 |
| 22/09/03 | 9h e 40min | 26,10 | 29,70 | 28,50 | 26,20 | 29,40 | 27,80 | 26,80 |
| 23/09/03 | 9h e 50min | 25,20 | 28,60 | 28,30 | 26,00 | 28,60 | 27,40 | 26,90 |
| 23/09/03 | 13h e 05min | 29,60 | 35,90 | 35,50 | 35,00 | 34,60 | 32,60 | 32,30 |
| 24/09/03 | 10h e 30min | 20,50 | 25,90 | 26,40 | 26,50 | 25,30 | 24,80 | 24,90 |
| 24/09/03 | 13h | 19,30 | 24,90 | 25,30 | 25,60 | 21,70 | 23,10 | 23,00 |
| 25/09/03 | 12h e 20min | 18,60 | 22,90 | 24,00 | 24,30 | 22,80 | 22,40 | 23,00 |
| 25/09/03 | 16h e 40min | 17,50 | 22,10 | 23,20 | 23,60 | 20,00 | 20,90 | 22,20 |
| 26/09/03 | 10h e 15min | 18,30 | 21,30 | 21,00 | 21,20 | 20,90 | 20,20 | 20,50 |
| 20/10/03 | 11h e 30min | 24,30 | 36,20 | 38,70 | 39,50 | 25,80 | 25,40 | 26,50 |
| 20/10/03 | 12h e 15min | 26,70 | 39,20 | 39,30 | 41,90 | 28,20 | 27,30 | 27,10 |
| 21/10/03 | 12h | 21,80 | 29,40 | 31,40 | 32,60 | 25,40 | 25,90 | 26,10 |
| 21/10/03 | 13h e 10min | 25,30 | 35,70 | 36,10 | 42,60 | 29,60 | 29,30 | 29,90 |
| 21/10/03 | 17h e 05min | 24,60 | 31,40 | 30,60 | 31,10 | 28,00 | 33,40 | 38,10 |
| 22/10/03 | 12h e 10min | 22,90 | 36,70 | 35,20 | 42,20 | 24,60 | 31,80 | 32,70 |
| 22/10/03 | 16h e 10min | 22,20 | 31,80 | 35,50 | 42,50 | 24,50 | 26,10 | 26,90 |
| 23/10/03 | 9h e 50min | 23,00 | 32,50 | 30,30 | 33,10 | 29,50 | 32,40 | 33,70 |
| 23/10/03 | 11h e 15min | 24,00 | 33,70 | 34,40 | 40,10 | 32,10 | 37,30 | 37,20 |
| 23/10/03 | 17h | 26,40 | 33,80 | 35,80 | 41,60 | 29,20 | 28,90 | 30,40 |
| 24/09/03 | 9h e 20min | 24,00 | 31,10 | 31,60 | 31,80 | 32,40 | 30,60 | 32,60 |
| 28/10/03 | 12h e 15min | 22,50 | 32,10 | 39,10 | 38,60 | 26,10 | 30,70 | 35,20 |
| 28/10/03 | 14h e 20min | 21,80 | 35,00 | 40,70 | 43,40 | 25,80 | 25,80 | 27,20 |
| 29/10/03 | 8h e 10min | 20,50 | 23,80 | 25,10 | 24,60 | 23,80 | 24,10 | 24,70 |
| 29/10/03 | 9h e 10min | 21,20 | 26,90 | 29,30 | 29,40 | 27,50 | 28,00 | 29,10 |
| 29/10/03 | 14h e 15min | 26,00 | 40,70 | 45,90 | 46,20 | 29,70 | 30,00 | 30,90 |
| 29/10/03 | 15h e 15min | 25,40 | 30,10 | 37,40 | 38,60 | 29,10 | 30,70 | 32,40 |
| 29/10/03 | 16h e 15min | 24,40 | 29,30 | 33,40 | 34,00 | 26,70 | 28,50 | 30,20 |

ANEXO B – Temperaturas medidas em Sobradinho (continuação)

| Data | Hora | T ar | Temperatura do Pavimento | | | | | |
|----------|--------------|-------|--------------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | | | Sol | | | Sombra | | |
| | | | superfície | 2 cm | 5 cm | superfície | 2 cm | 5 cm |
| 30/10/03 | 7h e 45min | 22,30 | 24,70 | 25,50 | 25,30 | 25,40 | 25,00 | 25,20 |
| 30/10/03 | 9h e 45min | 25,10 | 31,50 | 35,60 | 35,50 | 31,20 | 33,00 | 34,60 |
| 30/10/03 | 11h e 45min | 28,80 | 41,80 | 44,20 | 44,80 | 31,70 | 33,70 | 37,90 |
| 30/10/03 | 13h e 25min | 29,10 | 43,40 | 49,10 | 48,10 | 31,90 | 31,40 | 32,20 |
| 31/10/03 | 10h e 05min | 28,00 | 36,00 | 39,20 | 38,80 | 35,70 | 37,30 | 38,50 |
| 31/10/03 | 11h e 30min | 28,40 | 39,70 | 45,10 | 45,20 | 35,50 | 41,40 | 43,90 |
| 31/10/03 | 13h | 30,50 | 43,70 | 49,10 | 49,20 | 33,20 | 33,30 | 35,20 |
| 31/10/03 | 14h | 31,20 | 40,60 | 48,00 | 48,20 | 35,20 | 34,70 | 35,10 |
| 14/11/03 | 9h e 40min | 19,70 | 28,90 | 29,70 | 30,30 | 27,40 | 30,20 | 28,60 |
| 14/11/03 | 10h e 25min | 19,20 | 30,70 | 33,60 | 34,20 | 29,00 | 32,20 | 32,60 |
| 14/11/03 | 11h e 20 min | 20,40 | 33,80 | 35,50 | 36,70 | 29,60 | 34,30 | 34,20 |
| 14/11/03 | 13h e 30min | 21,20 | 38,30 | 39,30 | 42,80 | 25,90 | 29,20 | 28,90 |
| 19/11/03 | 8h e 25min | 18,80 | 22,50 | 22,50 | 22,10 | 22,20 | 20,30 | 20,30 |
| 19/11/03 | 9h e 55min | 21,90 | 27,60 | 29,40 | 30,70 | 27,90 | 31,60 | 30,00 |
| 19/11/03 | 11h e 15min | 20,40 | 28,50 | 30,60 | 29,40 | 25,70 | 31,00 | 29,60 |
| 19/11/03 | 13h e 20min | 23,70 | 29,90 | 31,40 | 33,20 | 24,90 | 29,00 | 29,40 |
| 19/11/03 | 15h | 22,10 | 30,40 | 32,80 | 34,50 | 25,20 | 26,70 | 27,30 |
| 20/11/03 | 6h e 15min | 14,70 | 17,30 | 17,20 | 17,30 | 16,80 | 17,80 | 18,40 |
| 20/11/03 | 7h e 15min | 18,10 | 20,30 | 20,20 | 20,20 | 20,40 | 20,70 | 20,30 |
| 20/11/03 | 8h e 15min | 18,40 | 22,70 | 23,30 | 23,10 | 23,20 | 24,60 | 23,00 |
| 20/11/03 | 9h e 15min | 17,80 | 25,70 | 27,00 | 26,60 | 24,10 | 27,20 | 27,30 |
| 20/11/03 | 10h e 30min | 18,30 | 29,70 | 33,00 | 33,30 | 27,30 | 32,90 | 32,60 |
| 20/11/03 | 12h | 19,30 | 33,40 | 37,80 | 37,60 | 30,00 | 34,00 | 37,10 |
| 20/11/03 | 13h | 20,60 | 33,50 | 40,10 | 40,60 | 27,60 | 31,40 | 34,20 |
| 20/11/03 | 14h e 15min | 21,60 | 33,20 | 41,10 | 41,50 | 24,50 | 25,90 | 28,80 |
| 20/11/03 | 15h e 20min | 22,70 | 36,60 | 41,00 | 41,40 | 25,00 | 25,90 | 27,40 |
| 20/11/03 | 16h e 35min | 21,20 | 32,50 | 37,40 | 39,00 | 29,50 | 31,10 | 31,60 |
| 20/11/03 | 17h e 35 | 20,70 | 30,00 | 32,20 | 34,30 | 27,50 | 30,10 | 31,60 |
| 25/11/03 | 9h e 55min | 26,30 | 32,30 | 34,10 | 33,90 | 33,30 | 33,20 | 31,90 |
| 25/11/03 | 11h e 15min | 26,00 | 37,40 | 39,10 | 38,90 | 35,90 | 35,90 | 34,80 |
| 26/11/03 | 12h e 20min | 29,50 | 37,50 | 40,00 | 40,30 | 36,70 | 35,50 | 37,50 |
| 27/11/03 | 12h e 05min | 26,00 | 36,60 | 37,70 | 38,40 | 32,30 | 32,90 | 32,80 |
| 28/11/03 | 7h e 05min | 19,80 | 21,10 | 22,80 | 22,90 | 21,90 | 23,00 | 23,10 |