

UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

DeFEM – Departamento de Física, Estatística e Matemática

DeTec – Departamento de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática

MESTRADO EM MODELAGEM MATEMÁTICA

IDENTIFICAÇÃO DE ESPESSURAS E MATERIAIS EM PAVIMENTOS USANDO O PROBLEMA INVERSO

RADAELE DE SOUZA PAROLIN

Ijuí-RS, 24 de fevereiro de 2010

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

DeFEM – Departamento de Física, Estatística e Matemática

DeTec – Departamento de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática

MESTRADO EM MODELAGEM MATEMÁTICA

IDENTIFICAÇÃO DE ESPESSURAS E MATERIAIS EM PAVIMENTOS USANDO O PROBLEMA INVERSO

Elaborada por

Radael de Souza Parolin

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, como parte integrante dos pré-requisitos para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges (DeFEM)

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

Ijuí-RS, 24 de fevereiro de 2010

UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

DeFEM – Departamento de Física, Estatística e Matemática

DeTec – Departamento de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**IDENTIFICAÇÃO DE ESPESSURAS E MATERIAIS EM
PAVIMENTOS USANDO O PROBLEMA INVERSO**

Elaborada por

RADAEL DE SOUZA PAROLIN

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges – DeFEM (Orientador)

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

Prof. Dr. Antônio José da Silva Neto – IPRJ/UERJ

Prof^a. Dr^a. Airam Teresa Zago Romcy Sausen – DeFEM

Ijuí-RS, 24 de fevereiro de 2010

Em memória de meu irmão Itamar.

AGRADECIMENTOS

À família, pela compreensão e apoio ao longo da pesquisa.

Ao Professor orientador Dr. Pedro Augusto Pereira Borges, pela orientação, desenvolvimento e construção de ideias e conhecimentos ao longo de minha vida acadêmica e da pesquisa.

Ao Professor co-orientador Dr. Luciano Pivoto Specht, pela orientação e multiplicação de ideias ao longo da pesquisa.

Aos professores do Mestrado em Modelagem Matemática, pela instrução e conhecimentos desenvolvidos.

Aos professores do DeFEM – Departamento de Física, Estatística e Matemática, pelos ensinamentos em minha formação acadêmica.

À secretaria do Mestrado em Modelagem Matemática, pela dedicação às nossas solicitações.

A todos os colegas de curso, pela amizade, os momentos de estudo e de descontração.

A todos os amigos que estiveram presentes de qualquer forma possível no andar do meu desenvolvimento intelectual e espiritual.

A todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte de minhas conquistas.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos que possibilitou a realização do curso e o desenvolvimento da pesquisa.

Ser quem sou faz do Universo o que ele é!

RESUMO

O conhecimento de informações sobre a espessura e propriedades dos materiais é essencial para a tomada de decisões sobre a manutenção e restauração de pavimentos rodoviários. Para obter tais informações, atualmente, são realizadas prospecções significativamente destrutivas e intervenientes no tráfego, para coleta de material e posterior análise em laboratório. Propõe-se neste trabalho uma técnica menos destrutiva e invasiva do que os métodos usuais, para estimar a espessura e identificar os materiais constituintes dos pavimentos. A técnica consiste na instalação de uma sonda térmica no pavimento, com sensores de temperatura e fontes de calor, para a obtenção da distribuição de temperatura em função do tempo e do espaço, em diferentes profundidades; na resolução do problema de transferência de calor em uma dimensão ou duas dimensões, em coordenadas cilíndricas, considerando condições de fronteira de primeira espécie obtidas experimentalmente; e na estimação das espessuras e propriedades térmicas dos materiais de cada camada através do Problema Inverso. O Problema Direto foi modelado pela equação de condução do calor, com os respectivos parâmetros térmicos (difusividade e condutividade térmica) e espessuras estimados para cada camada, e resolvido com Diferenças Finitas Centrais, usando o método explícito de avanços temporais. A estimação dos parâmetros foi realizada através da resolução do Problema Inverso, utilizando os métodos Procura em Rede Modificado, Algoritmo Genético e Algoritmo Memético. A técnica proposta, de prospecção de pavimentos, mostrou-se eficiente na estimação das espessuras e dos materiais através da condutividade térmica, sendo ineficiente para a estimação das difusividades térmicas. O Método Procura em Rede Modificado mostrou-se incompatível pelo custo computacional para a resolução do problema bidimensional. O Algoritmo Genético e o Algoritmo Memético possuem soluções aproximadas, mas com vantagem no custo computacional para o Algoritmo Memético, considerando as exigências pré-definidas de aplicação dos métodos.

ABSTRACT

The knowledge of information about the thickness and properties of the materials is essential to make decisions about the maintenance and restoration of road pavements. To obtain such information, nowadays, are carried out destructive prospecting interfering significantly in traffic, to collect material and subsequent laboratory analysis. It is proposed here a less destructive and invasive than the usual methods to estimate the thickness and identify the constituent materials of the pavements. The technique consists of the installation of a thermal probe in the pavement, with temperature sensors and heat sources, to obtain the temperature distribution as a function of time and space, at different depths; in solving the problem of heat transfer in one dimension or in two dimensions, in cylindrical coordinates, considering boundary conditions of first kind obtained experimentally; and in the estimate of the thickness and thermal properties of the materials of each layer through the Inverse Problem. The Direct Problem was modeled by the equation of heat conduction, with the respective thermal parameters (diffusivity and thermal conductivity) and thickness estimated for each layer and solved by Central Finite Differences, using the explicit method of time advances. The parameter estimation was accomplished through the resolution of the Inverse Problem, using the methods Net Research Modified, Genetic Algorithm and Memetic Algorithm. The proposed technique for structural analysis of pavements was efficient in the estimation of thickness and materials through the thermal conductivity, and inefficient for the estimation of thermal diffusivities. The Net Research Modified was shown incompatible for the computational cost for the resolution of the two-dimensional problem. The Genetic Algorithm and Memetic Algorithm are approximate solutions, but with advantage in computational cost for the Memetic Algorithm, considering the pre-defined requirements for the application of the methods.

LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
AM	Algoritmo Memético
BGS	Brita Graduada Simples
CBR	Índice de Suporte Califórnia
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
GPR	Ground Penetrating Radar
PD	Problema Direto
PI	Problema Inverso
PRM	Procura em Rede Modificado

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B, C, D e E	coeficientes a serem ajustados
Cro_i , $Cro1$, $Cro2$ e $Cro3$	cromossomo (conjunto de parâmetros)
d_i	diferença entre as soluções estimadas e os dados experimentais
d_{min}	menor d_i
DF	Delta Fourier
$Erro$	erro percentual em torno da média
f	iteração da partição de parâmetros do método PRM
$F1$ e $F2$	fontes de calor
$Filho1$, $Filho2$ e $Filho3$	novos indivíduos (filhos) dos cruzamentos no AG e AM
g	fonte de calor (W/m^3)
$Gene_i$	gene (parâmetro)
H	profundidade máxima do pavimento (m)
I	incerteza ($^{\circ}C$)
I_p	intervalo do parâmetro p
I_{pm}	intervalo do parâmetro p no refinamento m
i	iteração e índice de referência
j	posição em z na malha espacial
k_1 , k_2 e k_3	condutividade térmica nas fontes de calor ($W/m^{\circ}C$)
L	número máximo de dados de temperatura
l	iteração dos dados de temperatura
LI_i	limite inferior do parâmetro

LS_i	limite superior do parâmetro
m	iteração dos refinamentos no método PRM
N	número de métodos
n	iteração temporal
N_{PD}	número de execuções do PD
nc	número de dados calculados de cada parâmetro
np	número de parâmetros a serem estimados
nr	número de refinamentos do método PRM
nr_{ot}	número de refinamentos ótimo (critério de parada) do método PRM
P	tamanho da população do AG e do AM
p	iteração dos parâmetros
ps	probabilidade de seleção dos cromossomos
PM	probabilidade de mutação (%)
q	taxa unitária do cromossomo com maior aptidão
R	raio máximo do pavimento (m)
r	raio (m)
R^2 e R_i^2	coeficiente de determinação
r_i, r_j e r_k	coeficientes randômicos
R_{ot}	coeficiente de determinação ótimo (critério de parada)
$rank(i)$	posição do cromossomo/indivíduo em ordem decrescente por aptidão
$S1, S2, \dots, S9$	sensores de temperatura ($^{\circ}C$)
$S1^*, S2^*, \dots, S9^*$	temperatura registrada dos sensores de temperatura ($^{\circ}C$)
T	temperatura ($^{\circ}C$)

t	tempo (s)
T_0	condição inicial do pavimento ($^{\circ}C$)
t_0, t_1, \dots, t_{17}	horário de captura dos dados experimentais
T_1, T_2, \dots, T_8	temperaturas medidas para a calibração dos sensores de temperatura ($^{\circ}C$)
T_{cl}	temperaturas calculadas ($^{\circ}C$)
T_{el}	temperaturas experimentais ($^{\circ}C$)
T_{est}	temperatura estimada ($^{\circ}C$)
T_{exp}	temperatura experimental ($^{\circ}C$)
t_f	tempo final (s)
T_H	temperatura na profundidade máxima do pavimento ($^{\circ}C$)
TP	temperatura do termômetro padrão ($^{\circ}C$)
t_{PD}	tempo de execução de resolução de 1 PD (s)
t_{PRM}	tempo estimado de execução do método PRM na resolução do PI
T_R	temperatura no raio máximo do pavimento ($^{\circ}C$)
T_S	temperatura na superfície do pavimento ($^{\circ}C$)
\bar{x}	média aritmética do parâmetro
x_i	parâmetro dos diferentes métodos
z	profundidade (m)
z_f	profundidade final (m)
z_1, z_2 e z_3	espessuras das camadas (m)

LISTA DE LETRAS GREGAS

$\alpha, \alpha_i, \alpha_1, \alpha_2$ e α_3	difusividade térmica (m^2/s)
β_{1f}, β_{2f} e β_{npf}	parâmetros do conjunto f no método PRM
β_{ot}	parâmetro ótimo estimado no método PRM
β_p	parâmetro a ser estimado no método PRM
β_{pf}	partição de parâmetros no método PRM
β_{pmin}	parâmetro de menor valor no intervalo de estimação no método PRM
β_{pmax}	parâmetro de maior valor no intervalo de estimação no método PRM
$\Delta\beta_p$	intervalo do parâmetro β_p no método PRM
Δr	intervalo espacial em r (m)
Δt	intervalo temporal (m)
Δz	intervalo espacial em z (m)
ε	critério de parada do método PRM
σ	desvio padrão dos parâmetros para os diferentes métodos
σ_c	desvio padrão de calibração
σ_r	desvio padrão de repetição

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Posição dos sensores de temperatura e fontes de calor	33
Tabela 3.2 - Dados experimentais dos parâmetros dos pavimentos	34
Tabela 3.3 - Horário de leitura dos dados experimentais.....	38
Tabela 3.4 - Dados utilizados na calibração dos sensores de temperatura.....	39
Tabela 3.5 - Equações de correção dos sensores de temperatura	39
Tabela 3.6 - Medidas de repetição dos sensores de temperatura.....	40
Tabela 3.7 - Incerteza da medida dos sensores de temperatura.....	41
Tabela 3.8 - Dados e exigências definidos do método Procura em Rede Modificado ...	49

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Componentes das malhas na análise de convergência	59
--	----

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Difusividades térmicas e espessuras: experimentais e estimadas por diferentes métodos	69
Tabela 6.2 - Estimação de parâmetros com o Algoritmo Genético com diferentes números de fontes de calor	71
Tabela 6.3 - Estimativa do tempo de execução do método PRM.....	73
Tabela 6.4 - Dados e exigências características utilizados no Algoritmo Genético para o Pavimento Rígido	74
Tabela 6.5 - Estimação de parâmetros com o Algoritmo Genético para o Pavimento Rígido.....	75
Tabela 6.6 - Dados e exigências características utilizados no Algoritmo Memético para o Pavimento Rígido.....	77
Tabela 6.7 - Estimação de parâmetros com o Algoritmo Memético para o Pavimento Rígido.....	77
Tabela 6.8 - Média dos parâmetros estimados com o Algoritmo Genético e o Algoritmo Memético para o Pavimento Rígido	79
Tabela 6.9 - Dados e exigências características utilizados no Algoritmo Genético para o Pavimento Flexível	80

Tabela 6.10 - Estimação de parâmetros com o Algoritmo Genético para o Pavimento Flexível.....	80
Tabela 6.11 - Dados e exigências características utilizados no Algoritmo Memético para o Pavimento Flexível	82
Tabela 6.12 - Estimação de parâmetros com o Algoritmo Memético para o Pavimento Flexível.....	82
Tabela 6.13 - Média dos parâmetros estimados com o Algoritmo Genético e o Algoritmo Memético para o Pavimento Flexível	84

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Exemplos de extração de corpos-de-prova e de poços de sondagem em pavimentos.....	22
Figura 2.2 - Georadar.....	23

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Esquema representando os pavimentos (o primeiro n° indica o sensor e o segundo a profundidade em <i>cm</i>).....	32
Figura 3.2 - Sensor de temperatura digital.....	35
Figura 3.3 - Sonda térmica.....	36
Figura 3.4 - Fonte de alimentação dos resistores.....	36
Figura 3.5 - Visores dos sensores de temperatura.....	37
Figura 3.6 - Dados experimentais Pavimento Rígido ($T \times z$).....	42
Figura 3.7 - Dados experimentais Pavimento Rígido ($T \times t$).....	42
Figura 3.8 - Dados experimentais Pavimento Flexível ($T \times z$).....	43
Figura 3.9 - Dados experimentais Pavimento Flexível ($T \times t$).....	43
Figura 3.10 - Interpolação da Condição Inicial para o Pavimento Rígido.....	44
Figura 3.11 - Interpolação da Condição Inicial para o Pavimento Flexível.....	45
Figura 3.12 - Ajuste polinomial da Condição de Fronteira da superfície para o Pavimento Rígido.....	46
Figura 3.13 - Ajuste polinomial da Condição de Fronteira da superfície para o Pavimento Flexível.....	46
Figura 3.14 - Distribuição de temperatura experimental e calculada (ajustada) para a condição de contorno em $r=1m$ do Pavimento Rígido.....	48
Figura 3.15 - Distribuição de temperatura experimental e calculada (ajustada) para a condição de contorno em $r=1m$ do Pavimento Flexível.....	48

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Representação da malha espacial em Diferenças Finitas.....	56
Figura 5.2 - Malha espacial em $r=0$ em Diferenças Finitas.....	57

Figura 5.3 - Distribuição de temperatura com diferentes malhas para $z=0,4m$ em diferentes instantes de tempo.....	59
--	----

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 - Resultados obtidos com os diferentes métodos.....	69
Figura 6.2 - Distribuição de temperatura experimental e calculada com duas fontes de calor e com parâmetros estimados através do Algoritmo Genético	71
Figura 6.3 - Distribuição de temperatura experimental e calculada com a média dos dados estimados com o Algoritmo Genético para o Pavimento Rígido	76
Figura 6.4 - Distribuição de temperatura experimental e calculada com a média dos dados estimados com o Algoritmo Memético para o Pavimento Rígido.....	78
Figura 6.5 - Distribuição de temperatura experimental e calculada com a média dos dados estimados com o Algoritmo Genético para o Pavimento Flexível	81
Figura 6.6 - Distribuição de temperatura experimental e calculada com a média dos dados estimados com o Algoritmo Memético para o Pavimento Flexível.....	83

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	PROSPECÇÃO DE PAVIMENTOS CONSTRUÍDOS	21
2.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PAVIMENTOS.....	24
2.3	ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS	28
2.4	PROPOSIÇÃO DO PROBLEMA	31
3.	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E EXPERIMENTOS	32
3.1	PAVIMENTOS EXPERIMENTAIS	32
3.2	SONDA TÉRMICA	35
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	37
3.4	CALIBRAÇÃO DAS MEDIDAS DE TEMPERATURA.....	38
4.	MODELOS MATEMÁTICOS DA TRANSFERÊNCIA DO CALOR... 50	
4.1	MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL.....	50
4.2	MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL.....	52
5.	SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	54
5.1	COMPUTADOR E SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO.....	54
5.2	MODELO UNIDIMENSIONAL.....	54
5.3	MODELO BIDIMENSIONAL.....	55
5.4	PROBLEMA INVERSO.....	60
5.4.1	MÉTODO PROCURA EM REDE MODIFICADO	60
5.4.2	ALGORITMO GENÉTICO E ALGORITMO MEMÉTICO	62
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
6.1	ANÁLISE DO PROBLEMA UNIDIMENSIONAL	67
6.2	ANÁLISE DO PROBLEMA BIDIMENSIONAL.....	70
6.2.1	PAVIMENTO RÍGIDO	74
6.2.2	PAVIMENTO FLEXÍVEL	79
7.	CONCLUSÕES.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

As rodovias brasileiras, em geral, mantêm-se em bom estado de conservação até 10 a 20 anos de tráfego, dependendo do volume de tráfego e das condições de solo e chuvas a que são submetidas. O excesso de carga e a demora para realizar a manutenção, têm-se mostrado decisivos para a conservação das estradas.

A manutenção e a restauração são realizadas após uma prospecção das reais condições do pavimento. A realização de prospecções preliminares na investigação dos pavimentos é uma obrigatoriedade, já que não estão disponíveis informações a respeito da estrutura, da construção e da degradação dos mesmos ao longo dos anos. Estas prospecções, que são procedimentos onerosos, além de envolver equipamento e pessoas especializadas, interferem no tráfego e necessitam de análises laboratoriais, com um conseqüente elevado custo econômico.

A espessura das camadas e a identificação dos materiais existentes são informações essenciais, e em alguns casos suficientes, para a tomada de decisões. Para a identificação das espessuras das camadas dos pavimentos, existe uma técnica não-destrutiva, onde utiliza-se o georadar. Porém, seu uso é restrito devido ao custo econômico do equipamento e da complexidade de análise dos dados. De acordo com estes aspectos, é importante o estudo de novas técnicas de prospecção, com uma avaliação específica, de menor custo, invasão e interferência no tráfego, do que as técnicas existentes.

Visando desenvolver uma técnica para a análise de pavimentos já construídos, o presente trabalho tem por objetivo a estimação das espessuras e a identificação dos materiais constituintes dos pavimentos. Inicialmente, a técnica necessita da instalação de uma sonda térmica, composta por sensores de temperatura e fontes de calor, em diversas profundidades do pavimento analisado, para a obtenção das distribuições de temperaturas ao longo do tempo. Dessa forma, propõe-se a perfuração vertical com apenas um furo realizado no pavimento, facilmente reversível, e a instalação da sonda térmica. Para a obtenção dos dados é realizado o monitoramento e a captura das medidas dos sensores de temperatura.

A partir das distribuições de temperaturas experimentais, estas são comparadas com as distribuições de temperaturas calculadas a partir do Problema Direto (PD) de transferência de calor, onde estimam-se os parâmetros térmicos e as espessuras com a resolução do Problema Inverso (PI). O Problema Direto é obtido da Equação de Condução do Calor, com condições de contorno de primeira espécie e é resolvido pelo método de Diferenças Finitas Centrais, usando-se um esquema explícito de avanços temporais, o qual contém os parâmetros térmicos condutividade e difusividade térmica, além das espessuras das camadas do pavimento. O Problema Inverso é resolvido com os métodos Procura em Rede Modificado (PRM), Algoritmo Genético (AG) e Algoritmo Memético (AM), onde estimam-se os parâmetros térmicos e as espessuras, minimizando a diferença das distribuições de temperaturas experimentais e calculadas com o Problema Direto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo descreve as técnicas utilizadas na prospecção de pavimentos, bem como modelos de transferência de calor em pavimentos e de estimação de parâmetros, além da descrição da proposta do trabalho.

2.1 PROSPECÇÃO DE PAVIMENTOS CONSTRUÍDOS

Pavimento pode ser definido como uma estrutura semi-infinita de múltiplas camadas da qual sua função destina-se em transmitir a carga do tráfego para o subsolo, além de prover aos usuários boas condições de rodagem como conforto e segurança. A degradação de pavimentos é bem rápida quando comparada a outras estruturas de engenharia (edifícios ou represas, por exemplo), estes são designados com bom desempenho de 10 a 20 anos de tráfego, depois disto, são necessárias intervenções periódicas (de 4 a 8 anos).

O conhecimento da estrutura existente dos pavimentos rodoviários é fundamental para planejar estratégias de manutenção, que podem otimizar os investimentos e maximizar os benefícios para a sociedade. O conhecimento dos materiais, suas propriedades reais e as espessuras das camadas existentes são informações necessárias para a tomada de decisões sobre a restauração dos pavimentos. Tais informações, em geral, não estão disponíveis, já que não existe um relatório padrão com informações sobre a construção, nem tão pouco sobre as transformações do pavimento ao longo do tempo.

No Brasil, para o reconhecimento dos materiais dos pavimentos é usual abrir janelas (ou trincheiras) nos pavimentos. Este procedimento é oneroso e demorado, causando engarrafamento, pois para um estudo local é necessário fechar o tráfego temporariamente (SENÇO, 1997).

A recomendação do DNIT (2006a, 2006b) – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – é a realização de uma prospecção preliminar através de poços de sondagem, para a análise de caracterização, umidades, densidades,

compactação e CBR (Índice de Suporte Califórnia) dos materiais granulares e caracterização das misturas betuminosas. Os poços de sondagem são realizados a cada 2km , ou mais próximos, caso haja mudança na estrutura do pavimento. Esses poços consistem na abertura de 1m^2 do pavimento e retirada de material para posterior análise em laboratório. Essas prospecções envolvem equipamentos, máquinas e pessoal, além da interferência no tráfego.

Na Figura 2.1 são apresentadas fotos de poços de sondagem (BERNUCCI et al., 2006).

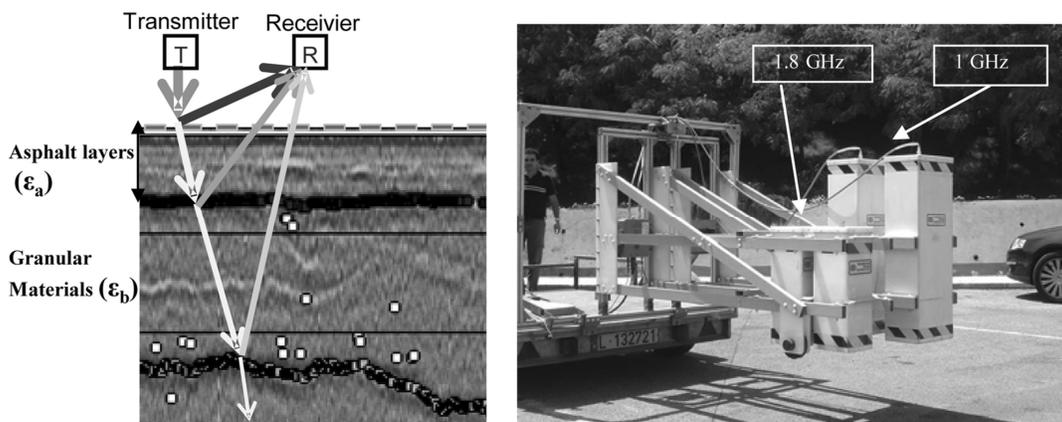


FONTE: BERNUCCI et al.(2006)

Figura 2.1 - Exemplos de extração de corpos-de-prova e de poços de sondagem em pavimentos

Técnicas não-destrutivas de determinação de espessuras e mudanças na estrutura já estão em uso, como o georadar ou GPR – Ground Penetrating Radar (COLAGRANDE et al., 2007; EVANS et al., 2007; FONTUL et al., 2007; NIELSEN et al., 2008), mas o uso deste não é prática no Brasil. O GPR é um método de sons eletromagnéticos, o qual usa frequências de rádio para investigação subterrânea.

A Figura 2.2 apresenta um esquema representando o uso do georadar e uma foto do equipamento.



FONTE: FONTUL et al.(2007)

Figura 2.2 – Georadar

O GPR tem sido usado nos últimos anos por sua alta eficiência, rápida velocidade, não-destrutividade e limitada interferência na circulação de veículos e pedestres (COLAGRANDE et al., 2007). No entanto, para calcular as espessuras das camadas do pavimento, é necessário o uso de técnicas invasivas para a calibração dos dados do GPR, já que é preciso conhecer parâmetros relacionados ao material (EVANS et al., 2007; FONTUL et al., 2007).

A interpretação dos resultados obtidos com o GPR é ainda bastante complexa e requer bastante experiência (FONTUL et al., 2007), o que justifica o uso restrito deste equipamento no Brasil.

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PAVIMENTOS

O conhecimento das propriedades térmicas dos pavimentos é de grande importância, já que este conhecimento forma a base para o dimensionamento, construção, manutenção, evolução e reabilitação dos pavimentos (MRAWIRA e LUCA, 2006).

As variações térmicas ocorrem na superfície sob influência da radiação solar, da temperatura do ar e da ação dos ventos, influenciando na temperatura do pavimento de forma contínua e igual, para pequenas áreas. Consequentemente, o fluxo de calor dentro do pavimento acontece geralmente na direção vertical, sem fluxos de calor paralelos à superfície (WOLFE et al., 1995). De acordo com este dado, a transferência de calor pode ser descrita em uma dimensão, na direção normal à superfície ao pavimento.

No estudo da distribuição de temperatura dos pavimentos, são utilizados basicamente modelos compostos por equações empíricas, envolvendo diversas variáveis, e modelos com equações diferenciais parciais, unidimensional e bidimensional, com soluções analíticas e numéricas, através do método de diferenças finitas ou do método de elementos finitos.

CHEN et al. (2008), na investigação da distribuição de temperaturas para diferentes amostras de pavimentos, construíram diferentes equações empíricas. Devido à variação destas equações, concluiu que o perfil das distribuições de temperaturas é sim afetado pelas propriedades térmicas dos diferentes materiais.

Alguns pesquisadores (SOUTHGATE e DEEN, 1969; SOLAIMANIAN e KENNEDY, 1993; PARK et al., 2001; DIEFENDERFER et al., 2006) desenvolveram diferentes modelos matemáticos de perfis de temperatura em pavimentos. A maioria destes é baseada na estatística, onde normalmente são aplicadas fórmulas empíricas para prever rapidamente certas temperaturas extremas (máxima e/ou mínima) dentro de um sistema de pavimento, ou uma temperatura específica a uma determinada profundidade do pavimento. A desvantagem destes tipos de fórmulas é que elas predizem razoavelmente, utilizando os dados de entrada incluídos dentro do banco de dados de amostra original (amostras utilizadas para os experimentos), mas não garantem a precisão de predição para dados de entrada fora do banco de dados existente.

Métodos analíticos para a resolução de equações diferenciais parciais de transferência de calor em pavimentos foram desenvolvidos por dois pesquisadores.

CHEN e LIN (1991) desenvolveram um método envolvendo a aplicação híbrida do método de transformada de Laplace e do Método de Elementos Finitos para a solução de problemas de condução de calor transiente linear. Resolveram alguns problemas com várias camadas e diferentes condições de contorno (inclusive variáveis no tempo, e de diferentes espécies). Para o uso do método, são necessárias apenas as condições de contorno e as propriedades térmicas, pois não necessita de dados de todos os nós como o Método de Elementos Finitos (depende do caso). Devido a não haver um passo temporal, o método pode calcular a distribuição de temperatura em um tempo específico. A computação numérica para os problemas não tem maior custo computacional quando o número de camadas aumenta, e a inversão numérica da transformada de Laplace também não se torna complicada com mais de duas camadas.

WANG et al. (2009) propuseram uma solução analítica de um campo de temperatura simétrico nos eixos de um pavimento multicamada. Modelaram um problema de transferência de calor bidimensional em coordenadas cilíndricas. Na solução, foi usada a transformada integral de Hankel com respeito à coordenada radial e polinômios trigonométricos interpoladores, baseados na transformação discreta de Fourier, usados para incluir medidas da temperatura do ar e intensidade de radiação solar durante um dia, das quais são componentes essenciais nas condições de contorno para o problema de transferência de calor. Um programa em linguagem FORTRAN foi codificado para implementar esta solução analítica. Resultados da medida do campo de temperatura do pavimento rígido mostraram que a solução analítica gera valores razoáveis de temperatura para o perfil do pavimento. Evidenciaram que a principal barreira associada com métodos numéricos para predizer perfis de temperatura em pavimentos, é que uma distribuição inicial de temperatura (condição inicial) esteja disponível, para calcular a distribuição de temperatura para o tempo posterior.

Foram desenvolvidos dois trabalhos recentes e importantes na resolução numérica de equações diferenciais parciais de transferência de calor em pavimentos.

JIA et al. (2007) calcularam as temperaturas em um pavimento através de uma Equação Diferencial Parcial em duas dimensões, utilizando o método de Diferenças Finitas. Utilizaram uma condição de contorno na superfície do pavimento de 3ª espécie

(considerando a temperatura da superfície, a temperatura do ar, e os fluxos radiativos e convectivos) e condição adiabática (fluxo zero) na maior profundidade, já que é desconhecida a temperatura. Utilizaram intervalos dos parâmetros térmicos no cálculo da temperatura, e através de uma análise de sensibilidade concluíram que a maior interferência na temperatura acontece pela condutividade térmica, e conseqüentemente pela difusividade térmica. Para uma melhor previsão de temperaturas no pavimento, foi usado o Algoritmo Genético, como resolução de um Problema Inverso, para ajustar os parâmetros térmicos da camada asfáltica e da base do pavimento.

CHEN et al. (2008) controlaram em laboratório um ambiente que simula o natural, com lâmpada simulando o sol e ventilador simulando o vento. Na condição de contorno para a superfície foi assumida uma convecção natural com fluxo de ar laminar. Utilizaram o Método dos Elementos Finitos para o cálculo da distribuição de temperaturas para diferentes camadas e um software próprio para a estimação de parâmetros térmicos, o qual requer 5 parâmetros de entrada, tais como fluxo de calor, coeficiente de transferência de calor, temperatura ambiente, temperatura de superfície, e emissividade da superfície. Utilizaram termopares para medir a temperatura ao longo das profundidades de diferentes amostras, estimaram a condutividade térmica e a capacidade térmica (ou calor específico), e encontraram valores dentro dos intervalos existentes na literatura.

A maioria dos métodos desenvolvidos para descrever a distribuição de temperatura em pavimentos, tem buscado utilizar diversas variáveis para melhor aproximar-se da realidade (variáveis naturais: vento, radiação solar, irradiação, etc.). Na tentativa de contemplar os diversos aspectos e variáveis do clima, principalmente na condição de contorno superfície-atmosfera, cada método torna-se tão complexo quanto o próprio clima. O objetivo principal dos métodos existentes é melhor predizer o perfil de temperatura dentro dos pavimentos, utilizando tantas variáveis de entrada quanto possíveis, sem destruir o pavimento.

De acordo com as condições iniciais de temperatura do pavimento e com a influência das trocas de calor entre superfície e as camadas mais profundas, WOLFE et al. (1995) na resolução do problema de transferência de calor em pavimentos (utilizou um método próprio), considerando o tempo inicial ao nascer do sol, assumiu que existe um equilíbrio de temperatura dentro do pavimento como um resultado do resfriamento

durante a noite anterior. Isto foi confirmado por medidas de campo durante os meses de primavera e verão. Dessa forma, a temperatura foi distribuída linearmente entre a temperatura de superfície e a do subsolo, representada como uma constante. Esse equilíbrio linear também pode ser percebido no trabalho de TRAMONTINI (2007) para as camadas mais profundas e por GUI et al. (2007) através de medidas experimentais, onde foi observado que as temperaturas se tornam constantes em relação ao tempo (independente das condições de superfície) aproximadamente a 60cm da superfície, depois disso, decrescendo linearmente com a profundidade.

Para a caracterização dos materiais é necessário ter consciência da mudança das propriedades térmicas dos materiais devido a alguns fatores, tais como a temperatura e o teor de água presente no sistema pavimento multicamada.

As propriedades térmicas dos materiais de pavimentos não alteram significativamente com a variação de temperatura a que estão sujeitas as rodovias (INCROPERA e DEWITT, 2003), e podem ser consideradas constantes.

PIETROBON et al. (2000) mostraram que a condutividade térmica de materiais de construção aumenta linearmente em função do teor de água, devido ao fato de que a água, com poder de isolamento térmico inferior ao do ar, substitui parte do volume gasoso contido no interior dos poros. Levando em consideração este aspecto, é importante analisar e realizar experimentos em pavimentos com o nível do teor de água próximo ao residual, quando o estudo tem como característica a transferência de calor.

GUI et al. (2007) em um estudo dos efeitos das propriedades termofísicas do pavimento nas temperaturas máximas e mínimas em pavimentos, analisou a variação da condutividade térmica, da capacidade térmica, da difusividade térmica, do albedo e da emissividade. Neste estudo, para comparar as propriedades, com suas diferentes unidades e taxas, normalizou cada propriedade e fez uma comparação adimensional. Concluiu que a temperatura máxima aumenta com o aumento de cada propriedade separadamente, mas que o albedo tem maior influência. A temperatura mínima aumenta com o aumento da condutividade térmica, capacidade térmica e difusividade térmica e diminui com o aumento do albedo e emissividade, mas sofre maior influência da difusividade e da condutividade térmica.

TRAMONTINI (2007) analisou a variação da temperatura de superfície em pavimentos flexível e rígido com a variação das propriedades térmicas: calor específico, condutividade térmica e coeficiente de troca térmica entre o pavimento e o ar. Pela comparação dos resultados, concluiu que a influência do coeficiente de troca térmica é bem maior do que a do calor específico e a condutividade térmica; e que a influência do calor específico é quase a mesma da condutividade térmica.

2.3 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Quando se deseja encontrar os efeitos resultantes a partir do conhecimento das causas, trata-se de um *Problema Direto*. Por outro lado, quando se deseja encontrar as causas desconhecidas, através de observações dos efeitos desse fenômeno, trata-se de um *Problema Inverso*. Causas, num modelo matemático, são as condições iniciais e de contorno, termos de fonte e propriedades do sistema e/ou material (CERVI, 2009).

A estimação de parâmetros acontece através da aplicação de algum método de resolução do Problema Inverso acoplado ao Problema Direto. O Problema Direto de transferência de calor em pavimentos pode ser unidimensional, bidimensional ou tridimensional, estacionário ou transiente. O objetivo é aproximar a distribuição de temperatura calculada com o PD dos dados experimentais de temperatura, estimando assim, os coeficientes ou parâmetros do modelo (espessura e difusividade térmica das camadas). A comparação entre os dados calculados e experimentais ocorre através do coeficiente de determinação (função objetivo), que qualifica os respectivos parâmetros do PD, baseado nos erros entre os dados.

Métodos determinísticos como o Método de Newton, o Método Quase-Newton e o Método de Levenberg-Marquardt são baseados em informação de gradiente, para minimizar a função objetivo. Embora estes métodos converjam geralmente a mínimos locais ao invés de globais, a principal vantagem é a boa taxa de convergência. No entanto, apresentam problemas de singularidades e derivadas nulas.

Novas metodologias de aproximação estão sendo desenvolvidas para resolver problemas inversos, particularmente aproximações estocásticas, das quais geralmente

provém uma boa solução ou até o ótimo global. No entanto, o tempo computacional que eles requerem geralmente excede aqueles dos métodos determinísticos (MARIANI et al., 2007). Outras técnicas baseadas no campo de inteligência artificial, como algoritmos genéticos e redes neurais artificiais, tem sido usadas para a solução de problemas inversos.

Em técnicas desenvolvidas para a solução do Problema Inverso como o Algoritmo Genético e o Algoritmo Memético, os modelos numéricos devem estar aptos a resolver o Problema Direto, dentro de intervalos determinados dos valores dos coeficientes a serem estimados. Como os procedimentos para solução são geralmente iterativos, o Problema Direto deve ser resolvido diversas vezes. Então, é desejável ter um método preciso para solução do Problema Direto que requer um tempo computacional relativamente curto (MARIANI et al., 2007).

Para a resolução do PI neste trabalho foram escolhidos três métodos: Procura em Rede Modificado, Algoritmo Genético e Algoritmo Memético.

No Método Procura em Rede Modificado são definidos os intervalos de cada parâmetro a serem estimados (intervalos válidos) considerados possíveis de solução, e a partição de cada intervalo relativo a cada parâmetro. Por esta definição inicial, é considerado um método de soluções subótimas (SILVA NETO e MOURA NETO, 2005; BORGES, 2008; CERVI, 2009), já que não há garantia que a solução ótima pertence aos intervalos pré-definidos e não há um critério de convergência (como um gradiente, por exemplo). O método encontra o melhor conjunto de parâmetros por exaustão, calculando as distribuições de temperatura através de todas as possibilidades de combinações dos coeficientes ou parâmetros dentro dos intervalos iniciais, refinando os intervalos a cada término deste processo, com um número máximo de refinamentos pré-definidos.

Como o método Procura em Rede Modificado se torna oneroso com o aumento do número de parâmetros a serem estimados, ou de alguma outra variável comentada anteriormente, buscou-se estimar os parâmetros através de métodos evolutivos, como o Algoritmo Genético e o Algoritmo Memético.

Algoritmo Genético é um algoritmo de otimização baseado em mecanismos de seleção natural e genética. A aproximação é baseada na sobrevivência de Darwin da hipótese de adaptação.

O AG e o AM são algoritmos evolutivos, que trabalham com vários conjuntos de parâmetros simultaneamente. Por isso, é mais provável convergir para a solução global. Cada conjunto de parâmetros é chamado indivíduo ou cromossomo, e todos formam uma população. As regras de transição são probabilísticas ao invés de determinísticas. A pesquisa randômica é guiada pelo valor da aptidão (coeficiente de determinação) de cada indivíduo e como este é comparado aos outros. Por isso, os indivíduos com maior aptidão têm mais condições de sobreviver e passar suas informações (genes) às novas gerações. Em cada geração, o método explora diferentes áreas do espaço dos parâmetros, e então direciona a busca para regiões onde há uma alta probabilidade de encontrar melhor desempenho (KRISTINSSON e DUMONT, 1992). Estes algoritmos têm como base três operadores importantes durante a evolução: avaliação, cruzamento e mutação.

Na avaliação, cada indivíduo tem sua aptidão definida pelo coeficiente de determinação, calculado através do seu uso na resolução do PD, e comparação com os dados experimentais. Os indivíduos com maior aptidão possuem maior probabilidade de passar suas informações na criação de novos conjuntos de parâmetros (indivíduos).

Através da seleção de indivíduos de acordo com sua aptidão, são realizados cruzamentos num processo sexuado (entre dois indivíduos) ou assexuado (apenas um indivíduo) para a troca de informações na criação de novos indivíduos.

A mutação é um processo que altera parâmetros de alguns indivíduos selecionados aleatoriamente na população, buscando ampliar e diversificar a busca por indivíduos dentro dos intervalos dos coeficientes pré-definidos inicialmente.

O AM tem como adicional e diferencial (método híbrido) uma busca local em determinado instante do processo evolutivo (MOSCATO, 1989), aplicando algum outro método de busca acoplado ao algoritmo, como por exemplo, o Método de Newton, o Método Quase-Newton ou o Método de Levenberg-Marquardt. Essa estratégia, busca valorizar a vizinhança dos indivíduos em determinado instante e pode acelerar a estimação dos parâmetros.

Algoritmos genéticos têm se comportado bem em múltiplos Problemas Diretos, pois têm sido usados em diversas aplicações (como função de otimização, processamento de imagem e identificação de sistemas). No entanto não é conhecida uma condição necessária e suficiente da qual um PD é geneticamente otimizado (KRISTINSSON e DUMONT, 1992). De qualquer forma, tem se mostrado que aplicações nas quais AGs falham são patológicas, e geralmente falham por otimizar alguma outra técnica conhecida na busca local (o que acontece no AM, por exemplo), e não por uma busca exaustiva.

Estes tipos de algoritmos são inerentemente paralelos. Todos os cromossomos ou indivíduos da população evoluem simultaneamente sem coordenação central. Para realizar seu potencial completo, AGs podem ser implementados em arquiteturas de computação paralela.

2.4 PROPOSIÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo deste trabalho é propor e analisar a viabilidade de uma técnica para determinar as espessuras e os materiais das camadas de pavimentos rodoviários. A técnica consiste na instalação de uma sonda térmica, com sensores de temperatura e fontes de calor, no pavimento para a obtenção da distribuição de temperatura em função do tempo e do espaço, em diferentes profundidades; na resolução do problema de transferência de calor em duas dimensões, em coordenadas cilíndricas, considerando condições de fronteira de primeira espécie obtidas experimentalmente; e na estimação das espessuras e propriedades térmicas dos materiais de cada camada através do Problema Inverso.

3. DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E EXPERIMENTOS

A realização dos experimentos compreende a calibração dos sensores de temperatura e uma análise de incerteza das medidas; a instalação de uma sonda térmica para a obtenção das distribuições de temperatura em dois pavimentos experimentais; análise de dados; e generalização das condições de contorno do problema.

3.1 PAVIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos de medida da temperatura em pavimentos foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ. A temperatura foi monitorada em dois pavimentos, um rígido e um flexível, através de uma sonda térmica (sensores de temperatura em diversas profundidades e fontes de calor nas camadas mais profundas), compostas por 9 sensores de temperatura, colocadas em orifícios de $0,012m$ de diâmetro por $0,64m$ de profundidade para o pavimento rígido e $0,56m$ de profundidade para o pavimento flexível (Fig. 3.1). Devido a perfuração diferente para cada pavimento, por causa de problemas na execução da perfuração, o sensor 1 não é considerado para o Pavimento Flexível, já que a sonda não é instalada completamente dentro do pavimento.

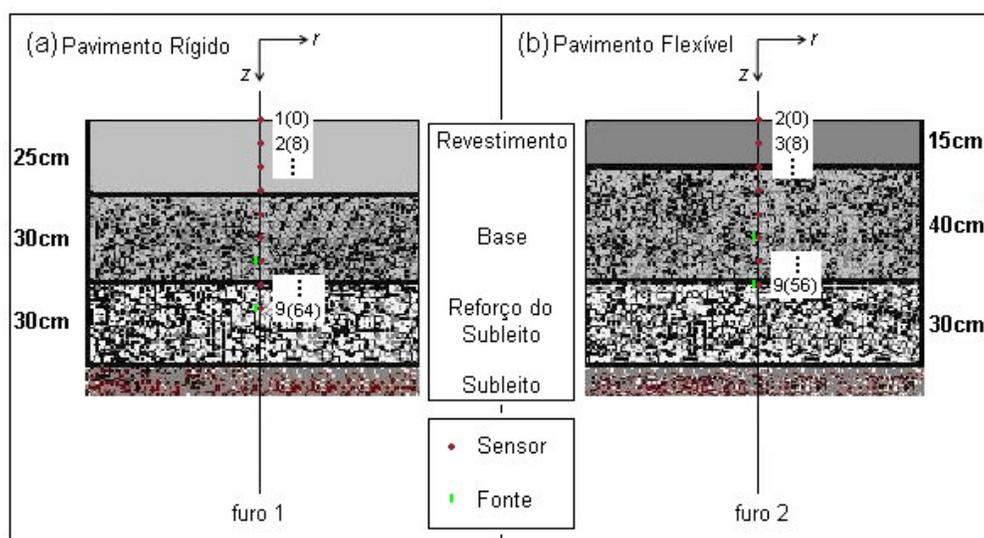


Figura 3.1 - Esquema representando os pavimentos (o primeiro nº indica o sensor e o segundo a profundidade em *cm*)

Na Tabela 3.1 são mostradas as posições dos sensores de temperatura e as fontes de calor instaladas nos pavimentos.

Tabela 3.1 – Posição dos sensores de temperatura e fontes de calor

Pavimento Rígido		Pavimento Flexível	
Sensor/Fonte	z (m)	Sensor/Fonte	z (m)
S1	0	S1	-
S2	0,08	S2	0
S3	0,16	S3	0,08
S4	0,24	S4	0,16
S5	0,32	S5	0,24
S6	0,4	S6	0,32
S7/F1	0,48	S7/F1	0,4
S8	0,56	S8	0,48
S9/F2	0,64	S9/F2	0,56

Os pavimentos estão caracterizados da seguinte forma, com relação às camadas granulares:

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

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

Base: com espessuras de 30cm no pavimento rígido e 40cm no pavimento flexível, é composta de BGS (Brita Graduada Simples) de diversos tamanhos, que quando compactada apresenta poucos vazios, ficando assim responsável pela resistência e distribuição dos esforços causados pelo tráfego.

Os revestimentos são de dois tipos: *Concreto de Cimento Portland (Pavimento Rígido)*: com 25cm de espessura executado à base de cimento Portland e água; e

Betuminoso (Pavimento Flexível): possui espessura de 15cm de pré-misturado a frio, executado com emulsão (água, betume e emulsificante). Foi usada uma camada selante (banho de emulsão asfáltica sobre o revestimento), com a finalidade de selar o pavimento, impermeabilizando-o.

Para a análise da estimação dos parâmetros dos pavimentos é necessário o conhecimento das espessuras e das propriedades térmicas envolvidas no problema. Percebe-se uma grande variação na dimensão e nas propriedades térmicas na literatura, já que os materiais usados são característicos de cada região e conseqüentemente diferentes apesar da mesma nomenclatura. O reforço do subleito, por exemplo, que é composto de “rachão”, não possui especificamente propriedades térmicas na literatura.

De acordo com este aspecto, foram tomadas como referência as propriedades térmicas segundo ABNT (1972 apud HELLMANN, 2008; 2004 apud TRAMONTINI, 2007), por melhor representarem as características do pavimento experimental utilizado, além das espessuras conhecidas pela construção pré-definida dos pavimentos. Na Tabela 3.2 são mostrados os dados utilizados para os pavimentos experimentais.

Tabela 3.2 – Dados experimentais dos parâmetros dos pavimentos

	Parâmetros	Dados Exp. Rígido	Dados Exp. Flexível
Espessuras	$z_1 (m)$	0,25	0,15
	$z_2 (m)$	0,30	0,40
	$z_3 (m)$	0,30	0,30
Difusividades térmicas	$\alpha_1 (m^2/s)^*$	7,29 a 7,95 ($\cdot 10^{-7}$)	2,92 a 5,43 ($\cdot 10^{-7}$)
	$\alpha_2 (m^2/s)^*$	5,38 a 8,75 ($\cdot 10^{-7}$)	5,38 a 8,75 ($\cdot 10^{-7}$)
	$\alpha_3 (m^2/s)^*$	-	-
Condutividades térmicas	$k_2 (W/m^{\circ}C)^*$	0,7	0,7
	$k_3 (W/m^{\circ}C)^*$	-	-

* FONTE: ABNT (1972 apud HELLMANN, 2008; 2004 apud TRAMONTINI, 2007)

3.2 SONDA TÉRMICA

A sonda térmica é composta por sensores de temperatura digitais (Fig. 3.2) e fontes de calor (resistores). Tem-se em vista que quanto maior o número de sensores de temperatura maior é a informação disponível sobre a distribuição de temperatura nos pavimentos, e melhor é a análise do problema e cálculo do Problema Inverso. A escolha por 9 sensores de temperatura limitou-se pelo espaço físico de instalação.



Figura 3.2 - Sensor de temperatura digital

Na Figura 3.3 é mostrada a sonda térmica e uma régua de 50cm para comparação, e na Fig. 3.4 é mostrada a fonte de alimentação dos resistores. Os resistores escolhidos como fontes de calor são resistores de $2,2\Omega$, alimentados com uma potência de 2V cada, que foi definida em testes preliminares.

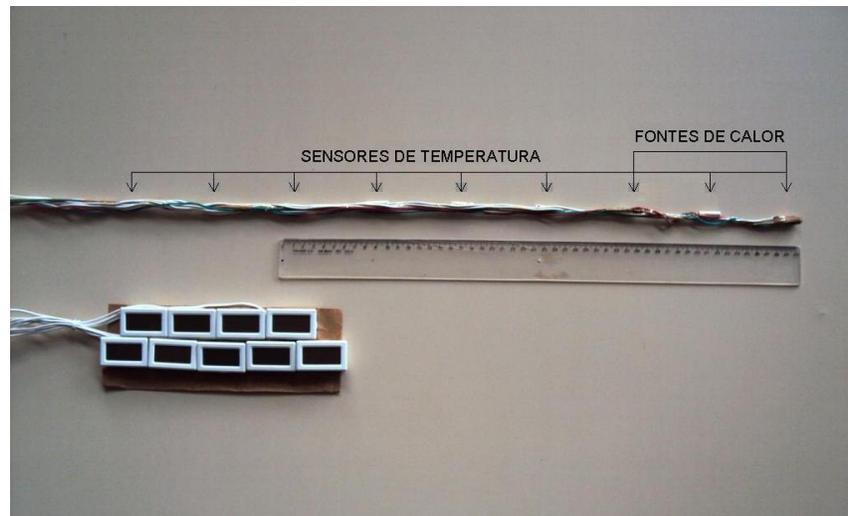


Figura 3.3 - Sonda térmica

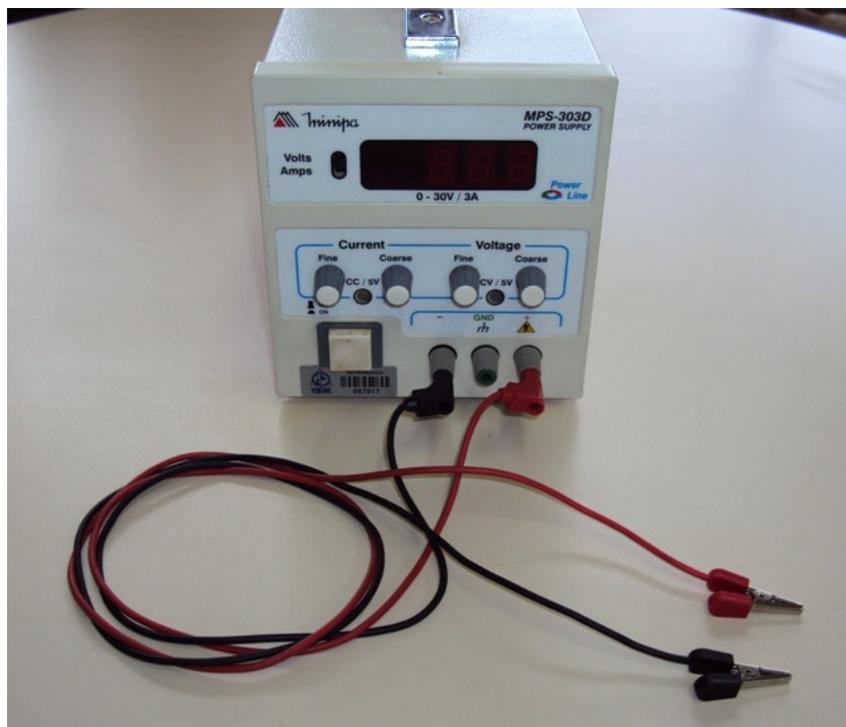


Figura 3.4 - Fonte de alimentação dos resistores

A medida de temperatura é a informação crucial na proposta apresentada, pois é consequente dos fenômenos térmicos, sendo a variação de temperatura dependente dos diferentes materiais dos pavimentos. Desta forma, a medida obtida com a sonda térmica,

é a medida do conjunto ar/sonda térmica/pavimentos, o que representa uma limitação e um erro experimental.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Realizada a instalação da sonda térmica, é ajustada a fonte de alimentação dos resistores e são ligados os sensores de temperatura.

Como os sensores de temperatura são digitais, é necessário o monitoramento e captura das temperaturas. Essa captura foi realizada através de fotos dos visores dos sensores, tal como é mostrado na Fig. 3.5.

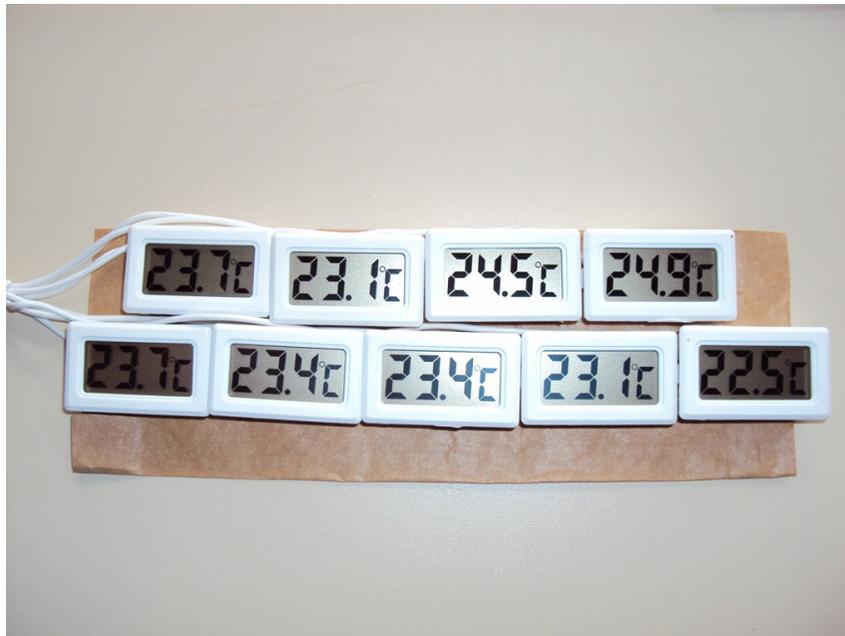


Figura 3.5 - Visores dos sensores de temperatura

A captura dos dados para o pavimento rígido compreendeu um tempo total de 8 horas, e para o pavimento flexível um tempo total de 7 horas, durante um dia para cada pavimento. Na Tabela 3.3 é definida a captura experimental dos dados de temperatura de acordo com o horário do dia em que foram realizados os experimentos.

Tabela 3.3 - Horário de leitura dos dados experimentais

Pavimento	Rígido	Flexível
Tempo	Horário	Horário
t ₀	9:30	8:30
t ₁	10:00	9:00
t ₂	10:30	9:30
t ₃	11:00	10:00
t ₄	11:30	10:30
t ₅	12:00	11:00
t ₆	12:30	11:30
t ₇	13:00	12:00
t ₈	13:30	12:30
t ₉	14:00	13:00
t ₁₀	14:30	13:30
t ₁₁	15:00	14:00
t ₁₂	15:30	14:30
t ₁₃	16:00	15:00
t ₁₄	16:30	15:30
t ₁₅	17:00	-
t ₁₆	17:30	-

3.4 CALIBRAÇÃO DAS MEDIDAS DE TEMPERATURA

Toda medida experimental contém algum tipo de erro, que deve ser avaliado de tal forma que possa ter uma idéia da confiança possível sobre os dados disponíveis. Por isso, foi realizada uma calibração com um termômetro padrão e uma análise de incerteza. O termômetro padrão (*TP*) é um termômetro calibrado pela INCOTERM Indústria de termômetros, com certificado de calibração número 007218/001.

O termômetro padrão e os sensores de temperatura usados na sonda térmica foram colocados em água a algumas temperaturas distintas, até que entrassem em equilíbrio térmico. Na Tabela 3.4 são mostrados os dados obtidos com os sensores de temperatura e o termômetro padrão.

Tabela 3.4 - Dados utilizados na calibração dos sensores de temperatura

Sensor/TP	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$T_4(^{\circ}\text{C})$	$T_5(^{\circ}\text{C})$	$T_6(^{\circ}\text{C})$	$T_7(^{\circ}\text{C})$	$T_8(^{\circ}\text{C})$
TP	6,2	12,1	18	29	36	48,2	58	62
S1	5,4	11,2	17,5	28,1	35,4	47,6	56,8	60,6
S2	3,4	9,3	15,6	26,3	32,3	44,5	54,5	57,7
S3	3,8	9,7	15,7	26,1	33	45,7	56,6	58,6
S4	4,5	10,4	16,7	27	33,7	46,5	56,4	60,7
S5	4,6	10,3	16,6	27,2	33,5	46,5	56,4	59,9
S6	4,6	10,4	16,3	27,4	33,3	45,4	55,5	58,8
S7	5,3	11,4	17,4	28,1	34,5	46,7	56,7	60,7
S8	4,5	10,5	17,2	27,1	34,3	46,4	55,9	60,5
S9	4,3	10,7	16,3	27,7	33,2	45,6	55,5	58,5

A calibração foi realizada ajustando retas na comparação entre as medidas do termômetro padrão e as medidas dos sensores de temperatura. As equações de calibração para cada um dos sensores de temperatura são apresentadas na Tab. 3.5, juntamente com o coeficiente de determinação R^2 (Eq. 3.1) destes ajustes e um desvio padrão em relação à reta de ajuste (σ_c), utilizado na análise de incerteza.

Tabela 3.5 - Equações de correção dos sensores de temperatura

Sensor	Equação de Correção	R^2	σ_c
S1	$0,991(S1_*) - 0,586$	0,999	0,2597
S2	$0,973(S2_*) - 2,352$	0,999	0,3512
S3	$0,998(S3_*) - 2,471$	0,999	0,5936
S4	$1,002(S4_*) - 1,781$	0,999	0,3300
S5	$0,995(S5_*) - 1,643$	0,999	0,3274
S6	$0,973(S6_*) - 1,318$	0,999	0,3092
S7	$0,987(S7_*) - 0,650$	0,999	0,2293
S8	$0,993(S8_*) - 1,410$	0,999	0,3583
S9	$0,971(S9_*) - 1,246$	0,999	0,4690

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{l=1}^L (Tc_l - Te_l)^2}{\sum_{l=1}^L Te_l^2 - \left(\sum_{l=1}^L Te_l\right)^2 / L} \quad (3.1)$$

onde Te_l e Tc_l são as temperaturas experimentais e calculadas, respectivamente;

l é a iteração dos dados de temperatura, sendo $l=1,2,3...L$.

Para a análise do erro, também foi realizada a repetição de medidas para cada sensor de temperatura, com o intuito de analisar um erro de repetição. Como os sensores de temperatura são utilizados para medidas dentro dos pavimentos, as medidas repetidas foram realizadas a 30cm de profundidade em um dos pavimentos. A repetição de medidas demonstra uma forma de erro experimental, já que depende da precisão da tentativa de realizar a mesma medida nas mesmas condições anteriores. As medidas de repetição são mostradas na Tab. 3.6, juntamente com um desvio padrão para cada sensor de temperatura.

Tabela 3.6 – Medidas de repetição dos sensores de temperatura

Sensor	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	σ_r
S1	28	28,2	28,4	28,6	28,6	0,2608
S2	25,4	25,5	26,4	26,4	26,6	0,5639
S3	24,6	25	25,3	25,4	25,5	0,3647
S4	26,8	27	27,2	27,3	27,6	0,3033
S5	26,6	27,3	27,4	27,5	27,6	0,3962
S6	26,2	26,7	26,8	26,8	26,8	0,2608
S7	27,4	27,5	27,8	27,8	27,9	0,2168
S8	27,3	27,2	27,5	27,4	27,5	0,1304
S9	26,6	26,5	26,7	26,8	26,6	0,1140

Para a análise de incerteza das medidas foram utilizados o desvio padrão de calibração (σ_c) e o desvio padrão de repetição (σ_r), através da Eq. 3.2. Na Tabela 3.7 é mostrada a incerteza, para cada um dos sensores de temperatura.

$$I = \pm \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_r^2} \quad (3.2)$$

Tabela 3.7 – Incerteza da medida dos sensores de temperatura

Sensor	σ_c (°C)	σ_r (°C)	I (°C)
S1	0,2597	0,2608	± 0,3680
S2	0,3512	0,5639	± 0,6643
S3	0,5936	0,3647	± 0,6967
S4	0,3300	0,3033	± 0,4482
S5	0,3274	0,3962	± 0,5140
S6	0,3092	0,2608	± 0,4045
S7	0,2293	0,2168	± 0,3155
S8	0,3583	0,1304	± 0,3813
S9	0,4690	0,1140	± 0,4827

Pela Tab. 3.7 percebe-se uma incerteza máxima da medida de temperatura de $0,6967^\circ\text{C}$ para o sensor 3 e uma incerteza mínima de $0,3155^\circ\text{C}$ para o sensor 7. De qualquer forma, a incerteza da medida para qualquer sensor de temperatura é pequena, em vista dos erros experimentais possíveis de serem cometidos na instalação da sonda térmica, e da limitação do método quanto à medida do conjunto ar/sonda térmica/pavimentos. Mesmo assim, essa incerteza de medida é importante em qualquer avaliação ou comparação das medidas experimentais de temperaturas.

Realizadas as leituras dos dados experimentais através de fotos, estes dados são calibrados através das equações de calibração de cada sensor de temperatura (Tab. 3.5).

Com os dados corrigidos, nas Figs. 3.6 a 3.9 são mostrados os dados experimentais para os dois tipos de pavimentos.

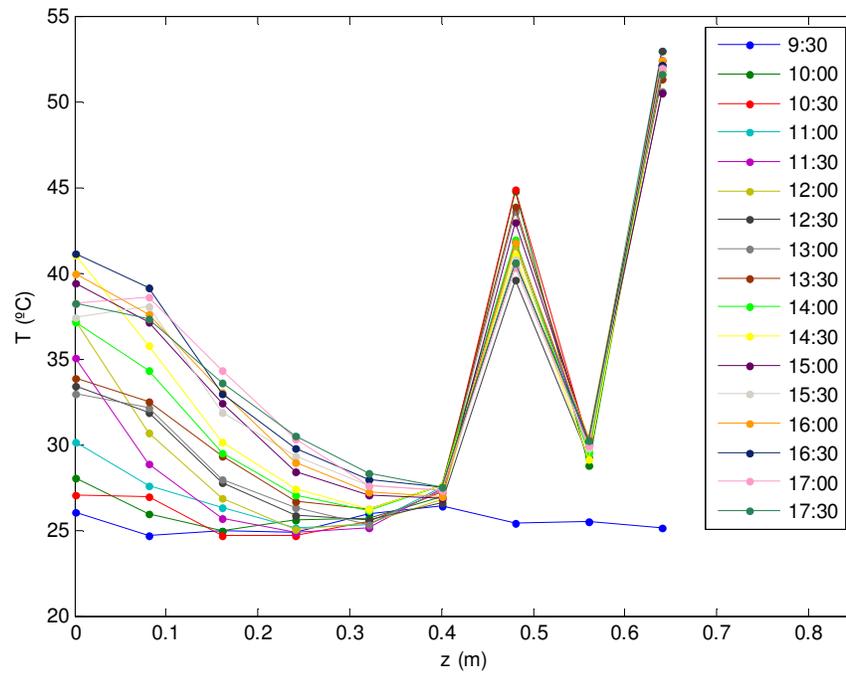


Figura 3.6 – Dados experimentais Pavimento Rígido ($T \times z$)

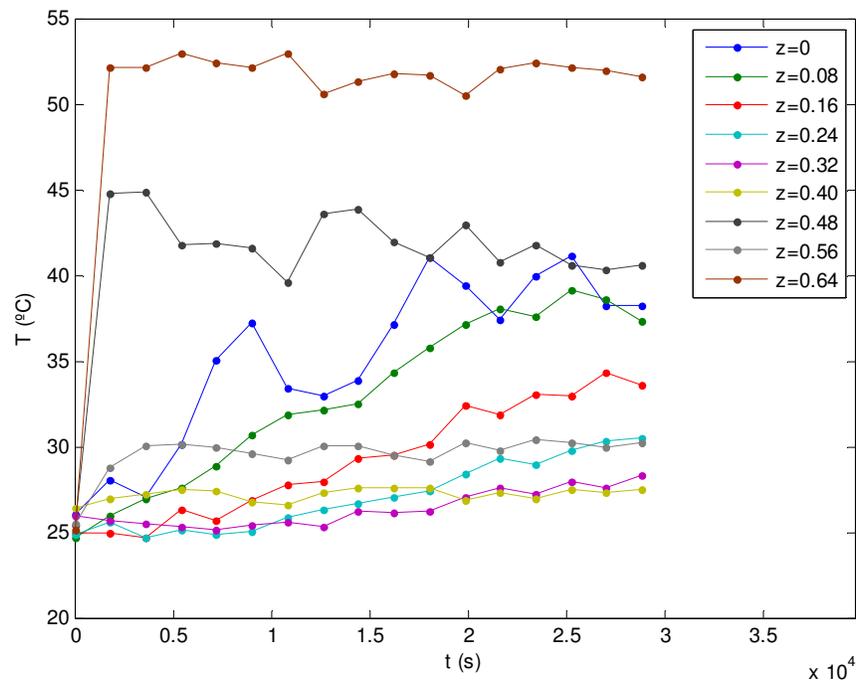


Figura 3.7 – Dados experimentais Pavimento Rígido ($T \times t$)

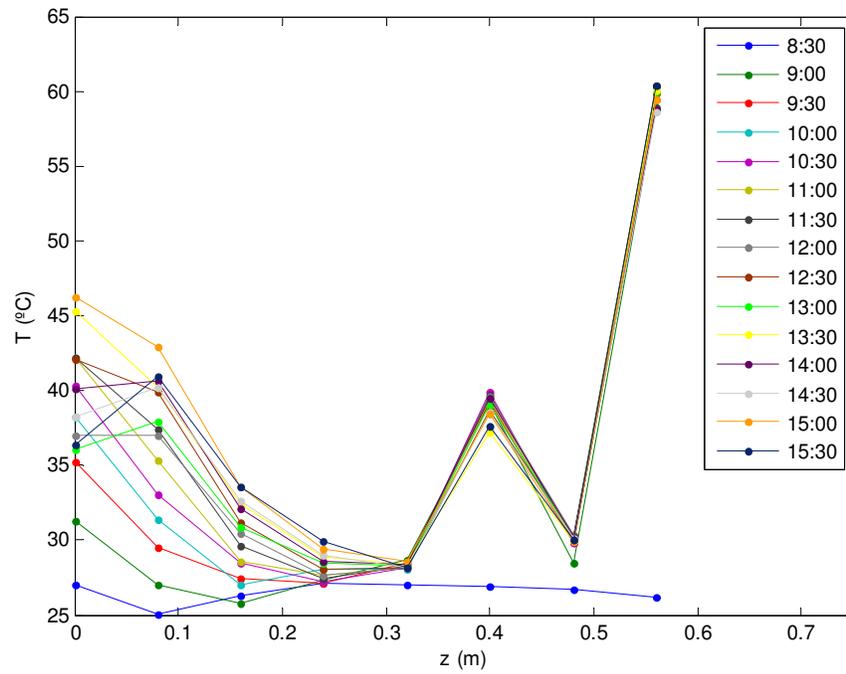


Figura 3.8 – Dados experimentais Pavimento Flexível ($T \times z$)

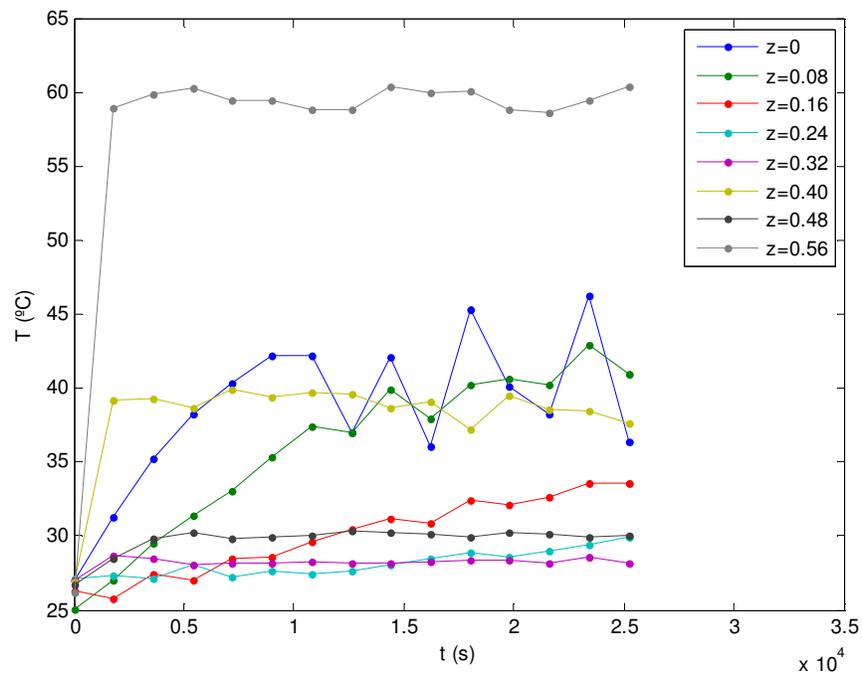


Figura 3.9 – Dados experimentais Pavimento Flexível ($T \times t$)

Obtidos os dados experimentais, faz-se necessária a generalização das condições de contorno para domínios contínuos, visando à utilização destes dados no Problema Direto, em coordenadas cilíndricas. Considerando a temperatura medida para a maior profundidade do pavimento rígido e do pavimento flexível, foi definida a condição de fronteira para a maior profundidade do PD ($1m$) pela Eq. 3.3.

$$T(r, H, t) = 25^{\circ}C \quad \text{onde } H = 1m \text{ é a profundidade máxima} \quad (3.3)$$

Para a condição inicial do pavimento rígido e do pavimento flexível foi realizada uma interpolação de Lagrange dos dados experimentais. A Figura 3.10 e a Fig. 3.11 mostram o gráfico dessas interpolações.

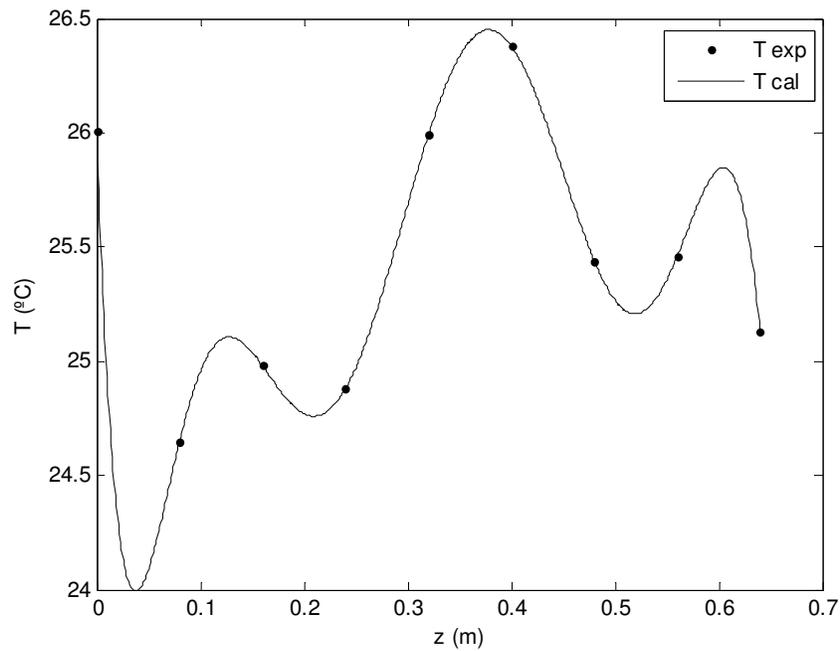


Figura 3.10 – Interpolação da Condição Inicial para o Pavimento Rígido

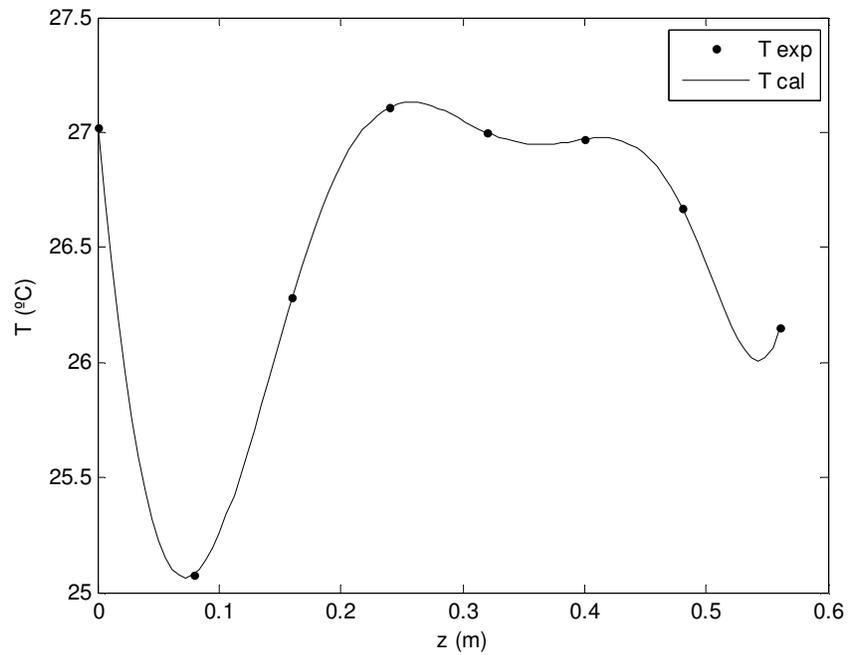


Figura 3.11 – Interpolação da Condição Inicial para o Pavimento Flexível

Levando em consideração a variação extrema da curva de temperatura da superfície dos pavimentos ao longo do tempo, que está relacionada com os diferentes fenômenos complexos do clima, foi ajustado um polinômio de grau 10 considerado como uma boa representação, em testes com diferentes graus de polinômio. O polinômio ajustado para o Pavimento Rígido tem um coeficiente de determinação $R^2=0,9879$ e é mostrado na Fig. 3.12, já o polinômio ajustado para o Pavimento Flexível tem um $R^2=0,8732$ e é mostrado na Fig. 3.13.

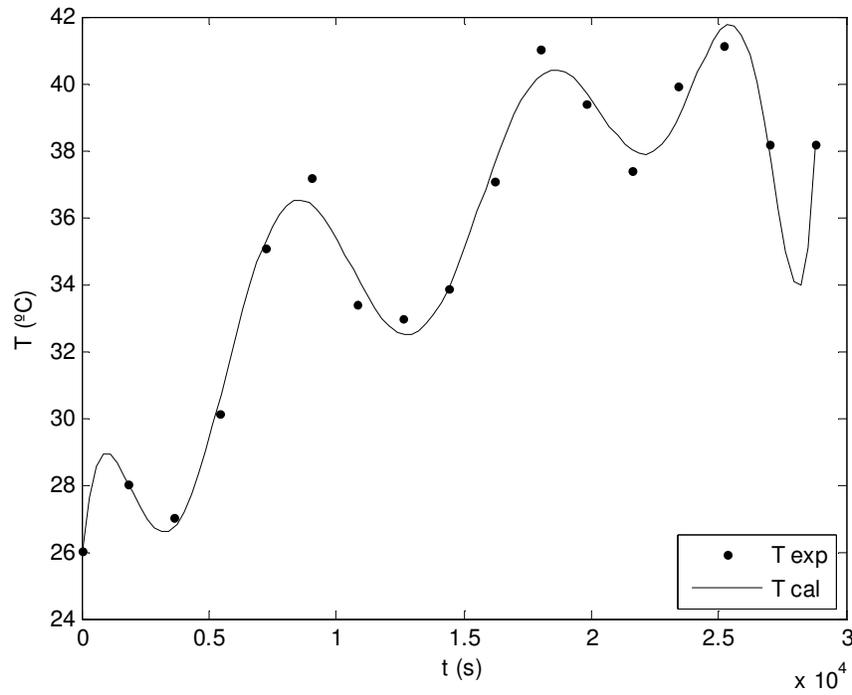


Figura 3.12 – Ajuste polinomial da Condição de Fronteira da superfície para o Pavimento Rígido

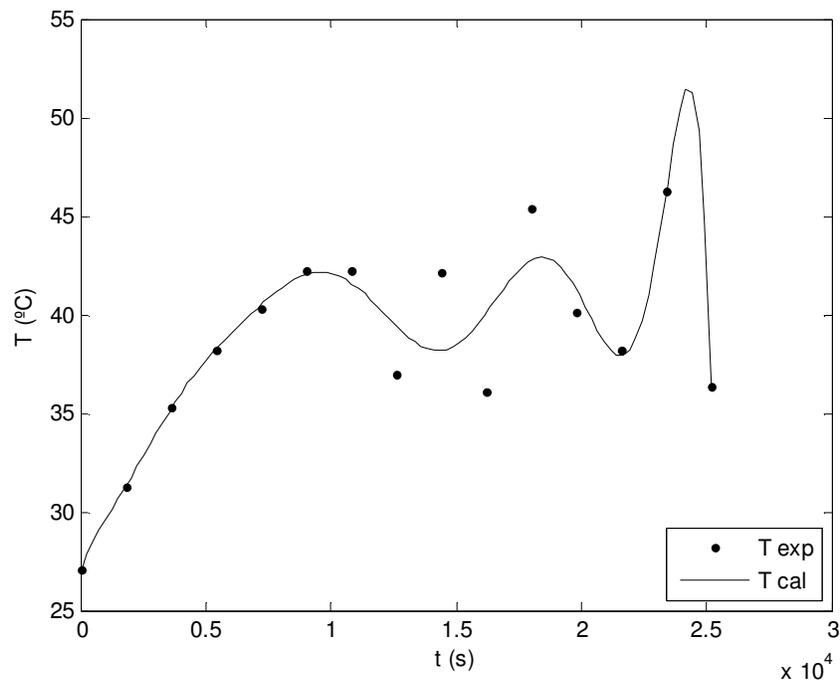


Figura 3.13 – Ajuste polinomial da Condição de Fronteira da superfície para o Pavimento Flexível

Para a condição de fronteira em $r=R=1m$ foi utilizada parte da distribuição de temperatura obtida experimentalmente em $r=0$. A diferença das distribuições de temperatura nestes raios, é que em $r=0$ há fontes de calor. Dessa forma, foram utilizadas as temperaturas até a profundidade $z=0,24m$, que aparentemente não há influência das fontes de calor, e foram ajustados os parâmetros da Eq. 3.4 para a distribuição de temperatura ao longo do tempo. Para as camadas mais profundas ($0,24m < z \leq 1m$) a temperatura foi considerada constante ($T=25^{\circ}C$), assim como em $z=H=1m$.

$$T(R, z, t) = A \cdot e^{B(t+C)^2} \cdot e^{Dz} + E \quad \text{onde } R=1m \text{ é o raio máximo} \quad (3.4)$$

onde A , B , C , D e E são coeficientes a serem ajustados.

O método de estimação de parâmetros utilizado foi o Método de Procura em Rede Modificado (descrito no Cap. 5). Resolvendo o Problema Inverso (ajuste de curvas) na busca dos melhores coeficientes do Problema Direto (Eq. 3.4), tem-se a Eq. 3.5 com um $R^2=0,8930$ e tempo de execução de aproximadamente 30s para o Pavimento Rígido, e a Eq. 3.6 com um $R^2=0,8199$ e tempo de execução de aproximadamente 15s para o Pavimento Flexível. Na Figura 3.14 e na Fig. 3.15 são mostradas a comparação entre as distribuições de temperatura experimental e calculada. Na Tabela 3.8 identifica-se a definição de alguns dados e exigências características da aplicação do método.

$$T(R, z, t) = 16,92 \cdot e^{-3,048 \cdot 10^{-9} (t-25400)^2} \cdot e^{-4,56z} + 24,4 \quad (3.5)$$

$$T(R, z, t) = 27,04 \cdot e^{-1,48 \cdot 10^{-9} (t-20240)^2} \cdot e^{-2,76z} + 16,08 \quad (3.6)$$

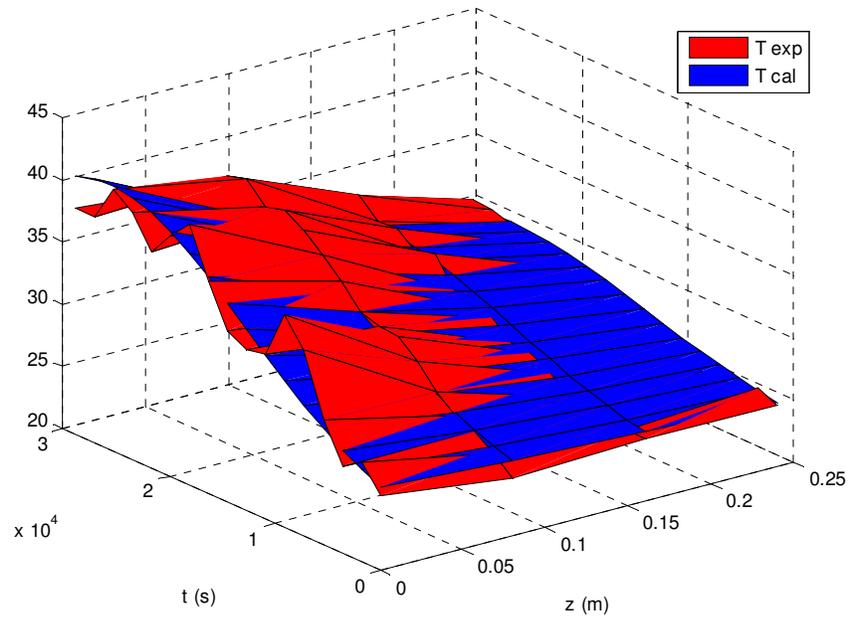


Figura 3.14 – Distribuição de temperatura experimental e calculada (ajustada) para a condição de contorno em $r=1m$ do Pavimento Rígido

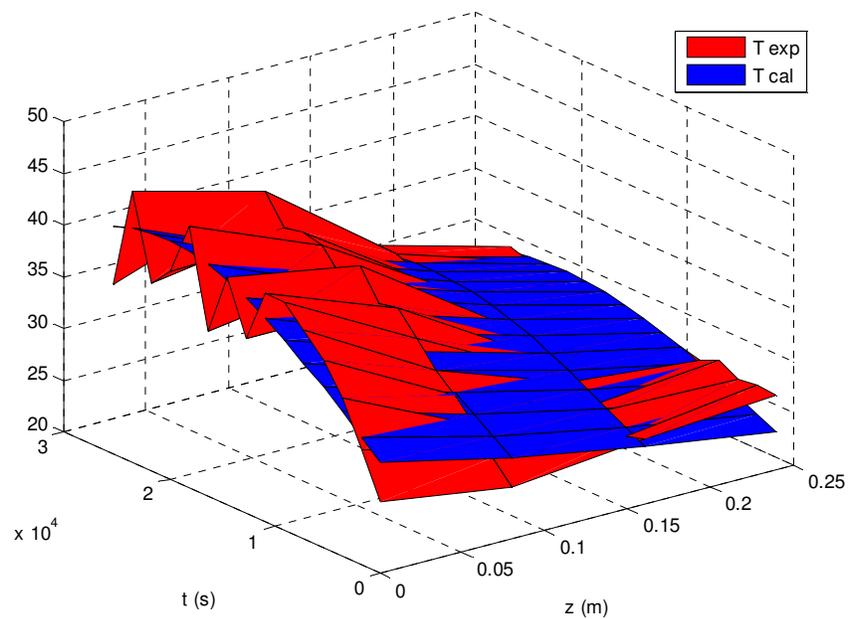


Figura 3.15 – Distribuição de temperatura experimental e calculada (ajustada) para a condição de contorno em $r=1m$ do Pavimento Flexível

Tabela 3.8 – Dados e exigências características utilizados no método Procura em Rede Modificado

<i>Pré-definidos</i>	<i>Valor</i>
Intervalo <i>A</i>	0 – 50
Intervalo <i>B</i>	$-9 \cdot 10^{-9}$ – $-1 \cdot 10^{-9}$
Intervalo <i>C</i>	-30000 – -10000
Intervalo <i>D</i>	-10 – 0
Intervalo <i>E</i>	10 – 30
<i>np</i>	5
<i>nr</i>	3
<i>nc</i>	11

Considerando a variação da temperatura na superfície altamente complexa devido à ação de todos os fenômenos climáticos envolvidos, e os erros inerentes no procedimento experimental da obtenção das temperaturas, o ajuste de curvas é bem representativo para a utilização como condição de fronteira para o Pavimento Rígido e para o Pavimento Flexível.

4. MODELOS MATEMÁTICOS DA TRANSFERÊNCIA DO CALOR

Foram propostos dois modelos matemáticos de transferência do calor, um modelo unidimensional considerando apenas fluxo vertical de calor, e outro bidimensional em coordenadas cilíndricas, com fontes de calor na sonda térmica, e consequentes fluxos verticais e radiais.

4.1 MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL

Considerando o fluxo de calor vertical, na direção z , sem fluxos nas outras direções, tem-se um problema unidimensional de transferência de calor nos pavimentos.

O modelo matemático que descreve o problema de transferência de calor em pavimentos foi obtido da equação diferencial de condução do calor (ÖZISIK, 1993). Para o caso unidimensional, esta equação é dada pela Eq. 4.1 e representa o Problema Direto. É considerando contato térmico perfeito nas interfaces das camadas.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \text{ em } 0 < z < H, t > 0 \text{ para as camadas } i = 1, 2 \text{ e } 3 \quad (4.1)$$

As condições de fronteira e a condição inicial são dadas pelas Eqs. 4.2 a 4.4.

$$T(0,t) = T_s(t) \quad \text{para } t > 0 \quad (4.2)$$

$$T(H,t) = T_H \quad \text{para } t > 0 \quad (4.3)$$

$$T(z,0) = T_0(z) \quad \text{onde } 0 < z < H \quad (4.4)$$

onde T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$),

z é a profundidade (m),

t é o tempo (s),

α_i é a difusividade térmica da camada i (m^2/s),

T_0 é a condição inicial ($^{\circ}C$),

T_S é a temperatura na superfície ($^{\circ}C$),

T_H é a temperatura na profundidade máxima do pavimento ($^{\circ}C$),

H é a profundidade máxima do pavimento (m).

As condições de contorno do problema proposto são de primeira espécie e variam em função do tempo, da profundidade ou são constantes. T_S é uma função do tempo e foi obtida experimentalmente. T_H é constante porque a temperatura na maior profundidade é constante em relação ao tempo, pois não possui influência das variações térmicas da superfície e camadas superficiais. T_0 varia com a profundidade, mas foi considerada constante no Problema Direto, por não existirem dados experimentais suficientes. As difusividades térmicas são diferentes para cada camada.

Sabendo não haver interferência externa (natural do ambiente) nas camadas mais profundas do pavimento, se faz necessária a introdução de calor artificial (fontes de calor) dentre estas camadas. No entanto, esta estratégia para haver transferência de calor nas camadas mais profundas, traz uma nova perspectiva do problema com uma nova interpretação. Sendo assim, o calor gerado por fontes transfere-se em todas as direções, e a transferência do calor não fica mais restrita à direção vertical. Com essa complexificação no problema, o calor pode ser descrito através de duas dimensões em coordenadas cilíndricas, sendo as variáveis espaciais, o raio e a altura (o problema é simétrico em relação à variável angular, e por isso essa é desprezada).

4.2 MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL

Para o caso bidimensional, a equação diferencial de condução do calor com fontes de calor (ÖZISIK, 1993) é dada pela Eq. 4.5, em coordenadas cilíndricas, e representa o Problema Direto. É considerando contato térmico perfeito nas interfaces das camadas.

$$\frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{k_i} \cdot g \quad (4.5)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$T(r, 0, t) = T_S(t) \quad \text{onde } 0 < t < t_f \quad (4.6)$$

$$T(r, H, t) = T_H \quad \text{onde } 0 < t < t_f \quad (4.7)$$

$$T(R, z, t) = T_R(z, t) \quad \text{onde } 0 < t < t_f \text{ e } 0 < z < H \quad (4.8)$$

$$T(r, z, 0) = T_0(r, z) \quad \text{onde } 0 < r < R \text{ e } 0 < z < H \quad (4.9)$$

onde r é o raio (m),

g é a fonte de calor (W/m^3),

k_i é a condutividade térmica na fonte de calor da camada i ($W/m^\circ C$),

R é o raio máximo do pavimento (m).

As condições de contorno do problema proposto são de primeira espécie e variam em função do tempo, da profundidade, do raio ou são constantes. T_S é uma função do tempo e foi obtida experimentalmente. T_H é constante porque a temperatura

na maior profundidade é constante em relação ao tempo, pois não possui influência das variações térmicas da superfície e camadas superficiais, nem das fontes de calor. T_R varia com o tempo e a profundidade, sendo parte obtida experimentalmente e ajustada por uma equação. T_0 varia com a profundidade e com o raio, mas foi considerada constante em relação ao raio, por admitir o pavimento um meio homogêneo, e foi obtida experimentalmente para $r=0$. As difusividades térmicas são diferentes para cada camada.

5. SOLUÇÃO NUMÉRICA

Os métodos numéricos utilizados nesse trabalho compreendem a discretização dos modelos unidimensional e bidimensional de transferência do calor nos pavimentos (Problema Direto), a análise de malha, quanto à estabilidade e convergência das soluções obtidas pelo Método de Diferenças Finitas e os métodos de estimação das espessuras, difusividade e condutividade térmica (Problema Inverso).

5.1 COMPUTADOR E SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO

Foram desenvolvidos programas próprios na linguagem Matlab. Sendo assim, o software utilizado para a programação e solução do Problema Direto (Transferência de Calor) e do Problema Inverso (Métodos de Estimação de Parâmetros) foi o software MATLAB 7.4.0.287.

O computador utilizado para as simulações foi um computador com processador AMD Turion 64, 2.0 GHz com 512 MB de RAM, utilizando o sistema operacional Windows XP Professional.

5.2 MODELO UNIDIMENSIONAL

As difusividades térmicas são diferentes para cada camada do pavimento. Por este motivo, o Problema Direto, dado pelas Eqs. 4.1 a 4.4, foi resolvido numericamente pelo Método de Diferenças Finitas Centrais, usando o esquema explícito de avanços temporais. Este método foi escolhido por possuir um pequeno custo computacional, já que o PD precisa ser resolvido diversas vezes durante a resolução do PI. A Equação 5.1 mostra a discretização da Eq. 4.1 para o esquema utilizado. Uma malha de 380 pontos foi usada devido à necessidade de alta precisão na determinação das espessuras e camadas.

$$T_j^{n+1} = \left(\frac{\alpha_i \Delta t}{\Delta z^2} \right) (T_{j-1}^n + T_{j+1}^n) + \left(1 - \frac{2\alpha_i \Delta t}{\Delta z^2} \right) T_j^n \quad (5.1)$$

Onde Δz é o intervalo espacial (m),

Δt é o intervalo temporal (s),

j indica a posição na malha espacial,

n indica a iteração temporal.

5.3 MODELO BIDIMENSIONAL

Como as difusividades térmicas são diferentes para cada camada do pavimento, o Problema Direto, dado pelas Eqs. 4.5 a 4.9, foi resolvido numericamente pelo Método de Diferenças Finitas Centrais, usando o esquema explícito de avanços temporais, dado pela Eq. 5.2. Novamente, este método foi escolhido por possuir um pequeno custo computacional, já que o PD precisa ser resolvido diversas vezes durante a resolução do PI. Considerando um modelo com fontes de calor, há um novo parâmetro na Eq. 4.5 que é a condutividade térmica (k_i) o qual também tem referência com o tipo de material, importante na investigação das camadas dos pavimentos.

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{(n+1)} = & \frac{\alpha_i \Delta t}{\Delta r} \cdot \left(\frac{1}{\Delta r} - \frac{1}{2r} \right) T_{i-1,j}^{(n)} + \frac{\alpha_i \Delta t}{\Delta r} \cdot \left(\frac{1}{2r} + \frac{1}{\Delta r} \right) T_{i+1,j}^{(n)} + \frac{\alpha_i \Delta t}{\Delta z^2} \cdot (T_{i,j-1}^{(n)} + T_{i,j+1}^{(n)}) + \dots \\ & \dots + \left[1 - 2\alpha_i \Delta t \cdot \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right] T_{i,j}^{(n)} + \frac{\alpha_i \Delta t g}{k_i} \end{aligned} \quad (5.2)$$

onde $T_{i,j}$ é a temperatura no ponto central,

$T_{i-1,j}$ é a temperatura no ponto à esquerda de $T_{i,j}$,

$T_{i+1,j}$ é a temperatura no ponto à direita de $T_{i,j}$,

$T_{i,j+1}$ é a temperatura no ponto acima de $T_{i,j}$,

$T_{i,j-1}$ é a temperatura no ponto abaixo de $T_{i,j}$,

Δz e Δr são os intervalos espaciais (m),

Δt é o intervalo temporal (s),

i e j indicam a posição na malha espacial,

n é a iteração temporal.

A Figura 5.1 representa a malha espacial do problema com as temperaturas em Diferenças Finitas.

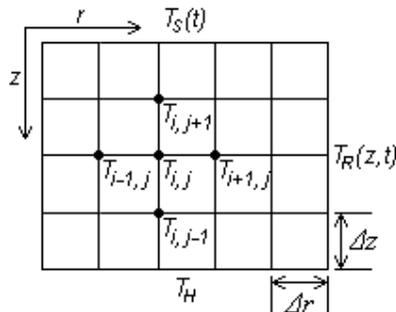


Figura 5.1 - Representação da malha espacial em Diferenças Finitas

Na Fig. 5.2 tem-se que $T_{-Δr,j}$ é ponto simétrico à $T_{+Δr,j}$ para $r=0$. Dessa forma, assume-se que $T_{-Δr,j} = T_{+Δr,j} = T_{Δr,j}$ e substituindo estas identidades para $i=0$ na Eq. 5.2, obtém-se a Eq. 5.3.

$$\begin{aligned}
 T_{0,j}^{(n+1)} &= \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r} \cdot \left(\frac{1}{\Delta r} \right) T_{\Delta r,j}^{(n)} + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta z^2} \cdot (T_{0,j-1}^{(n)} + T_{0,j+1}^{(n)}) + \dots \\
 &\dots + \left[1 - 2\alpha \Delta t \cdot \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right] T_{0,j}^{(n)} + \frac{\alpha \Delta t g}{k}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

onde $T_{0,j}$ é a temperatura no ponto central ($r=0$),

$T_{-\Delta r,j}$ é a temperatura no ponto à esquerda de $T_{0,j}$ ($r=-\Delta r$),

$T_{+\Delta r,j}$ é a temperatura no ponto à direita de $T_{0,j}$ ($r=+\Delta r$),

$T_{0,j+1}$ é a temperatura no ponto acima de $T_{0,j}$ ($r=0$),

$T_{0,j-1}$ é a temperatura no ponto abaixo de $T_{0,j}$ ($r=0$).

A Figura 5.2 representa a malha espacial com os pontos em $r=0$ calculados em Diferenças Finitas.

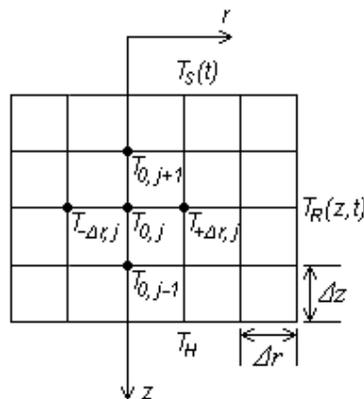


Figura 5.2 - Malha espacial em $r=0$ em Diferenças Finitas

É necessária uma análise da malha do problema, já que o Método de Diferenças Finitas em um esquema explícito tem limitações quanto à estabilidade e precisão. Além de encontrar uma malha com solução estável, um dos objetivos desta análise é encontrar uma malha que produza resultados precisos e que o tempo de execução seja mínimo, aspecto este importante para a solução do Problema Inverso. Para a análise de malha do problema, foi admitido inicialmente como parâmetro o coeficiente Delta Fourier (DF) (Eq. 5.4) da Eq. 5.2 que contém as variáveis da malha.

$$DF = \alpha \Delta t \cdot \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \quad (5.4)$$

Segundo SMITH (1978) tem-se $0 < DF \leq 0,5$ para a estabilidade durante o processo de solução do Método de Diferenças Finitas em um esquema explícito.

Na busca de uma malha viável em termos de precisão e tempo de execução computacional, foi variada a malha satisfazendo o critério de estabilidade com DF , e analisada a distribuição de temperatura para tempos e pontos específicos. Para tanto, foi simulado um caso simplificado do problema proposto, considerando apenas uma camada homogênea ($\alpha=10^{-6}$), com condições de contorno de primeira espécie (constantes) e sem fontes de calor. A Equação 5.5, juntamente com as condições de contorno dadas pelas Eqs. 5.6 a 5.9, representam esse caso simplificado.

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.5)$$

$$T(r,0,t) = 0 \quad \text{onde } 0 < t < t_f \quad (5.6)$$

$$T(r,H,t) = 0 \quad \text{onde } 0 < t < t_f \quad (5.7)$$

$$T(R,z,t) = 0 \quad \text{onde } 0 < t < t_f \text{ e } 0 < z < H \quad (5.8)$$

$$T(r,z,0) = 100 \quad \text{onde } 0 < r < R \text{ e } 0 < z < H \quad (5.9)$$

Em testes preliminares, observou-se pouca influência da variável temporal da malha para a análise de precisão. Sendo assim, manteve-se constante a variável temporal, e foram variadas as espaciais. Como existe um limite da variação de uma variável da malha, por causa da estabilidade, para a malha mais refinada foi variada também a variável temporal. A Figura 5.3 mostra a distribuição de temperaturas para diferentes malhas. A Tabela 5.1 identifica as componentes das malhas e o tempo computacional de cada simulação.

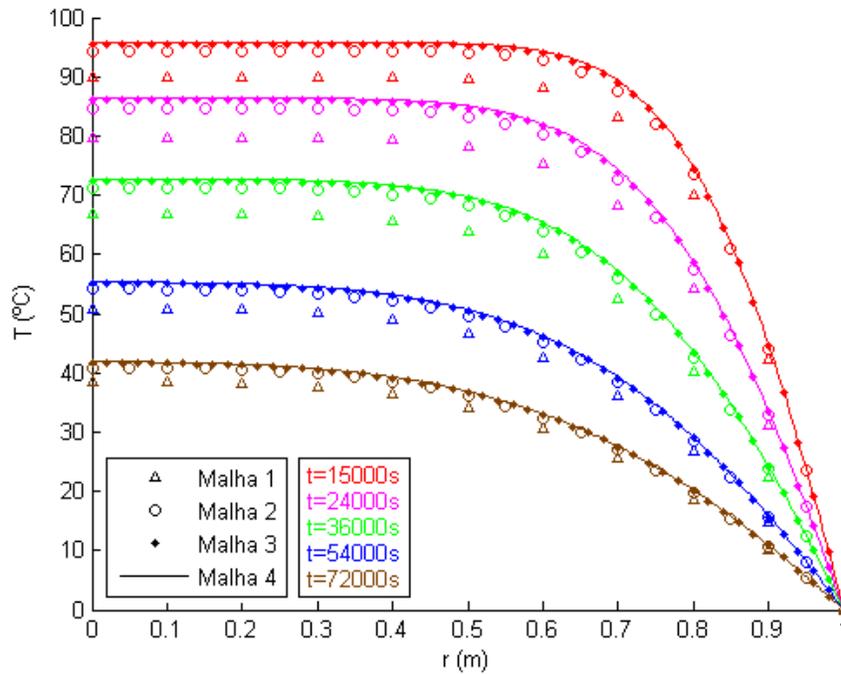


Figura 5.3 - Distribuição de temperatura com diferentes malhas para $z=0,4m$ em diferentes instantes de tempo

Tabela 5.1 – Componentes das malhas na análise de convergência

Nº Malha	Δr (m)	Δz (m)	Δt (s)	DF	Tempo Execução (s)
1	0,1	0,1	60	0,012	0,015
2	0,05	0,05	60	0,048	0,085
3	0,02	0,02	60	0,3	0,5
4	0,004	0,004	3	0,375	497

Na Figura 5.3 percebe-se a convergência das curvas de distribuição de temperatura com a variação da malha espacial. A malha escolhida para a resolução do Problema Direto foi a Malha 3 (destacada na Tab. 5.2), por ser próxima à Malha 4 (malha com menor refinamento) e possuir um pequeno tempo computacional de execução, já que o PD é resolvido diversas vezes na estimação de parâmetros com o Problema Inverso.

5.4 PROBLEMA INVERSO

Para a solução do Problema Inverso foram utilizados três métodos de estimação de parâmetros, com o propósito de identificar as espessuras e os materiais de pavimentos já construídos: Procura em Rede Modificado, Algoritmo Genético e Algoritmo Memético.

5.4.1 MÉTODO PROCURA EM REDE MODIFICADO

O Método Procura em Rede Modificado é descrito por SILVA NETO e MOURA NETO (2005), BORGES et al. (2008) e PAROLIN e BORGES (2008) e foi adaptado para o problema proposto, na forma dos seguintes passos:

1º. Passo: Estima-se intervalos $I_p = [\beta_{p\min}, \beta_{p\max}]$ de valores de cada parâmetro β_p onde $p=1,2,3,\dots,np$ (número de parâmetros) que contêm o valor ótimo de β_p (β_{ot}).

2º. Passo: Constrói-se uma partição de nc dados $\beta_{pf} = \beta_{p\min} + (f-1)\Delta\beta_p$ com $f=1,2,3,\dots,nc$ e $\Delta\beta_p = (\beta_{p\max} - \beta_{p\min})/(nc-1)$.

3º. Passo: Para cada sequência de valores $(\beta_{1f}, \beta_{2f}, \dots, \beta_{npf})$ para $f=1,2,3,\dots,nc$ resolve-se o Problema Direto usando a solução numérica.

4º. Passo: Calcula-se as diferenças d_i entre as soluções estimadas e os dados experimentais usando a Eq. 5.10.

$$d_i = \sum_{j=1}^{zf} \sum_{t=0}^{tf} (T_{est}(j,t) - T_{exp}(j,t))^2 \quad (5.10)$$

onde $i=1,2,3,\dots,nc^{np}$, $T_{\text{exp}}(j,t)$ são os dados experimentais para cada profundidade j e tempo t .

5°. Passo: Identifica-se o menor valor de $d_i(d_{\min})$. Esta diferença corresponde ao conjunto de parâmetros β_{ot} para o intervalo I_p .

6°. Passo: Refinamento da solução. Define-se novo intervalo $I_p = [\beta_{p\min}, \beta_{p\max}]$, tal que

$$\beta_{p\min} = \beta_{pot} - \Delta\beta_p \text{ e } \beta_{p\max} = \beta_{pot} + \Delta\beta_p.$$

7°. Passo: Repete-se os passos 2 a 6, estimando tantos intervalos I_{pm} , $m=1,2,\dots,nr$ (número de refinamentos) até que

$$|d_{\min}^{i+1} - d_{\min}^i| < \varepsilon \text{ ou } nr = nr_{ot}$$

onde ε e nr_{ot} são critérios de parada.

Este método tem por hipótese que a solução está nos intervalos de parâmetros escolhidos inicialmente $I_p = [\beta_{p\min}, \beta_{p\max}]$. Como não existe um procedimento criterioso na escolha dos intervalos, bem como na partição de cada intervalo, este é considerado um método de soluções subótimas, já que não é garantido encontrar a solução ótima neste processo. No entanto, pode ser usado para localizar estimativas iniciais de soluções para a utilização em outros métodos. Mesmo com essa limitação, o PRM é eficiente e prático para muitos casos (principalmente quando o número de parâmetros a determinar é menor do que 5), porque não apresenta problemas de singularidades e derivadas nulas como apresentam diversos métodos.

O método PRM necessita a existência de solução do PD nos intervalos pré-definidos dos coeficientes ou parâmetros a serem estimados. No presente trabalho, tais intervalos são bem definidos, já que as possibilidades das espessuras e das difusividades térmicas são restritas e conhecidas. Necessita-se apenas combinar os valores dos

parâmetros com a existência de convergência do método explícito em diferenças finitas, usado na resolução numérica do problema de transferência de calor.

Como o método PRM é um método exaustivo na combinação de todas suas possibilidades de solução, é um método oneroso, com um grande tempo computacional. Esse tempo é proporcional ao número de execuções do PD, que depende diretamente do número de parâmetros a serem estimados, da partição de dados dos intervalos e do número de refinamentos. Como o cálculo do PD acontece com cada combinação dos parâmetros, generaliza-se o número de execuções do PD com relação às variáveis envolvidas, baseado em CERVI (2009), através da Eq. 5.11.

$$N_{PD} = nr \cdot nc^{np} \quad (5.11)$$

onde N_{PD} é o número de execuções do PD;

nr é o número de refinamentos;

nc é o número de dados calculados de cada parâmetro;

np é o número de parâmetros a serem estimados.

5.4.2 ALGORITMO GENÉTICO E ALGORITMO MEMÉTICO

O Algoritmo Genético foi descrito por HOLLAND (1975), GOLDBERG (1989) e LEANDRO et al. (2008), e o Algoritmo Memético por MOSCATO (1989), BRITTO (2007) e LEANDRO et al. (2008) e foram adaptados para o problema proposto, na forma dos seguintes passos:

1º. Passo: Considerando cada cromossomo $Cro_i = [Gene1_i \ Gene2_i \ \dots \ Gene(np)_i]$ de np parâmetros, gera-se a população inicial sendo cada gene

$Gene(p)_i = LI_i + r_i(LS_i - LI_i)$ onde LI_i e LS_i são os limites inferior e superior respectivamente do parâmetro p , e r_i um coeficiente randômico.

2º. Passo: Faz-se uma avaliação de cada cromossomo através do coeficiente de determinação $R_i^2 \geq R_{ot}$ onde R_{ot} é o critério de parada.

3º. Passo: Ordena-se a população pela aptidão de acordo com o coeficiente de determinação de cada cromossomo. Seleciona-se os melhores cromossomos para iniciar o processo evolutivo.

4º. Passo: Selecionam-se cromossomos para os cruzamentos através de um ranking geométrico normalizado, de acordo com a aptidão de cada cromossomo, dado pela Eq. 5.12:

$$ps(i) = \frac{q(1-q)^{rank(i)-1}}{1-(1-q)^P} \quad (5.12)$$

onde q representa a taxa unitária do cromossomo com maior aptidão, P o tamanho da população, $rank(i)$ a posição do cromossomo ao ser classificado em ordem decrescente por aptidão e $ps(i)$ é a probabilidade de seleção do cromossomo i .

5º. Passo: Novos cromossomos (filhos) por cruzamento aritmético:

$$Filho1 = r_j \cdot Cro1_i + (1-r_j)Cro2_i \quad (5.13)$$

$$Filho2 = r_k \cdot Cro2_i + (1-r_k)Cro1_i \quad (5.14)$$

onde $Cro1$ e $Cro2$ são os cromossomos selecionados para o cruzamento, r_j e r_k são coeficientes randômicos.

6º. Passo: Novos cromossomos (filhos) por cruzamento aritmético com os extremos:

$$Filho3 = \begin{cases} r_j \cdot Cro3_i + (1-r_j)LI_i & \text{se } r_k \leq 0,5 \\ r_j \cdot Cro3_i + (1-r_j)LS_i & \text{se } r_k > 0,5 \end{cases} \quad (5.15)$$

Onde $Cro3$ é o cromossomo selecionado para o cruzamento, r_j e r_k são coeficientes randômicos, LI_i e LS_i são os limites inferior e superior respectivamente dos parâmetros.

7º. Passo: Novos cromossomos (filhos) por mutação uniforme. Os genes selecionados aleatoriamente através de uma probabilidade de mutação PM (%) da população são substituídos por outro valor qualquer dentro do espaço de busca do problema, assim como foi gerado cada gene da população inicial.

8º. Passo: Faz-se uma avaliação de cada novo cromossomo através do coeficiente de determinação $R_i^2 \geq R_{ot}$ onde R_{ot} é o critério de parada.

9º. Passo: Ordena-se a população pela aptidão de acordo com o coeficiente de determinação de cada cromossomo. Seleciona-se os melhores cromossomos.

10º. Passo: Faz-se uma Busca Local (esse passo existe somente para o Algoritmo Memético) a cada número de gerações pré-definidas. Essa busca local pode ser um método de estimação de parâmetros como o Método de Newton, o Método Quase-Newton, o Método de Levenberg-Marquardt ou outro. Para a resolução do problema proposto foi utilizado o Método Levenberg-Marquardt (ÖZISIK e ORLANDE, 2000).

11º. Passo: Caso realizada a busca local, faz-se novamente uma avaliação de cada cromossomo, a ordenação por aptidão e a seleção dos melhores.

12º. Passo: Repete-se o processo evolutivo do 4º. ao 11º. passo até satisfazer o critério de parada $R_i^2 \geq R_{ot}$ em alguma das avaliações ou um número máximo de gerações pré-definidas.

De acordo com os passos no processo de evolução do Algoritmo Genético e Memético, seguem alguns aspectos mais detalhados:

População Inicial: A população inicial é composta por indivíduos ou cromossomos. Cada cromossomo é um conjunto de parâmetros, onde cada parâmetro é chamado de gene. Os cromossomos da população inicial são gerados aleatoriamente dentro dos intervalos pré-definidos de cada parâmetro. O número de indivíduos da população inicial ou da população em evolução é importante para a busca da solução, pois quanto maior a população, mais rápida e provável se torna a estimação dos parâmetros (ABBAS e BAYOUMI, 2006). No entanto, quanto maior é a população, maior é o custo computacional. Neste trabalho, não foi otimizado um número ideal de indivíduos para a população. Este número foi escolhido sem critérios específicos de convergência.

Avaliação: Este processo se encontra em diferentes momentos dos algoritmos. Faz-se uma avaliação de cada cromossomo da população através de algum critério. Neste trabalho, a avaliação é feita resolvendo o PD com cada cromossomo e calculando seu respectivo coeficiente de determinação. Este coeficiente ou algum critério que possa ser utilizado define a aptidão de cada cromossomo. Esta aptidão é o critério de parada do método (além de um número máximo de gerações), através de um valor pré-definido considerado ótimo, o qual identifica o cromossomo ótimo como solução.

Seleção: Ordenam-se os cromossomos pela aptidão (coeficiente de determinação) em ordem decrescente. Seleciona-se um número pré-determinado dos melhores cromossomos no topo desta ordenação. Seleção é um procedimento para garantir que cromossomos com maior aptidão tenham maior probabilidade de contribuir para a nova descendência da próxima geração.

Cruzamento: Os cromossomos para o cruzamento são escolhidos através de um *rank* de aptidão, para que aqueles que possuem melhor aptidão tenham maior probabilidade de seleção. O cruzamento aritmético troca informações entre dois cromossomos, em que

cada gene é gerado no intervalo entre os genes dos dois cromossomos. Quanto maior o número de gerações, maior é a tendência desse cruzamento a pontos isolados, devido a esses intervalos se tornarem cada vez menores. Para discernir essa tendência, é realizado um cruzamento aritmético com os extremos. Esse é um cruzamento assexuado, pois apenas um cromossomo gera outro, estendendo suas informações para um de seus extremos, se desfazendo de qualquer tendência.

Mutação: Com o intuito de diversificar a população, alguns genes são selecionados aleatoriamente através de uma probabilidade de mutação (fixa ou variável de acordo com as gerações) e substituídos por novos, gerados dentro do seu intervalo de busca. A probabilidade de mutação variável é uma probabilidade que aumenta de acordo com o número de gerações, visando à necessidade de diversificação, tornando-se importante por prováveis tendências com o passar das gerações.

Busca Local: Este processo é que diferencia o Algoritmo Memético do Genético, já que faz parte do primeiro. Tem por objetivo incorporar algum outro algoritmo de busca local, agilizando a procura e valorizando informações próximas. Este processo acontece a cada intervalo pré-definido de gerações, não havendo um critério específico de escolha deste intervalo.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados compreende os resultados obtidos com a resolução do problema unidimensional e do problema bidimensional, para o pavimento rígido e para o flexível.

6.1 ANÁLISE DO PROBLEMA UNIDIMENSIONAL

Para testar os métodos de Problema Inverso, foram simulados dados utilizando valores fictícios sobre a difusividade térmica e as espessuras das três camadas, obtendo-se uma distribuição de temperatura com a execução do PD, sem ruído. Tais dados passarão a serem chamados neste item, apenas de dados experimentais.

Na Figura 6.1 são apresentadas as distribuições de temperatura obtidas com os resultados (difusividades térmicas e espessuras) da resolução do PI e os dados experimentais. Nesta figura não é possível ver todas as curvas, já que as soluções se sobrepõem, sendo mais visível às curvas verdes que representam os resultados do AM. Observa-se que os resultados são muito semelhantes aos dados experimentais, o que pode ser confirmado pela Tab. 6.1, indicando a eficiência dos métodos utilizados.

Em problemas reais, os dados experimentais de difusividade e profundidades não são disponíveis, pois são justamente as incógnitas do problema. Por esse motivo é necessário criar um critério para analisar a precisão dos resultados obtidos pelo Problema Inverso. Como se pode calcular as incógnitas por vários métodos (neste trabalho foram usados três métodos), um critério possível é usar a média dos valores obtidos pelos métodos, como resultado final e avaliá-lo com o desvio padrão, utilizando a Eq. 6.1, e com o erro percentual em torno da média, utilizando a Eq. 6.2. Vale salientar, que os resultados do PI diferem de um método para outro e que, no caso do AG e do AM, diferem a cada execução.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (6.1)$$

onde x_i é o parâmetro dos diferentes métodos,

\bar{x} é a média aritmética do parâmetro,

N é o número de métodos.

$$Erro = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (6.2)$$

Na Tabela 6.1 é mostrado que o maior desvio padrão na variável espessura, foi em torno de $0,03m$, para a camada 3. Pela definição de desvio padrão, significa que o erro máximo cometido em, aproximadamente, 64% das aplicações dos métodos, é da ordem de $10,59\%$. Para a variável difusividade térmica este erro é da ordem de $3,12\%$ para a camada 2. Porém, a estimação da difusividade térmica da camada 3 tem grande variação (com um erro de $42,23\%$), pois não possui gradientes térmicos, tornando incoerente a estimação de um valor específico. Observa-se que os outros erros obtidos são menores.

Considerando o intervalo de um desvio padrão entre a média de cada espessura e difusividade térmica da camada 1 e da camada 2 percebe-se que as espessuras e as difusividades térmicas experimentais encontram-se neste intervalo, evidenciando a qualidade de estimação.

Os três métodos apresentam coeficiente de determinação bem próximos de 1, reafirmando a eficiência de precisão dos métodos. É possível que essa precisão seja devido ao uso de um critério de parada bem exigente nas simulações.

O método PRM tem maior custo computacional comparado aos outros métodos, dependendo basicamente da partição de valores das incógnitas. O AG e o AM dependem da população inicial gerada, para a evolução da população, e em satisfazer o critério de parada, sendo assim, o tempo de execução é variável a cada simulação, mas incomparavelmente menor do que o método PRM, como mostra a última linha da Tab. 6.1.

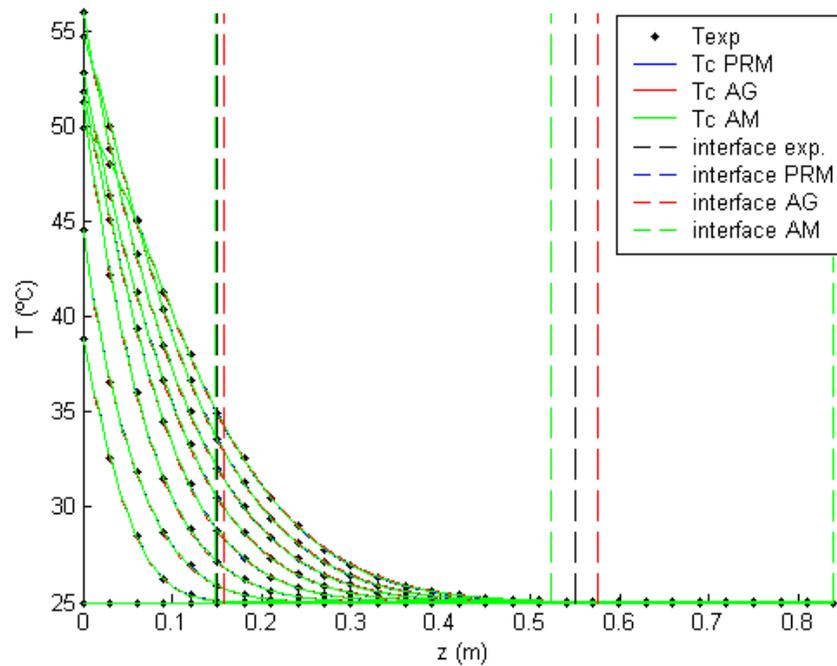


Figura 6.1 - Resultados obtidos com os diferentes métodos

Para comparação dos métodos de PI apresenta-se a Tab. 6.1 com os dados estimados pelos métodos utilizados e os dados experimentais:

Tabela 6.1 - Difusividades térmicas e espessuras: experimentais e estimadas por diferentes métodos

Parâmetros	Exp.	PRM	AG	AM	\bar{x}	σ	Erro (%)
α_1 (m^2/s)	$5 \cdot 10^{-7}$	$5,008 \cdot 10^{-7}$	$4,9374 \cdot 10^{-7}$	$4,9758 \cdot 10^{-7}$	$4,9737 \cdot 10^{-7}$	$3,5345 \cdot 10^{-9}$	0,71
α_2 (m^2/s)	$6 \cdot 10^{-7}$	$5,976 \cdot 10^{-7}$	$6,3286 \cdot 10^{-7}$	$6,0253 \cdot 10^{-7}$	$6,1100 \cdot 10^{-7}$	$1,9094 \cdot 10^{-8}$	3,12
α_3 (m^2/s)	$7 \cdot 10^{-7}$	$3,727 \cdot 10^{-7}$	$8,9568 \cdot 10^{-7}$	$5,9574 \cdot 10^{-7}$	$6,2137 \cdot 10^{-7}$	$2,6243 \cdot 10^{-7}$	42,23
z_1 (m)	0,15	0,148	0,1581	0,1481	0,1514	0,0058	3,83
z_2 (m)	0,40	0,428	0,4173	0,3760	0,4071	0,0275	6,75
z_3 (m)	0,29	0,264	0,2645	0,3158	0,2815	0,0298	10,59
R^2	-	0,9999997439	0,9999894990	0,9999987274	-	-	-
Tempo	-	1h 51min 10s	15min 46s	5min 34s	-	-	-

Analisando a Fig. 6.1 é percebida a inexistência de um gradiente de temperatura na terceira camada do pavimento, o qual interfere bruscamente na resolução do

Problema Inverso, já que qualquer valor de difusividade térmica satisfaz a temperatura constante por toda a camada, e também torna imprecisa a estimação do limite entre a segunda e terceira camada. Este problema acontece, provando o que concluiu TRAMONTINI (2007), devido a não haver troca de calor entre as camadas mais profundas do pavimento com o ambiente externo.

De acordo com esta análise, foi decidido alterar o problema proposto, gerando calor dentro do pavimento, suprimindo esta necessidade de gradientes de temperatura nas diferentes camadas. A introdução de fontes de calor no pavimento foi a estratégia adotada. No entanto, este artifício complexifica o problema proposto, tornando um problema bidimensional, havendo gradientes de temperatura na direção vertical e radial. O problema se torna bidimensional, com fontes de calor, em coordenadas cilíndricas.

6.2 ANÁLISE DO PROBLEMA BIDIMENSIONAL

A identificação das espessuras e dos materiais com o problema bidimensional foi realizada em dois pavimentos experimentais, sendo um pavimento rígido e outro flexível.

A determinação do número de fontes de calor e as posições na Sonda Térmica foram investigadas por simulações com o cálculo do Problema Inverso, considerando as posições já definidas dos sensores de temperatura. Dessa forma, utilizaram-se como dados experimentais (sintéticos), dados simulados com o Problema Direto e verificou-se a estimação dos parâmetros com 1, 2 ou 3 fontes de calor através do Algoritmo Genético. Na Tabela 6.2 são mostrados os parâmetros estimados do problema com diferentes quantidades de fontes de calor e na Figura 6.2 é exemplificada a distribuição de temperatura e as curvas ajustadas com a resolução do Problema Inverso, utilizando duas fontes de calor.

Tabela 6.2 - Estimação de parâmetros com o Algoritmo Genético com diferentes números de fontes de calor

Parâmetros	Exp.	PI 1 Fonte	PI 2 Fontes	PI 3 Fontes
z_1 (m)	0,15	0,1656	0,1515	0,1514
z_2 (m)	0,4	0,3896	0,4059	0,3943
z_3 (m)	0,25	0,2447	0,2425	0,2541
α_1 (m^2/s)	$5 \cdot 10^{-7}$	$5,058 \cdot 10^{-7}$	$4,920 \cdot 10^{-7}$	$5,029 \cdot 10^{-7}$
α_2 (m^2/s)	$6 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$5,927 \cdot 10^{-7}$	$5,948 \cdot 10^{-7}$
α_3 (m^2/s)	$7 \cdot 10^{-7}$	$5,999 \cdot 10^{-7}$	$6,602 \cdot 10^{-7}$	$5,215 \cdot 10^{-7}$
k_2 ($W/m^{\circ}C$)	1,6	-	1,610	1,550
k_3 ($W/m^{\circ}C$)	1	0,988	1,007	0,989
R^2	-	0,999957	0,999955	0,999910
Tempo	-	13min 37s	17min 32s	15min 49s

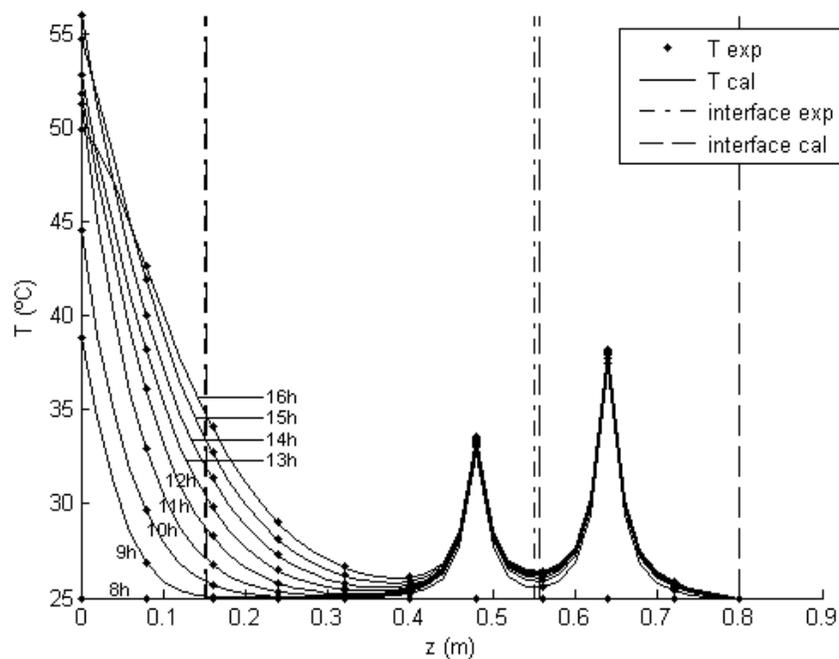


Figura 6.2 - Distribuição de temperatura experimental e calculada com duas fontes de calor e com parâmetros estimados através do Algoritmo Genético

A estratégia de introduzir fontes de calor constantes para camadas em que não há gradiente de temperatura naturalmente não melhorou significativamente a estimação das difusividades térmicas destas camadas, provavelmente por que o estado estacionário é

atingido em poucos instantes, e com isto não fornece dados que diferencie os resultados na função objetivo do Problema Inverso. No entanto o objetivo principal, de identificar o material através de alguma propriedade térmica, é satisfeito com a estimação da condutividade térmica com excelente aproximação.

Como o nível do coeficiente de determinação é bem próximo da unidade, havendo pouca diferença entre todos, este não é um parâmetro de principal análise. No entanto, as estimações com duas e três fontes de calor se mostraram com melhor aproximação nos parâmetros. Essa análise mostrou que é suficiente o uso de duas fontes de calor para a resolução do problema com eficiência.

O problema de estimação de parâmetros proposto compreende a busca de sete parâmetros na resolução do Problema Inverso, o que o torna um problema altamente complexo devido à gama de combinações existentes possíveis de solução do problema.

A estimação da espessura da terceira camada (z_3) é dependente da estimação da primeira e da segunda camada. Portanto, não é considerada como um parâmetro de estimação na resolução do Problema Inverso, e é calculada pela Eq. 6.3 para o pavimento rígido e pela Eq. 6.4 para o pavimento flexível, que diferenciam pela profundidade de instalação da sonda térmica, sendo esta a profundidade onde existem informações experimentais.

$$z_3 = 0,64 - z_1 - z_2 \quad (6.3)$$

$$z_3 = 0,56 - z_1 - z_2 \quad (6.4)$$

Considerando aspectos já determinados do Problema Direto, a solução do Problema Inverso pelo Método de Procura em Rede Modificado pode ser analisado quanto ao número de execuções (Eq. 5.11) do Problema Direto e o tempo total estimado de execução com a Eq. 6.5.

$$t_{PRM} = t_{PD} \cdot N_{PD} = t_{PD} \cdot nr \cdot nc^{np} \quad (6.5)$$

onde N_{PD} é o número de execuções do PD (Eq. 5.11);

t_{PD} é o tempo de execução de resolução de 1 PD;

t_{PRM} é o tempo estimado de execução do método PRM na resolução do PI.

Na Tabela 6.3 é mostrada uma estimativa do tempo de execução do método PRM calculado pela Eq. 6.5 variando o número de dados calculados nc de cada parâmetro a ser estimado, considerando $nr=3$, $np=7$ de acordo com o número de parâmetros e $t_{PD}=0,5s$ com a malha escolhida da resolução do PD.

Tabela 6.3 – Estimativa do tempo de execução do método PRM

nc	N_{PD}	t_{PRM}
3	6561	54min 41s
4	49152	6h 49min 36s
5	234375	32h 33min 8s
10	3000000	173d 14h 40min

Pela Tab. 6.3 percebe-se o alto custo computacional da aplicação do método Procura em Rede Modificado na resolução do Problema Inverso proposto. O alto custo computacional se deve pelo elevado número de resoluções do Problema Direto que se dá basicamente pelo grande número de parâmetros a serem estimados, mesmo com um pequeno número de valores calculados de cada parâmetro, do qual resulta em uma alta gama de combinações possíveis dos conjuntos de parâmetros.

Considerando um pequeno número de valores calculados de cada parâmetro, a busca dos parâmetros torna-se muito restrita (soluções subótimas), o que torna inviável a aplicação deste método para o problema bidimensional. O PRM foi eficiente para o problema unidimensional e também para a estimação de parâmetros como os das Eqs. 3.5 e 3.6.

Para o problema bidimensional, portanto, não foi utilizado o PRM, e sim os Algoritmos Genético e Memético, por trabalharem com a evolução de conjuntos de parâmetros, os quais resolvem menos vezes o PD do que o método Procura em Rede Modificado.

6.2.1 PAVIMENTO RÍGIDO

A aplicação do Algoritmo Genético pressupõe a definição de alguns dados e exigências características da aplicação do método, descritos na Tab. 6.4.

Tabela 6.4 – Dados e exigências características utilizados no Algoritmo Genético para o Pavimento Rígido

<i>Pré-definidos</i>	<i>Valor (u.m.)</i>
Intervalo α_i	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6} (m^2/s)$
Intervalo k_i	0,1 – 1 ($W/m^{\circ}C$)
Intervalo z_1	0,2 – 0,3 (m)
Intervalo z_2	0,2 – 0,4 (m)
Pop. Inicial	1000
Pop. Evolução	100
Ger. Máximas	10
R^2 Ótimo	0,99
Cruz. Artitmético	40 (%)
Cruz. Ari. Extremos	30 (%)
Prob. Mutação Fixa	1 (%)

Como a População Inicial no AG e no AM é criada aleatoriamente através de coeficientes randômicos, bem como da utilização destes no processo evolutivo, para cada aplicação dos métodos pode haver soluções diferentes ou mesmo uma tendência a uma solução, dependendo do número de gerações realizadas e da eficiência dos algoritmos para o problema proposto. O tempo de solução para um mesmo número de gerações também é diferente de acordo com as probabilidades de seleção e dos processos de criação de novos indivíduos.

De acordo com o aspecto da não existência de apenas uma solução do Problema Inverso, na Tab. 6.5 é mostrada a solução para três aplicações do Algoritmo Genético.

Tabela 6.5 – Estimação de parâmetros com o Algoritmo Genético para o Pavimento Rígido

Parâmetros	Experimental	1º PI AG	2º PI AG	3º PI AG	Média
z_1 (m)	0,25	0,2611	0,2351	0,2263	0,2408
z_2 (m)	0,30	0,2877	0,2838	0,3337	0,3017
z_3 (m)	0,11	0,0912	0,1211	0,08	0,0974
α_1 (m ² /s)	7,29 a 7,95 ($\cdot 10^{-7}$)	$9,629 \cdot 10^{-7}$	$9,116 \cdot 10^{-7}$	$9,593 \cdot 10^{-7}$	$9,446 \cdot 10^{-7}$
α_2 (m ² /s)	5,38 a 8,75 ($\cdot 10^{-7}$)	$9,675 \cdot 10^{-7}$	$8,815 \cdot 10^{-7}$	$8,909 \cdot 10^{-7}$	$9,133 \cdot 10^{-7}$
α_3 (m ² /s)	-	$6,226 \cdot 10^{-7}$	$9,387 \cdot 10^{-7}$	$9,212 \cdot 10^{-7}$	$8,275 \cdot 10^{-7}$
k_2 (W/m°C)	0,7	0,734	0,678	0,725	0,712
k_3 (W/m°C)	-	0,438	0,436	0,447	0,44
R^2	-	0,9626	0,9606	0,9633	0,9621
Tempo	-	1h 17min 46s	1h 12min 4s	53min 23s	1h 7min 44s

Pela Tab. 6.5 percebe-se a alta eficiência de determinação das espessuras das camadas para o pavimento rígido, apesar de certa variação a cada aplicação do algoritmo. Para a identificação dos materiais tem-se uma estimativa fora do intervalo considerado para as difusividades térmicas experimentais, além de grande variação na estimativa a cada aplicação. No entanto, o material pode ser identificado através da condutividade térmica, com excelente estimativa e pouca variação como demonstra a mesma tabela.

Para a identificação de todos os materiais é necessária a implantação de fontes de calor em todas as camadas, para existir o parâmetro k_i no Problema Direto, e sua possível estimativa. Na investigação de um pavimento desconhecido, a sonda térmica deveria ter resistências instaladas a uma distância pequena uma das outras, já que o material é identificado apenas onde existe uma fonte de calor.

Na Figura 6.3 é mostrada a distribuição de temperatura experimental e calculada para a média dos dados estimados com o Algoritmo Genético. O coeficiente de determinação obtido com a média dos parâmetros é $R^2=0,962$. Os resultados do modelo,

sobre a distribuição de temperatura, são semelhantes aos dados experimentais, apesar de existirem diferenças de aproximadamente 4°C em algumas curvas, como por exemplo, às 17:00 e às 17:30 em $0,08\text{m}$ e $0,16\text{m}$ de profundidade.

O principal problema quanto a essas diferenças é o erro nas medidas experimentais, já que são medidas do conjunto ar/sonda térmica/pavimento, não apenas do pavimento. As medidas experimentais são maiores que as medidas calculadas, sendo maiores estas diferenças quanto mais próximas da superfície. Em função disso, tem-se por hipótese que o ar disponível no orifício de instalação da sonda térmica, aquece com as fontes de calor, e sobe para as camadas mais superficiais, elevando as temperaturas experimentais nos sensores acima das fontes.

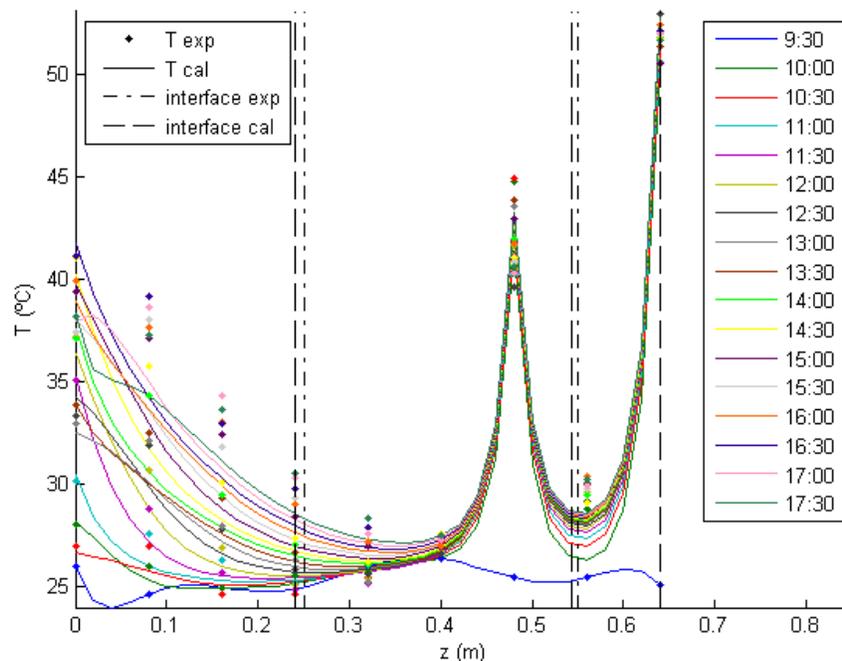


Figura 6.3 – Distribuição de temperatura experimental e calculada com a média dos dados estimados com o Algoritmo Genético para o Pavimento Rígido

Para a aplicação do Algoritmo Memético, escolheu-se utilizar uma população menor, já que há uma busca local no método, o qual eleva o custo computacional. Na Tabela 6.6 tem-se a definição de alguns dados e exigências características da aplicação do método.

Tabela 6.6 – Dados e exigências características utilizados no Algoritmo Memético para o Pavimento Rígido

<i>Pré-definidos</i>	<i>Valor (u.m.)</i>
Intervalo α_i	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ (m^2/s)
Intervalo k_i	0,1 – 1 ($W/m^{\circ}C$)
Intervalo z_1	0,2 – 0,3 (m)
Intervalo z_2	0,2 – 0,4 (m)
Pop. Inicial	100
Pop. Evolução	10
Ger. Máximas	10
R^2 Ótimo	0,99
Cruz. Artitmético	40 (%)
Cruz. Ari. Extremos	30 (%)
Prob. Mutação Fixa	1 (%)
Ger. Busca Local	5 e 10
Iter. do LM	3

Na Tabela 6.7 é mostrada a solução do Problema Inverso com o Algoritmo Memético em três aplicações.

Tabela 6.7 – Estimação de parâmetros com o Algoritmo Memético para o Pavimento Rígido

Parâmetros	Experimental	1º PI AM	2º PI AM	3º PI AM	Média
z_1 (m)	0,25	0,2205	0,2863	0,232	0,2463
z_2 (m)	0,30	0,3282	0,3054	0,3483	0,3273
z_3 (m)	0,11	0,0913	0,0483	0,0597	0,0664
α_1 (m^2/s)	7,29 a 7,95 ($\cdot 10^{-7}$)	$8,342 \cdot 10^{-7}$	$9,324 \cdot 10^{-7}$	$9,224 \cdot 10^{-7}$	$8,963 \cdot 10^{-7}$
α_2 (m^2/s)	5,38 a 8,75 ($\cdot 10^{-7}$)	$7,316 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^{-7}$	$7,851 \cdot 10^{-7}$	$7,522 \cdot 10^{-7}$
α_3 (m^2/s)	-	$4,406 \cdot 10^{-7}$	$5,051 \cdot 10^{-7}$	$7,499 \cdot 10^{-7}$	$5,652 \cdot 10^{-7}$
k_2 ($W/m^{\circ}C$)	0,7	0,668	0,746	0,729	0,714
k_3 ($W/m^{\circ}C$)	-	0,453	0,446	0,453	0,451
R^2	-	0,9498	0,96	0,9604	0,9567
<i>Tempo</i>	-	17min 53s	15min 59s	16min 38s	16min 50s

Assim como o AG o Algoritmo Memético é bem eficiente na estimação das espessuras e das condutividades térmicas, havendo maior discrepância para a espessura da terceira camada. Também apresenta os problemas de estimação e variação para as difusividades térmicas, o qual reapresenta a ineficácia da estimação deste parâmetro para o problema proposto. A vantagem do Algoritmo Memético, em relação ao AG, é um custo computacional menor com as condições escolhidas na aplicação realizada.

Na Figura 6.4 é mostrada a distribuição de temperatura experimental e calculada para a média dos dados estimados com o Algoritmo Memético. O coeficiente de determinação obtido com a média dos parâmetros é $R^2=0,9581$.

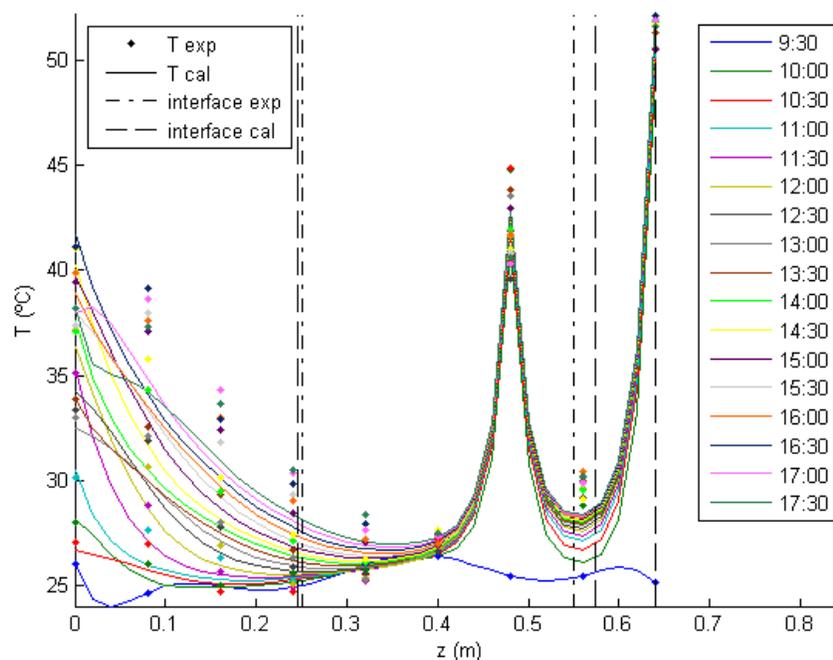


Figura 6.4 – Distribuição de temperatura experimental e calculada com a média dos dados estimados com o Algoritmo Memético para o Pavimento Rígido

Comparando a média dos parâmetros estimados apresentados pela Tab. 6.8, percebe-se uma melhor estimação com o Algoritmo Genético, considerando as condições apresentadas na aplicação de cada método. Tem-se uma melhor aproximação nas espessuras da 2ª e 3ª camada e um melhor R^2 . Os dois métodos estimaram condutividades térmicas próximas. As difusividades térmicas são desconsideradas pela grande variação na estimação, concluída anteriormente. A vantagem do AM é o custo

computacional nas condições apresentadas, apesar do AG possuir um custo computacional compatível para o objetivo proposto.

Tabela 6.8 – Média dos parâmetros estimados com o Algoritmo Genético e o Algoritmo Memético para o Pavimento Rígido

Parâmetros	Experimental	Média AG	Média AM
z_1 (m)	0,25	0,2408	0,2463
z_2 (m)	0,30	0,3017	0,3273
z_3 (m)	0,11	0,0974	0,0664
a_1 (m ² /s)	7,29 a 7,95 ($\cdot 10^{-7}$)	$9,446 \cdot 10^{-7}$	$8,963 \cdot 10^{-7}$
a_2 (m ² /s)	5,38 a 8,75 ($\cdot 10^{-7}$)	$9,133 \cdot 10^{-7}$	$7,522 \cdot 10^{-7}$
a_3 (m ² /s)	-	$8,275 \cdot 10^{-7}$	$5,652 \cdot 10^{-7}$
k_2 (W/m°C)	0,7	0,712	0,714
k_3 (W/m°C)	-	0,44	0,451
R^2	-	0,962	0,9581
<i>Tempo</i>	-	1h 7min 44s	16min 50s

6.2.2 PAVIMENTO FLEXÍVEL

Na Tabela 6.9 é apresentada a definição de alguns dados e exigências características da aplicação do Algoritmo Genético para o Pavimento Flexível.

Tabela 6.9 – Dados e exigências características utilizados no Algoritmo Genético para o Pavimento Flexível

<i>Pré-definidos</i>	<i>Valor (u.m.)</i>
Intervalo α_i	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ (m^2/s)
Intervalo k_i	0,1 – 1 ($W/m^{\circ}C$)
Intervalo z_1	0,1 – 0,3 (m)
Intervalo z_2	0,3 – 0,5 (m)
Pop. Inicial	1000
Pop. Evolução	100
Ger. Máximas	10
R^2 Ótimo	0,99
Cruz. Artitmético	40 (%)
Cruz. Ari. Extremos	30 (%)
Prob. Mutação Fixa	1 (%)

Tem-se na Tab. 6.10 a estimação dos parâmetros na solução do Problema Inverso com o Algoritmo Genético.

Tabela 6.10 – Estimação de parâmetros com o Algoritmo Genético para o Pavimento Flexível

Parâmetros	Experimental	1º PI AG	2º PI AG	3º PI AG	Média
z_1 (m)	0,15	0,1509	0,14	0,1471	0,146
z_2 (m)	0,40	0,3961	0,3861	0,3729	0,385
z_3 (m)	0,01	0,0129	0,0338	0,0399	0,0289
α_1 (m^2/s)	2,92 a 5,43 ($\cdot 10^{-7}$)	$9,411 \cdot 10^{-7}$	$8,974 \cdot 10^{-7}$	$7,88 \cdot 10^{-7}$	$8,755 \cdot 10^{-7}$
α_2 (m^2/s)	5,38 a 8,75 ($\cdot 10^{-7}$)	$8,921 \cdot 10^{-7}$	$8,109 \cdot 10^{-7}$	$9,459 \cdot 10^{-7}$	$8,83 \cdot 10^{-7}$
α_3 (m^2/s)	-	$6,433 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$6,66 \cdot 10^{-7}$	$6,231 \cdot 10^{-7}$
k_2 ($W/m^{\circ}C$)	0,7	0,924	0,824	0,809	0,852
k_3 ($W/m^{\circ}C$)	-	0,312	0,314	0,32	0,315
R^2	-	0,9731	0,9704	0,9673	0,9703
<i>Tempo</i>	-	45min 14s	42min 24s	52min 26s	46min 41s

Percebe-se pela Tab. 6.10 uma eficiente estimação para as espessuras do Pavimento Flexível, uma estimação variável e ineficiente para as difusividades térmicas, assim como no Pavimento Rígido, e uma estimação próxima, mas não tão eficiente na condutividade térmica da 2ª camada (conhecida) como no Pavimento Rígido.

A Figura 6.5 mostra a distribuição de temperatura experimental e calculada para a média dos dados estimados com o Algoritmo Genético. O coeficiente de determinação obtido com a média dos parâmetros é $R^2=0,9712$.

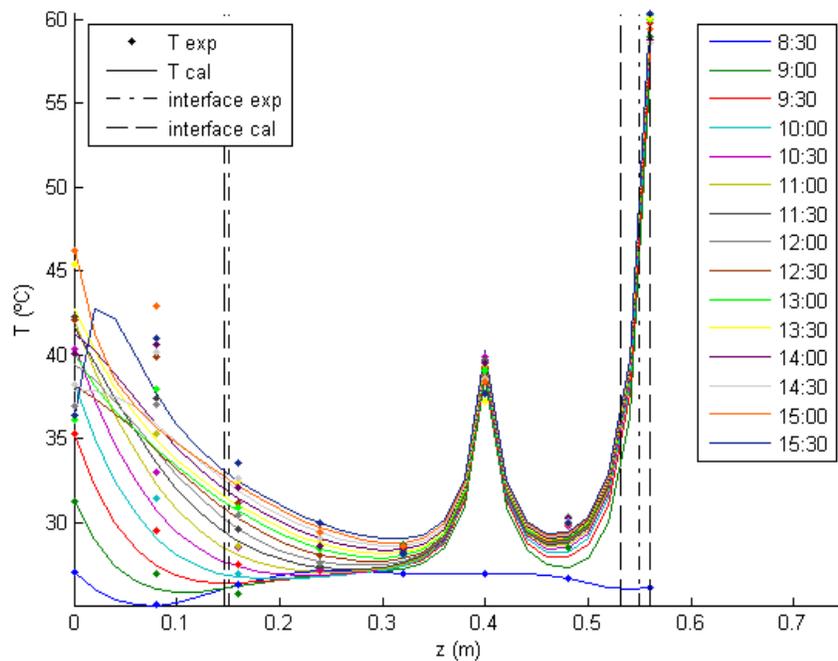


Figura 6.5 – Distribuição de temperatura experimental e calculada com a média dos dados estimados com o Algoritmo Genético para o Pavimento Flexível

Na Tabela 6.11 tem-se a definição de alguns dados e exigências características da aplicação do Algoritmo Memético.

Tabela 6.11 – Dados e exigências características utilizados no Algoritmo Memético para o Pavimento Flexível

<i>Pré-definidos</i>	<i>Valor (u.m.)</i>
Intervalo α_i	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ (m^2/s)
Intervalo k_i	0,1 – 1 ($W/m^{\circ}C$)
Intervalo z_1	0,1 – 0,3 (m)
Intervalo z_2	0,3 – 0,5 (m)
Pop. Inicial	100
Pop. Evolução	10
Ger. Máximas	10
R^2 Ótimo	0,99
Cruz. Artitmético	40 (%)
Cruz. Ari. Extremos	30 (%)
Prob. Mutação Fixa	1 (%)
Ger. Busca Local	5 e 10
Iter. do LM	3

Na Tabela 6.12 é mostrada a solução do Problema Inverso com o Algoritmo Memético em três aplicações.

Tabela 6.12 – Estimação de parâmetros com o Algoritmo Memético para o Pavimento Flexível

Parâmetros	Experimental	1º PI AM	2º PI AM	3º PI AM	Média
z_1 (m)	0,15	0,1514	0,1423	0,1339	0,1425
z_2 (m)	0,40	0,3928	0,3981	0,3803	0,3904
z_3 (m)	0,01	0,0158	0,0196	0,0458	0,0271
α_1 (m^2/s)	2,92 a 5,43 ($\cdot 10^{-7}$)	$8,019 \cdot 10^{-7}$	$7,239 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	$7,653 \cdot 10^{-7}$
α_2 (m^2/s)	5,38 a 8,75 ($\cdot 10^{-7}$)	$7,313 \cdot 10^{-7}$	$9,475 \cdot 10^{-7}$	$3,228 \cdot 10^{-7}$	$6,672 \cdot 10^{-7}$
α_3 (m^2/s)	-	$6,716 \cdot 10^{-7}$	$5,144 \cdot 10^{-7}$	$6,656 \cdot 10^{-7}$	$6,172 \cdot 10^{-7}$
k_2 ($W/m^{\circ}C$)	0,7	0,838	0,713	0,778	0,776
k_3 ($W/m^{\circ}C$)	-	0,314	0,287	0,315	0,305
R^2	-	0,9678	0,9437	0,9536	0,955
<i>Tempo</i>	-	13min 20s	14min 10s	14min 38s	14min 3s

Na Tabela 6.12 é mostrada a eficiente estimação para as espessuras do Pavimento Flexível com o Algoritmo Memético. O AM estimou mais próxima a condutividade térmica da 2ª camada do que o AG, e reapresenta a variação e a ineficiente estimação das difusividades térmicas. Novamente, o custo computacional mostra-se menor ao AM de acordo com as condições da aplicação dos algoritmos.

Na Figura 6.6 é mostrada a distribuição de temperatura experimental e calculada para a média dos dados estimados com o Algoritmo Memético. O coeficiente de determinação obtido com a média dos parâmetros é $R^2=0,9616$.

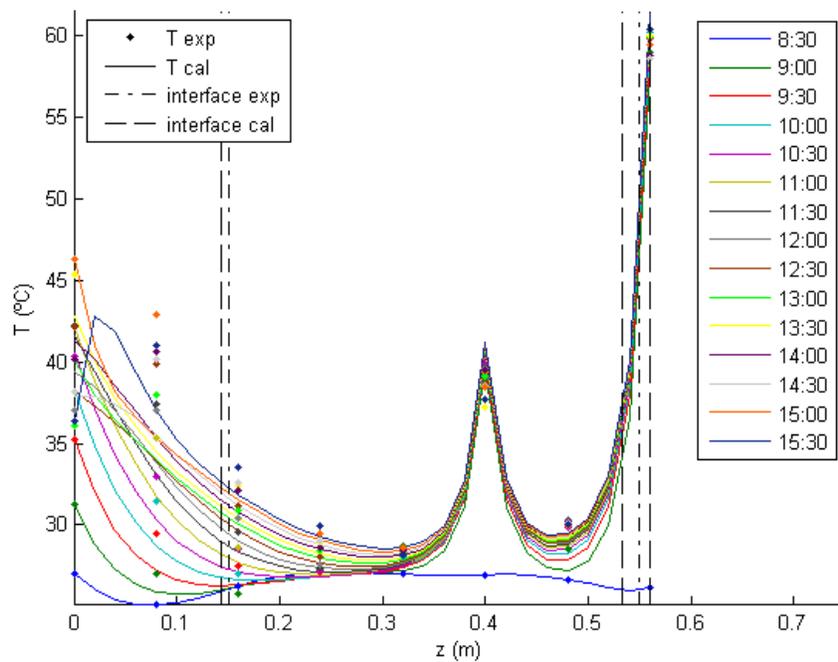


Figura 6.6 – Distribuição de temperatura experimental e calculada com a média dos dados estimados com o Algoritmo Memético para o Pavimento Flexível

Comparando a média dos parâmetros estimados apresentados pela Tab. 6.13, percebe-se uma estimação muito próxima das espessuras com os dois métodos, havendo uma diferença maior para a estimação da condutividade térmica da 2ª camada, mais próxima do experimental para o AM, porém com um R^2 melhor para o AG. Para as difusividades térmicas também apresenta problemas de estimação, assim como no Pavimento Rígido. Novamente, a vantagem do AM é o custo computacional nas

condições apresentadas, apesar do AG possuir um custo computacional compatível para o objetivo proposto.

Tabela 6.13 – Média dos parâmetros estimados com o Algoritmo Genético e o Algoritmo Memético para o Pavimento Flexível

Parâmetros	Experimental	Média AG	Média AM
$z_1 (m)$	0,15	0,146	0,1425
$z_2 (m)$	0,40	0,385	0,3904
$z_3 (m)$	0,01	0,0289	0,0271
$a_1 (m^2/s)$	2,92 a 5,43 ($\cdot 10^{-7}$)	$8,755 \cdot 10^{-7}$	$7,653 \cdot 10^{-7}$
$a_2 (m^2/s)$	5,38 a 8,75 ($\cdot 10^{-7}$)	$8,83 \cdot 10^{-7}$	$6,672 \cdot 10^{-7}$
$a_3 (m^2/s)$	-	$6,231 \cdot 10^{-7}$	$6,172 \cdot 10^{-7}$
$k_2 (W/m^{\circ}C)$	0,7	0,852	0,776
$k_3 (W/m^{\circ}C)$	-	0,315	0,305
R^2	-	0,9712	0,9616
<i>Tempo</i>	-	46min 41s	14min 3s

7. CONCLUSÕES

São apresentadas as conclusões a respeito do desenvolvimento, das análises e dos resultados obtidos no trabalho:

1. O modelo unidimensional foi eficiente para estimação de parâmetros nas camadas com gradientes térmicos significativos e por isso apresenta problemas no limite entre a 2ª e 3ª camada e na estimação da difusividade térmica para a 3ª camada do pavimento, na qual o gradiente térmico é praticamente nulo. Os três métodos de Problema Inverso utilizados foram igualmente eficientes, sendo que o Algoritmo Memético apresentou vantagens em relação ao tempo de execução computacional.
2. No modelo bidimensional, a solução do Problema Inverso teve excelente aproximação dos parâmetros espessura e condutividade térmica, suficiente para a identificação das espessuras e materiais dos pavimentos, mesmo com a ineficácia de estimação das difusividades térmicas. A limitação desse modelo é a necessidade da instalação de fontes de calor em vários pontos, para viabilizar a identificação dos materiais.
3. O método Procura em Rede Modificado é ineficiente no modelo bidimensional, pelo grande número de parâmetros a serem estimados, e conseqüentemente elevado custo computacional.
4. Os Algoritmos Genético e Memético foram eficientes na estimação de parâmetros do modelo bidimensional e mostraram pouca diferença entre os valores dos parâmetros estimados. Considerando as definições das exigências de aplicação para cada método, o Algoritmo Memético teve menor custo computacional. Mesmo assim, a aplicação do Algoritmo Genético tem custo computacional viável para a proposta de resolução do problema.
5. Considerando a identificação das espessuras e dos materiais, os dois parâmetros mais importantes na prospecção de pavimentos já construídos, a técnica proposta neste trabalho traz uma nova perspectiva no uso de técnicas de avaliação estrutural. Esta técnica não necessita de muitos equipamentos,

grande espaço de atuação (interferência no tráfego) e também dispensa experiência para uma análise complexa dos dados obtidos, pois é de fácil uso. A pequena interferência no pavimento pode ser revertida com o uso de argamassa para preencher os furos realizados, e não necessita de uma análise laboratorial posterior dos materiais do pavimento analisado.

Trabalhos futuros:

- Viabilizar uma sonda térmica com mais fontes de calor;
- Utilizar um menor tempo de medição dos dados experimentais para usar o período de aquecimento transiente das fontes de calor;
- Testar o problema com uma fonte de calor pulsante;
- Testar a colocação em furos separados dos sensores de temperatura e das fontes de calor;
- Avaliar as exigências dos métodos AG e AM, visando a otimização do tempo;
- Construir uma sonda térmica em condições de aplicação efetiva e elaborar um software para o cálculo dos parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, H. M.; BAYOUMI, M. M. Volterra-System Identification Using Adaptive Real-Coded Genetic Algorithm. In: **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans**, Vol. 36, Nº 4. Canadá, 2006.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, 2006.
- BORGES, P. A. P.; VIONE, M. T. e CERVI, A. Determinação dos Coeficientes do Modelo de Van Genuchten Empregando o Problema Inverso. **Anais do VIII Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional**, Pelotas, 2008.
- BRITTO, A. S. **Identificação de Sistemas Utilizando Algoritmos Meméticos para Estimação de Parâmetros**, Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí, 2007.
- CERVI, A. **Determinação dos Parâmetros da Equação Característica de Solos Através de Técnicas de Solução de Problemas Inversos com Base em Dados de Evaporação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí, 2009.
- CHEN, B.; ROCKETT, L.; MALLICK, R. B. A Laboratory Investigation of Temperature Profiles and Thermal Properties of Asphalt Pavements with Different Subsurface Layers. **Anais do 83th Annual Meeting and Technical Sessions of the Association of Asphalt Paving Technologists**, USA, 2008.
- CHEN, H. T.; LIN, J. Y. Application of the Hybrid Method to Transient Heat Conduction in One-Dimensional Composite Layers. In: **Computers & Structures**, Vol. 39, Nº 5. UK, 1991.
- COLAGRANDE, S.; RANALLI, D.; SCOZZAFAVA M.; TALLINI M. GPR investigations on degraded road pavements built on embankment. In: **Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials**, Londres, 2007.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação**: DNIT. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**: DNIT. Rio de Janeiro, 2006.
- DIEFENDERFER, K. B.; IMAD, L. A-Q.; STACEY, D. Model to Predict Pavement Temperature Profile. In: **The Journal of Transportation Engineering**, USA: ASCE, Vol. 132, Nº 2, February 1, 2006.
- EVANS, R. D.; FROST, M. W.; STONECLIFFE-JONES, M.; DIXON, N. Variation in information obtained from interpretation of ground penetrating radar (GPR) pavement investigation data. In: **Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials**, Londres, 2007.

- FONTUL, S.; ANTUNES, M.L.; FORTUNATO, E.; OLIVEIRA, M. Practical application of GPR in transport infrastructure survey. In: **Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials**, Londres, 2007.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Boston: Addison Wesley Longman, USA, 1989.
- GUI, J.; PHELAN, P. E.; KALOUSH, K. E.; GOLDEN, J. S. Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures. In: **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 19, N° 8. USA, 2007.
- HELLMANN, L. **Determinação de Propriedades Térmicas de Materiais de Pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí, 2008.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial System**. Ann Arbor, 2. ed. The University of Michigan Press, USA, 1975.
- INCROPERA, F. P; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. Traduzido por: Carlos Alberto Biolchini da Silva. Departamento de Engenharia Mecânica, UERJ. Tradução de: Fundamentals of heat and mass transfer.
- JIA, L.; SUN, L.; HUANG, L. Numerical temperature predication model and thermal properties for asphalt pavement. In: **Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials**, Londres, 2007.
- KRISTINSSON, K; DUMONT, G. A. System Identification and Control Using Genetic Algorithms. In: **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, Vol. 22, N° 5. Canadá, 1992.
- LEANDRO, G. V.; BORGES, A. P. B.; SALVADORI, F.; CAMPOS, M.; RECH, C.; CAMARGO, R. F. Optimal Mathematical Model of Hall-Effect Sensor. **Anais do EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimazation**, Rio de Janeiro, 2008.
- MARIANI, V. C.; LIMA, A. G. B.; COELHO, L. S. Inverse Problem For Estimation Of Apparent Thermal Diffusivity. **Anais do 19th International Congress of Mechanical Engineering**, Brasília, 2007.
- MOSCATO, P. **On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts: Towards Memetic Algorithms**. Caltech Concurrent Computation Program, C3P Report 826, Pasadena CA., 1989.
- MRAWIRA, D. M.; LUCA, J. Effect of aggregate type, gradation, and compaction level on thermal properties of hot-mix asphalts. In: **Canadian Journal of Civil Engineering**, Vol. 33. Canadá, 2006.
- NIELSEN, N; HAUSER, B.; PREBER, T.; SEBAALY, P.; JOHNSTON, D.; HUFT, D.; BANG, S. Full Depth Reclamation On Existing Asphalt Pavements. **Anais do 4º Eurasphalt & Eurobitume Congress**, Dinamarca, 2008.
- ÖZISIK, M. N. **Heat Conduction**. John Wiley & Sons. New York, 1993.

- ÖZISIK, M. N.; ORLANDE, H. R. B. **Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications**. Taylor Francis. New York, 2000.
- PARK, D-Y.; NEERAJ, B.; KARIM, C. Effective Layer Temperature Prediction Model and Temperature Correction via Falling Weight Deflectometer Deflections. In: **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Nº 1764, National Research Council, Washington D.C., 2001.
- PAROLIN, R. S.; BORGES, P. A. P. Determinação da Relação entre Largura de Parede e Difusividade Térmica Visando a Minimização da Entrada de Calor em Edificações. **Anais do VIII Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional/Pelotas**, Pelotas, 2008.
- PIETROBON, C. L. R.; PIETROBON, C. E.; ALVES, S. M. A Variação da Condutividade Térmica de Materiais de Construção Moldados “In Loco” Com a Umidade e a Densidade: Experimentos Didáticos Com Equipamentos Tecnologicamente Apropriados. **Anais do I Encontro Tecnológico de Engenharia Civil e Arquitetura**, UEM, Maringá, 2000.
- SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Vol. I. São Paulo, 1997.
- SILVA NETO, A. J.; MOURA NETO, F. D. **Problemas Inversos: Conceitos Fundamentais e Aplicações**. UERJ. Rio de Janeiro, 2005.
- SMITH, G. D. **Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods**. Clarendon Press, Oxford, 1978.
- SOLAIMANIAN, M.; KENNEDY, T.W. Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation. In: **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Nº 1417, National Research Council, Washington D.C., 1993.
- SOUTHGATE, H.F.; DEEN, R.C. Temperature Distribution within Asphalt Pavements and its Relationship to Pavement Deflection. In: **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Nº 291, National Research Council, Washington D.C., 1969.
- TRAMONTINI, R. **Modelagem Matemática da Transferência de Calor em Pavimentos Rígidos e Flexíveis**. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí, 2007.
- WANG, D.; ROESLER, J. R.; GUO, D-Z. Analytical Approach to Predicting Temperature Fields in Multilayered Pavement Systems. In: **Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 135, Nº 4. USA, 2009.
- WOLFE, R. K.; RANDOLPH, B. W; COLONY, D. C. Standardized Elastic Moduli of Pavement Layers for Overlay Design. In: **Journal of Transportation Engineering**, Vol. 121, Nº 2. USA, 1995.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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