

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

LILIANE HELLMANN

**DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS DE
PAVIMENTAÇÃO**

**Ijuí
2008**

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

LILIANE HELLMANN

**DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS DE
PAVIMENTAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Eng. Luciano Pivoto Specht
Co – Orientador: Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges

Ijuí – RS

2008

**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

**“DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS DE
PAVIMENTAÇÃO”**

Elaborada por

LILIANE HELLMANN

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

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Luciano Pivoto Specht - DeTec (Orientador)

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges– DeFEM (Co-orientador)

Prof. Dr. Chong Wang – DeFEM

Prof. Dr. Deividi Pereira - UFSM

Ijuí, RS, 22 de janeiro de 2008

DEDICATÓRIA

Aos meus familiares, em especial ao meu pai Celso e minha mãe Elisa, queridos e sempre presentes, que contribuíram grandemente para meu êxito, compreendendo minhas ausências, compartilhando meus ideais e incentivando minha busca, com palavras de estímulo e carinho.

Aos meus irmãos Cezar e Cleverson, companheiros e amigos.

A Alice e Emily pela compreensão e palavras de incentivo.

Ao Lucas, pelo amor e carinho.

A todos que acreditaram na minha capacidade e apostaram na minha vitória, pois eles são suporte de cada um de meus passos. As alegrias de hoje também são suas, pois seu amor, paciência e amizade, foram importantes para a conquista dessa vitória.

AGRADECIMENTOS

Ao Ser Supremo, que deu-nos forças para chegar ao fim do caminho que escolhemos, que presenteou-nos com muitos momentos de vitórias e sucessos, compartilhando conosco as horas difíceis, acompanhando-nos no feliz desempenho de nossa missão.

Ao professor Luciano Pivoto Specht, orientador deste trabalho, a minha enorme gratidão por sua paciência e dedicação plena, pelo meu crescimento pessoal e intelectual.

Ao professor Pedro A. Pereira Borges, a minha gratidão pelo empenho, dedicação e amizade.

Aos nossos mestres, que ensinando fizeram que construíssemos conhecimentos.

Aos colegas pela amizade e espírito de luta.

Enfim, a todos que estiveram presentes e contribuíram para que chegássemos ao fim de mais uma etapa de nossas vidas, o meu eterno obrigado.

RESUMO

No decorrer dos últimos anos, a modelagem matemática tornou-se uma ferramenta essencial na melhoria do controle de processos e da qualidade de produtos, utilizados no dimensionamento de pavimentos. À medida que os modelos matemáticos se tornam mais sofisticados, há um aumento na necessidade de dados confiáveis das propriedades desses materiais, destacam-se as propriedades mecânicas e térmicas. As três principais propriedades físicas de um material, do ponto de vista de cálculos térmicos, são o calor específico C_p , condutividade térmica (k) a difusividade térmica (α), que são importantes para qualquer material independentemente do seu uso. Pela grande influência da temperatura sobre os pavimentos e pela necessidade de propriedades térmicas mais confiáveis, desenvolveu-se nesse trabalho cálculos do C , k e α de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligantes, volume de vazios, teor de ligante e massa específica, além de uma amostra de concreto de cimento Portland. Foram determinadas a massa específica e o calor específico, através de procedimentos exclusivamente experimentais, a condutividade térmica através de um algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990) e a difusividade térmica por três processos: Método Experimental, Equação Analítica de Campbell e pelo Método do Problema Inverso. O Problema Direto foi resolvido numericamente pelo Método das Diferenças Finitas, usando o esquema explícito de avanços no tempo. Foram realizados experimentos de aquecimento de amostras de pavimentos rígidos e flexíveis e medição da temperatura em 4 pontos distintos, para a aquisição da variação da temperatura em função do tempo. Para a análise dos resultados obtidos utilizaram-se, além de interpretação dos dados tabulados e dos gráficos, técnicas estatísticas de forma a avaliar a influência de cada uma das variáveis controláveis (volume de vazios (V), teor de ligante (T) e massa específica (ρ)) nas variáveis de resposta (C , k e α). Para tanto foram realizadas análises de variância (ANOVA) para cada variável de resposta. Os resultados encontrados estão de acordo com resultados apresentados pela literatura, sendo estes mais específicos em relação aos componentes da mistura, podendo contribuir para estudos posteriores que envolvam propriedades térmicas.

Palavra chave: Pavimentos rígidos e flexíveis, calor específico, condutividade térmicas, difusividade térmica

ABSTRACT

In the last years the math modeling has become an essential tool in the products improvement and process controlling used in pavement design. As the math modeling become more and more sophisticated, there is an increasing of trustful data of these material properties. The mechanical and thermal properties are outstanding. The three main physical properties of a material, from a thermal calculation point of view for any material independently of its use are important the specific heating (C_p) thermal conductivity (k) and the thermal diffusivity (α). By the great influence of temperature on the pavements and by the necessity of more trustful thermal properties., have been developed on this work calculations, C , k and α of asphalted mixing with different kinds of ligament, empty volumes, grade of amalgamate and specific mass, besides a concrete sample of Portland concrete. It has been determined the specific mass, the specific heating, through experimental procedures, the thermal conductivity through a logarithm proposed by Shiozawa and Campbell (1990) and the thermal diffusivity through three process: Experimental method, Campbell Analytical Equation and by the Inverse Problem Method. The straight problem was solved numerically by the Method of Finite Differences, using the explicit scheme of time advances. It was made heating experiments of samples of rigid and flexible pavements and the measure of temperature in four different points, for the acquisition of temperature variation functioning as the time. For the analysis of the obtained results has been used, besides the table data interpretation and charts, statistic techniques so that it was possible to evaluate every of the variations (voids ratio (V), binder content (T) and specific mass (ρ)) in the answers variations (C , k and α). For that it was used analysis of variance (ANOVA) for every variable of answer. The results found are according to the results presented by the literature, being these more specific related to the mixture components. They can contribute to after studies that will involve thermal properties.

Key words: Rigid and flexible Pavements, specific heating, thermal conductivity, thermal diffusivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil de um pavimento rígido	23
Figura 2: Empenamento restringido da placa	25
Figura 3: Perfil de um pavimento flexível.....	26
Figura 4: Formação de trinca no revestimento asfáltico.....	28
Figura 5: Diagrama simplificado	28
Figura 6: Mapa das unidades climáticas do Brasil	30
Figura 7: Comportamento da Temperatura	32
Figura 8: Tipos de energia térmica atuantes em um pavimento com duas camadas	34
Figura 9: Modelo de taxa de energia	38
Figura 10: Ilustração da mistura asfáltica.....	41
Figura 11: Nome e composição das misturas asfálticas avaliadas	43
Figura 12: Deformação permanente em trilha de roda para todas as misturas ensaiadas	44
Figura 13: Aumento de $\pm 20\%$ no calor específico do material (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível.	46
Figura 14: Variando da condutividade térmica do material em $\pm 20\%$ (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível	47
Figura 15: Estrutura dos corpos-de-prova	49
Figura 16: Esquema ilustrativo dos corpos-de-prova	53
Figura 17: Fonte Estabilizada.....	54
Figura 18: Esquema ilustrativo da montagem dos equipamentos	55
Figura 19: Domínio de integração e os pontos da coleta das temperaturas.....	61
Figura 20: Curvas da temperatura calculada e temperatura experimental em função do tempo	68
Figura 21: Curvas da temperatura calculada e temperatura experimental em função do tempo	68
Figura 22: Curvas da temperatura calculada e temperatura experimental em função do tempo	69
Figura 23: Calor específico em função da variação do volume de vazios	72
Figura 24: Relação do calor específico em função da variação do teor de ligante.....	73
Figura 25: Relação do calor específico em função da variação da massa específica.....	73
Figura 26: Relação da condutividade térmica em função da variação do volume de vazios ...	77

Figura 27: Relação da condutividade térmica em função da variação do teor de ligante	77
Figura 28: Relação da condutividade térmica em função da variação da massa específica.....	78
Figura 29: Difusividade térmica em função da variação do volume de vazios na mistura de concreto asfáltico com ligante CAP	81
Figura 30: Difusividade térmica em função da variação do volume de vazios na mistura de concreto asfáltico com ligante AP	81
Figura 31: Difusividade térmica em função da variação do volume de vazios na mistura de concreto asfáltico com ligante AB	82
Figura 32: Condutividade térmica em função da variação do teor de ligante na mistura de concreto asfáltico com ligante CAP	82
Figura 33: Difusividade térmica em função da variação do teor de ligante na mistura de concreto asfáltico com ligante AP	83
Figura 34: Difusividade térmica em função da variação do teor de ligante na mistura de concreto asfáltico com ligante AB	83
Figura 35: Difusividade térmica em função da variação da massa específica na mistura de concreto asfáltico com ligante CAP	84
Figura 36: Difusividade térmica em função da variação da massa específica na mistura de concreto asfáltico com ligante AP	84
Figura 37: Difusividade térmica em função da variação da massa específica na mistura de concreto asfáltico com ligante AB	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores encontrados na literatura a respeito das propriedades de materiais asfálticos	48
Tabela 2: Características das amostras de concreto asfáltico com ligante CAP	50
Tabela 3: Características das amostras de concreto asfáltico com ligante AP	50
Tabela 4: Características das amostras de concreto asfáltico com ligante AB.....	50
Tabela 5: Característica das amostras CCP	51
Tabela 6: Caracterização das amostras de concreto asfáltico com ligante CAP.....	51
Tabela 7: Caracterização das amostras de concreto asfáltico com ligante AP.....	52
Tabela 8: Caracterização das amostras de concreto asfáltico com ligante AB	52
Tabela 9: Caracterização das amostras de CCP	53
Tabela 10: Massa específica (kgm^{-3}) das amostras	59
Tabela 11: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto asfáltico com ligante CAP	71
Tabela 12: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto asfáltico com ligante AP	71
Tabela 13: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto asfáltico com ligante AB.....	72
Tabela 14: Resultados do Calor Específico para as amostras de CCP	72
Tabela 15: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante CAP	75
Tabela 16: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante AP	76
Tabela 17: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante AB.....	76
Tabela 18: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de CCP	77
Tabela 19: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante CAP	79
Tabela 20: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante AP	80
Tabela 21: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante AB.....	80

Tabela 22: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de CCP	81
Tabela 23: Resumo dos resultados obtido para o calor específico	87
Tabela 24: Resumo dos resultados obtido para a condutividade térmica.....	87
Tabela 25: Resumo dos resultados obtido para a difusividade térmica para o método experimental	88
Tabela 26: Resumo dos resultados obtido para a difusividade térmica para o método de Campbell.....	88
Tabela 27: Resumo dos resultados obtido para a difusividade térmica para o método do problema inverso	89

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
AB	concreto asfáltico com ligante de asfalto-borracha
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Asphalt Institute
ANOVA	Análise de Variância
AP	concreto asfáltico com ligante asfalto-polímero
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	concreto asfáltico com ligante asfalto de petróleo
CCP	concreto de cimento Portland
CNT	Confederação Nacional do transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
LAPAV	Laboratório de Pavimentação
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
MA	Mistura Asfáltica
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SUPERPAVE™	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
a	área
A e B	coeficientes
b	coeficiente linear
C_p	calor específico
d	somatório do quadrado da diferença
d_i	diâmetro
q	fonte de calor
\bar{h}	coeficiente de película
h_i	altura
k	condutividade térmica
L	Teor de Ligante

m_i	massa
P_i	potência
Q_i	quantidade de calor
\dot{q}	fluxo de calor
q^*	calor total gerado pela fonte
Φ	transferência de calor
q	calor gerado por unidade de tempo e comprimento
R	raio
R^*	resistência
r	distância entre a fonte e o sensor
S	coeficiente angular
t	tempo presente
t_o	tempo inicial
T	temperatura final
T_a	temperatura do ar
T_{ab}	temperatura absoluta
T_o	temperatura inicial
T_{amb}	temperatura ambiente
T_1	termopar 1
T_2	termopar 2
T_3	termopar 3
T_4	termopar 4
Tc_i	temperatura calculada
Te_i	temperatura experimental
T_{sup}	temperatura superficial
V	Volume de Vazios
V_i	Volume
v_i	voltagem
$\begin{pmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{x} \end{pmatrix}$	vetor posição

$x(t)$	função linear
∂	derivada parcial
$\frac{\partial T}{\partial n}$	gradiente da temperatura na direção n
$\frac{\partial T}{\partial t}$	variação da temperatura em função do tempo
α	difusividade térmica
ρ_i	massa específica
ΔT_{mi}	temperatura média
∇	gradiente de temperatura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVO GERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 PAVIMENTOS	22
2.1.1 Pavimento Rígido	23
2.1.2 Pavimento Flexível.....	25
2.2 CLIMA	29
2.2.1 Clima Brasileiro.....	29
2.2.2 Clima Rio Grande do Sul	31
2.2.2.1 Classificação	31
2.2.2.2 Aspectos Pluviométricos:	31
2.2.2.3 Aspectos Térmicos	32
2.2.2.4 Umidade Relativa:	33
2.3 TRANSMISSÃO DE CALOR.....	33
2.3.1 Transmissão de Calor por Condução.....	34
2.3.2 Transmissão de Calor por Convecção	35
2.3.3 Transmissão de Calor por Irradiação.....	36
2.4 FLUXO DE CALOR	37
2.5 VARIÁVEIS INTERVENIENTES NO DESEMPENHO DE MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO.....	40
2.5.1 Ligante Asfáltico	41
2.5.2 Volume de Vazios	44
2.5.3 Propriedades Térmicas	45

3. METODOLOGIA	49
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	49
3.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E EXPERIMENTOS	53
4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS	56
4.1 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	56
4.2 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA	58
4.2.1 Método Experimental	58
4.2.1.1 Determinação da Massa Específica	58
4.2.1.2 Determinação do Calor Específico	60
4.2.2 Método proposto por Campbell.....	63
4.2.3 Método do Problema Inverso	64
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	70
5.1 CALOR ESPECÍFICO	70
5.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	74
5.3 DIFUSIVIDADE TÉRMICA	79
5.4 RESUMO DOS RESULTADOS	87
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
6.1 CONCLUSÕES.....	90
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
REFERÊNCIAS	92

1. INTRODUÇÃO

Equation Section 1

Milhares de veículos de passeio ou comerciais trafegam diariamente pelas rodovias e estradas de nosso país, transformando essa imensa malha rodoviária em verdadeiras artérias que têm como função básica, permitir a interligação de toda nação. Através dessas artérias escoam o que se produz no país e deslocam-se as pessoas. Desta forma necessita-se cada vez mais de tecnologias adequadas para tomada de decisões, já que um dos maiores problemas é estimar de forma satisfatória a vida útil da construção, tanto para pavimentos novos quanto para restauração rodoviária.

O transporte rodoviário é responsável por aproximadamente 95% dos deslocamentos de passageiros realizados no país com um volume de 140 milhões de usuários por ano e por 65% do transporte de cargas que escoam a produção brasileira.

Atualmente o Brasil possui a segunda maior malha rodoviária do mundo com 1,8 milhões de km de rodovias, sendo menor apenas que a americana. Ao analisar o atual sistema rodoviário brasileiro, torna-se evidente a pequena extensão de rodovias pavimentadas, que totalizam apenas 14% do total da malha rodoviária (CNT, 2007). A razão para tal fato está diretamente relacionada com a escassez de recursos públicos e com os altos custos dos materiais empregados na pavimentação de estradas.

No Brasil, da malha rodoviária pavimentada cerca de 74% se encontram classificadas como péssimas, ruins ou regulares (CNT, 2007). A péssima qualidade das rodovias brasileiras implica no aumento dos acidentes rodoviários, nas perdas de safra por tempo excessivo no transporte, ocasionando assim maior consumo de combustível, maior emissão de poluentes e maior manutenção do veículo, além da falta de segurança e conforto, entre outros aspectos.

Desta forma, faz-se necessário estabelecer mecanismos para garantir a manutenção deste grande patrimônio, avaliado, em 300 bilhões de dólares (DNER, 1998). Através desses procedimentos pode-se evitar a degradação da malha rodoviária melhorando seu desempenho.

Os pavimentos, durante sua vida útil, sofrem interferência na sua estrutura e funcionamento por fatores que podem ser externos, tais como tráfego e clima, e por fatores internos, como limitações ou deficiências nos processos construtivos e características físicas dos materiais (VILLERA e MARCON, 2004). O desempenho de um pavimento é a função conjunta de todos esses fatores. Medir o desempenho implica em observar o resultado da interação das características do pavimento e dos esforços externos que atuam sobre ele.

O pavimento é uma estrutura complexa e um bom projeto aliado a perfeita execução de todas as camadas são imprescindíveis para proporcionar conforto e segurança ao rolamento dos veículos, durabilidade e resistência aos carregamentos e intempéries.

Para o bom desempenho de um pavimento é importante obter misturas com graduações adequadas, conhecer as propriedades dos materiais que constituem suas camadas e analisar as condições as quais eles estarão expostos, já que dependendo das condições climáticas podem apresentar comportamentos diferenciados.

Avanços significativos na área da engenharia de pavimentos devem-se a aplicações observadas por longos períodos de tempo. Um exemplo clássico são os resultados obtidos pela AASHO Road Test (atualmente, AASHTO), desenvolvida nos Estados Unidos, em um período de 2 anos (entre outubro de 1958 e novembro de 1960), onde foram construídas várias seções de pavimentos flexíveis e rígidos, sendo aplicadas inúmeras repetições de vários tipos de eixos de carga.

Dados obtidos nessa pesquisa estão sendo interpretados sob diferentes enfoques até os dias atuais. São utilizados para estudos onde as diferenças relativas a fatores, tais como: carga do tráfego, materiais do pavimento, qualidade e controle construtivos e condições climáticas se diferem dos obtidos pela pesquisa.

Quando se avalia o sistema de infra-estrutura de transporte em nosso país, percebe-se que as condições e a manutenção são precárias. Sabendo-se da escassez de recursos financeiros é visível a necessidade de aperfeiçoamento dos investimentos nesta área. Para reduzir os problemas de durabilidade, necessidade de intervenções nas vias e, principalmente obter um melhor retorno nos investimentos é necessária a utilização de tecnologias e estudos que estejam relacionados com a real situação, seja dos materiais disponíveis, do tráfego ou das condições climáticas, pois o pavimento estará sujeito a essas condições ao longo de toda sua vida útil.

No Brasil, as pavimentações rígidas (constituídas por placas de concreto Portland) são dimensionadas, basicamente segundo o método elaborado pelo ABCP, e as pavimentações flexíveis (constituídas de revestimento betuminoso), segundo o DNER (atual DNIT).

Dentre os fatores climáticos, segundo Wahhab *et al.* (2001) a temperatura é um dos fatores mais importantes que afetam o desempenho de um pavimento. Variações de temperatura na estrutura dos pavimentos contribuem de modos diferentes no possível fracasso da mesma. O desempenho estrutural de um pavimento é altamente dependente das temperaturas a que estes pavimentos estão expostos.

Dentre os pavimentos rígidos e flexíveis há uma diferenciação quanto aos efeitos causados pela temperatura, devido aos materiais que compõem suas camadas.

Nos pavimentos rígidos, conforme DNIT (2005) além das cargas atuantes do tráfego, as placas estarão sujeitas a tensões internas provocadas pelas variações volumétricas do concreto, principalmente as retrações, devidas às variações da temperatura ambiente e do próprio concreto (retração térmica), perda d'água (retração hidráulica) e de outras naturezas.

Os pavimentos flexíveis são formados pela mistura de agregados e ligantes asfálticos. O material asfáltico é termo-sensível, tornando-se rígido a temperaturas baixas e fluido a temperaturas altas. Com isso a deformabilidade é maior ou menor de acordo com as variações da temperatura e com a atuação das cargas do tráfego (YODER e WITZAK, 1975; HUANG, 1993; BROWN 1997; SPECHT, 2004; KILPP, 2004; MEDINA e MOTTA, 2005).

Além do estudo da influência do clima e do tráfego, a especificação correta dos ligantes dependendo da região e o uso de ligantes modificados por polímeros são formas de melhorar o desempenho dos pavimentos (BERNUCCI *et al.*, 2002).

O volume de vazios de uma mistura tem um efeito significativo na dureza, que depende do tipo de agregado grosso. Um volume de vazios baixos faz a mistura ficar menos suscetível a umidade embora tenha só efeito leve no grau de saturação. Isto pode estar ligado a natureza do agregado (WALSH, 200?).

Segundo Bernucci *et al.* (2002) o uso de polímeros melhora o comportamento elástico do asfalto e contribui para a sua resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga. A borracha de pneu moída é mais uma alternativa interessante para os problemas brasileiros pois é uma mistura de alta resistência à deformação permanente, trabalhando com alta flexibilidade e menor rigidez.

Para que se tenham resultados e dados para análise do desempenho dos pavimentos e avaliação de materiais que compõem as camadas, utilizam-se experimentos e testes realizados em laboratório ou em pistas experimentais que podem simular a realidade de muitos pavimentos.

As pistas experimentais possibilitam inúmeros estudos, como o efeito da drenagem no subleito, o efeito de solicitações cíclicas sobre o solo, a influência das mudanças da temperatura sobre o revestimento do pavimento, o impacto das cargas de roda, e o efeito da fadiga nas placas de concreto de cimento Portland – CCP (PEREIRA, 2003).

Os ensaios de laboratório permitem avaliar os materiais que irão compor a estrutura do pavimento, nas condições de campo, sendo importantes tanto no projeto e na dosagem de

misturas asfálticas, como na previsão do desempenho de revestimentos asfálticos, mas implicam na adoção de Fatores Laboratório-Campo bastante elevados (FRITZEN, 2005).

Sabendo-se do elevado custo ao construir ou recuperar uma rodovia, faz-se necessário projetos que possibilitem obter pavimentos mais adequados para cada região. O desempenho de um pavimento é fortemente condicionado às características dos materiais utilizados (solos, agregados, finos e ligantes), à dosagem da mistura betuminosa, às condições de compactação e ao processo construtivo. Havendo falha, principalmente no que diz respeito às camadas asfálticas, por serem componentes de alto custo e com importante função estrutural, é certo o insucesso econômico do investimento.

No decorrer dos últimos anos, a modelagem matemática tornou-se uma ferramenta essencial na melhoria do controle de processos e da qualidade de produtos, utilizados no dimensionamento de pavimentos. À medida que os modelos matemáticos se tornam mais sofisticados, há um aumento na necessidade de dados confiáveis das propriedades desses materiais, destacam-se as propriedades mecânicas e térmicas.

As propriedades físicas de um material são aquelas diretamente relacionadas com mudanças de temperaturas. As três principais propriedades físicas de um material, do ponto de vista de cálculos térmicos, são a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico, que são importantes para qualquer material independentemente do seu uso.

Pela grande influência da temperatura sobre os pavimentos e pela necessidade de propriedades térmicas mais confiáveis, desenvolveu-se nesse trabalho cálculos sobre diferentes tipos de ligantes, volume de vazios, teor de ligante e massa específica.

1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo determinar o valor das propriedades físicas (C_p, k, α) de amostras de materiais de pavimentação (calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica) sob condições ambiente de laboratório, com diferentes tipos de ligantes, volume de vazios e teor de ligante.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar o calor específico (C_p) através de métodos experimentais.
- b) Determinar a condutividade térmica (k) através de um algoritmo proposto por Campbell.
- c) Determinar a difusividade térmica (α) através de 3 métodos: Método Experimental, Método de Campbell e Método do Problema Inverso.
- d) Comparar os resultados da difusividade térmica obtida pelos três métodos.
- e) Verificar se há influência do volume de vazios e teor de ligante sobre as propriedades térmicas calculadas.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 1 fez-se uma revisão da literatura, onde são abordados os tipos de pavimentos, fatores ambientais, transmissão de calor e propriedades térmicas; o capítulo 2 trata da metodologia e descrição dos equipamentos e experimentos realizados; no capítulo 3 apresenta-se o desenvolvimento dos cálculos das propriedades de massa específica (ρ), calor específico (C_p), condutividade térmica (k) e difusividade térmica (α); a análise e discussão das propriedades calculadas encontram-se no capítulo 4; e no último capítulo relatam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PAVIMENTOS

Pode-se definir pavimento como um sistema de várias camadas sobrepostas, com diferentes espessuras, e com a finalidade de suportar esforços vindos do tráfego e resistir às ações do meio ambiente.

Por injunções de ordem técnico-econômicas, o pavimento é uma estrutura de camadas, em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocadas em contato, resultando daí, um elevado grau de complexidade no que diz respeito ao cálculo de tensões e deformações das cargas impostas pelo tráfego (DNIT, 2006).

Segundo Medina (1997) historicamente, o objetivo da pavimentação de estradas e ruas é melhorá-las, protegendo-as da ação da água, do desprendimento de poeira e pedra, enfim, tornando-as mais cômodas e seguras ao tráfego e mais duráveis.

A estrutura de um pavimento com todas as camadas possíveis é constituída de uma fundação, do subleito, e de camadas com espessura e materiais determinados por um dos vários métodos de dimensionamento.

A superfície de um pavimento é tida como a camada mais nobre, onde ocorrem interações entre veículo e pavimento. É ela que mais afeta a segurança, o conforto, a conveniência e economias, inclusive do usuário.

Quanto à deformabilidade dos pavimentos, tradicionalmente consideram-se duas categorias, que se diferem pelos materiais utilizados nas camadas superiores. Dividem-se em pavimentos rígidos (camadas superiores constituídas de cimento Portland) e pavimentos flexíveis (camadas superiores constituídas por materiais betuminosos ou asfalto). Sob essas camadas, em ambos os pavimentos, normalmente existem duas camadas de materiais britados, designadas por sub-base e base. Além dessa classificação, para alguns autores (MEDINA 1997; SPECHT, 2007) o pavimento é dito semi-rígido quando, sob o revestimento betuminoso, tem-se uma base cimentada.

O dimensionamento e desempenho dos pavimentos dependem de uma combinação de fatores: técnicas materiais, construtivas, ambiente, volume de tráfego e manutenção e

programas de reabilitação (Hass and Hudson, 1978; Yoder and Witczac, 1975; Medina e Motta, 2005).

2.1.1. Pavimento Rígido

É constituído por placas de concreto Portland sobrepostas sobre o solo de fundação ou sobre sub-base intermediária.

As camadas do pavimento rígido são respectivamente: subleito, sub-base e placa de concreto, estruturados na Figura 1:

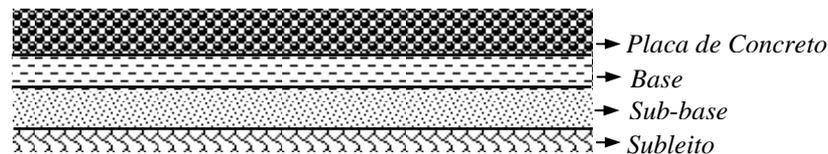


Figura 1: Perfil de um pavimento rígido

O *subleito* é a camada onde é feito o controle de deformações pelas cargas e o suporte das demais camadas.

A *sub-base* é a camada intermediária entre o subleito e a camada superficial, geralmente constituída por brita graduada simples ou solo-cimento.

O *revestimento* é a camada mais superficial, constituída de concreto. A transmissão de tensões para as camadas inferiores dependem da rigidez dessa camada bem como da resistência do pavimento às deformações e ação das cargas do tráfego.

Tomando como base a classificação dos aglomerantes, o cimento Portland, se enquadra na categoria dos aglomerados hidráulicos, necessita de água para hidratar-se. Conforme a Especificação Brasileira EB-1, da ABNT o cimento Portland é um aglomerante obtido pela pulverização do clínquer resultante da calcinação até fusão de materiais calcários e argilosos, água e gesso.

Segundo Senço (1997) a utilização do cimento já vem desde a época dos romanos, na Idade Antiga, utilizado na sua forma natural, conhecido como cimento pozolânico. Em 1824 o pedreiro inglês Joseph Aspadin produziu o cimento Portland, sendo esta mistura uma parte de argila e três partes de pedra calcária, formando um pó bem fino. A partir daí até os dias atuais, através de aperfeiçoamentos, tem-se um tipo de cimento para cada necessidade.

Na década de 20, a primeira análise estrutural do pavimento de concreto foi realizada por Harald Malcon Wastergaard, que o considerou como uma placa delgada homogênea, isotrópica e elástica, apoiada no subleito. Admite que o subleito ofereça reação apenas verticalmente, como um feixe de molas paralelas, independentes umas das outras, e que esta reação é proporcional ao deslocamento.

As primeiras construções de pavimentos de concreto foram feitas pelos ingleses em 1865. No Brasil, o primeiro pavimento de concreto foi construído em 1925 em Pelotas-RS.

Como nos países de primeiro mundo, no Brasil o pavimento de concreto está cada vez mais presente, seja por proporcionar mais conforto e segurança para os motoristas ou pela economia e rapidez com que se constrói.

Os pavimentos de concreto ou pavimento rígido são denominados “nobres”, pela alta durabilidade e baixa manutenção. Proporcionam maior segurança, pois, através da drenagem superficial não permite a aquaplanagem dos veículos, sua coloração clara proporciona melhor visibilidade e traz 30% de economia na iluminação, possui alta resistência a produtos químicos, tem boa distribuição das cargas resistindo muito bem a ação do tempo e tendo vida útil de mais de 25 anos (ABCP, 2003).

Esse tipo de pavimento possui uma tecnologia apropriada a vias rodoviárias e urbanas de tráfego pesado e intenso e a certas situações críticas de carregamento em ambientes como terminais de cargas, estacionamentos, aeroportos, metrô e determinados pisos industriais.

Segundo Tertuliano e Guimarães (2005) apesar de inúmeras vantagens, o pavimento rígido está sujeito à fissuração transversal e longitudinal, causadas pelo efeito do tráfego, pelo efeito de empenamento restringido e pela variação volumétrica, e para controlá-los são utilizadas juntas de transferência de esforços ou armadura nas placas.

As tensões ocorridas nos pavimentos rígidos variam linearmente em função do gradiente térmico, da espessura e do módulo de deformação da base. Ocorre o aumento do valor da tensão com o aumento do gradiente térmico, enquanto as tensões diminuem com o aumento da espessura ou do módulo de deformação da base (RODOLFO e BALBO, 2000)

Senço (1997) afirma que as variações de temperatura podem ser consideradas uniformes e a movimentação que provocam nas placas resulta do atrito com a superfície de apoio, gerando tensões internas que podem ser de tração ou de compressão. A redução de volume resulta em trinca ou fissuras transversais.

Ainda segundo Senço, as trincas ou fissuras longitudinais surgem em função do empenamento da placa, ou seja, a curvatura produzida pelas diferenças de temperatura entre as faces superior e inferior. Como mostra a Figura 2:

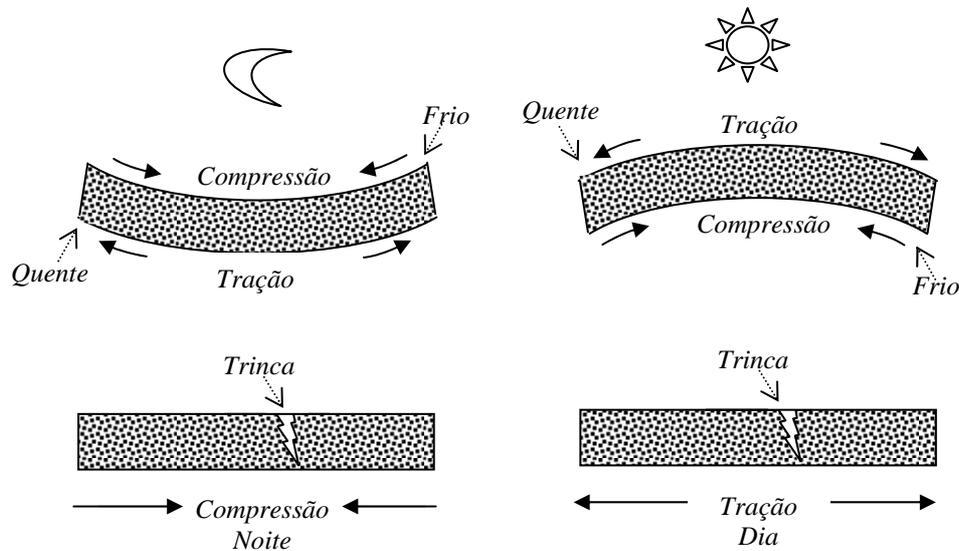


Figura 2: Empenamento restringido da placa

Pode-se perceber que durante a noite a face inferior da placa perde calor mais lentamente que a face superior. A tendência é expandir na face inferior, mais quente. Durante o dia, a face superior da placa é aquecida mais rapidamente que a face inferior, tendendo a expandir e empenar com as bordas para baixo. Essas tendências de expansões na face inferior e empenamento das bordas são restringidas pelo atrito com o terreno e pelo peso próprio da placa, produzindo trincas ou fissuras longitudinais.

2.1.2. Pavimento Flexível

É constituído por um revestimento betuminoso ou concreto asfáltico sobre uma base granular.

Um pavimento flexível com todas as suas camadas pode ter respectivamente: subleito, regularização, sub-base, base e revestimento, estruturados na Figura 3:

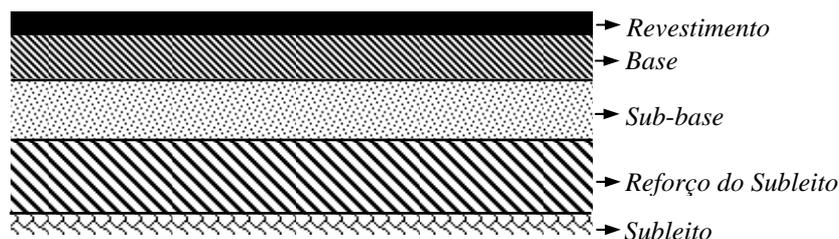


Figura 3: Perfil de um pavimento flexível

Subleito: terreno da fundamentação do pavimento, que ira suportar as demais camadas;

Regularização: camada de espessura irregular, construída sobre o subleito e destinada a conformá-lo, transversalmente e longitudinalmente;

Reforço do subleito: camada construída acima do subleito se necessário.

Sub-base: camada complementar à base, construída quando não for aconselhável construir diretamente a base sobre a regularização ou o subleito;

Base: camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;

Revestimento (capa de rolamento): camada que recebe diretamente a ação do tráfego e destinada a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança;

O Asfalto é definido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como sendo um material marrom escuro ou negro, no qual os componentes predominantes são betumes (combinação de hidrocarbonetos) encontrados na natureza ou obtidos em processo de destilação do petróleo.

O asfalto natural pode ser encontrado na superfície, quando as forças geológicas empurram a acumulação de petróleo para cima, formando verdadeiros lagos de asfalto ou dentro de pedras porosas, como arenito ou pedra calcária. Esse asfalto era utilizado pelos povos antigos, babilônicos, egípcios, gregos, e romanos para a impermeabilização dos materiais. Mas a real evolução do asfalto aconteceu quando técnicas modernas de refinamento de petróleo tiveram início em 1900, passando assim a ser difundido como material de pavimentação (AI, 1994). Com o desenvolvimento da indústria do refino de petróleo o resíduo betuminoso passa a ser abundante daí o grande avanço de pavimentos asfálticos.

Em 1870, o primeiro pavimento de asfalto foi construído em Newark, New Jersey. No Brasil a produção de asfalto iniciou em 1944, na refinaria do Ipiranga, com petróleo importado da Venezuela.

Nos pavimentos flexíveis a camada superior é constituída de concreto asfáltico e/ou de seus produtos, sendo o seu principal componente o betume, assim torna-se imprescindível o estudo de seu comportamento.

A rigidez de uma mistura betuminosa depende da temperatura e do tempo de carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos. Daqui pode definir-se uma rigidez elástica quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento e uma rigidez viscosa para altas temperaturas e longos tempos de carregamento (PAIS e PEREIRA, 1999).

Por causa de sua natureza viscoelástica e termosensível, o comportamento das misturas betuminosas dependem da temperatura e taxa de carregamento. Os efeitos do tempo e da temperatura estão relacionados, pois o comportamento dessa mistura a altas temperaturas em períodos longos de tempo é semelhante, assim como ao que acontece em durações curtas de cargas e a baixas temperaturas.

Sob temperaturas baixas o cimento asfáltico se comporta como um sólido elástico, quando sob carregamento eles deformam e sem carregamento voltam à forma original. Embora o cimento asfáltico seja um sólido elástico às baixas temperaturas, pode ficar muito frágil e trincar, quando excessivamente carregado. Já exposto a temperaturas altas ou ao tráfego de cargas lentas e/ou contínuas, o cimento asfáltico toma a forma de um líquido viscoso.

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

Segundo Medina (1997) quanto mais elevada a temperatura do pavimento asfáltico, maior sua deformabilidade.

Ao analisar os efeitos individuais e de interação dos componentes sobre a suscetibilidade térmica dos ligantes, constatou que a borracha, na faixa de 0 a 22%, contribui expressivamente para a redução da sensibilidade dos ligantes à temperatura e a além de aumentar o grau de desempenho dos ligantes (FAXINA (2005)).

As fissuras que ocorrem por fatores térmicos, são resultados de processos repetitivos de aquecimento e resfriamento da camada superficial. À noite os pavimentos esfriam, e induzem tensões térmicas que excedem às horas de luz dos dias quentes. Estas tensões induzidas não excedem a resistência à tração da mistura do agregado asfáltico na camada superficial, mas as fissuras ocorrem com o tráfego de cargas (EPPS, 1997).

A repetição das cargas das rodas de um veículo produz a flexão da camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso. Iniciam-se trincas, geralmente, na parte inferior do revestimento, que se propagam para cima até atingir a superfície. Na Figura 4, mostra-se de

modo esquemático as deformações desenvolvidas no revestimento devido à passagem das rodas de um veículo.

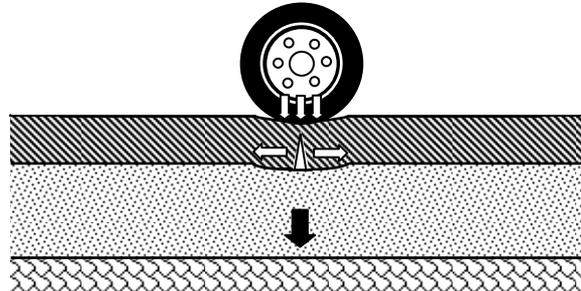


Figura 4: Formação de trinca no revestimento asfáltico

Segundo Specht (2004) os mais severos defeitos que ocorrem em estruturas flexíveis se refletem no revestimento e dois modos de solicitação mecânica podem ser identificados: flexão repetida, responsável pela fadiga do material; e a compressão simples, que conduz o acúmulo de deformações permanentes (YODER e WITZACK 1975, BROWN 1997, MEDINA e MOTTA, 2005).

Brown (1997) apresenta na Figura 5 um diagrama simplificado onde todas as variáveis são envolvidas no dimensionamento dos pavimentos.

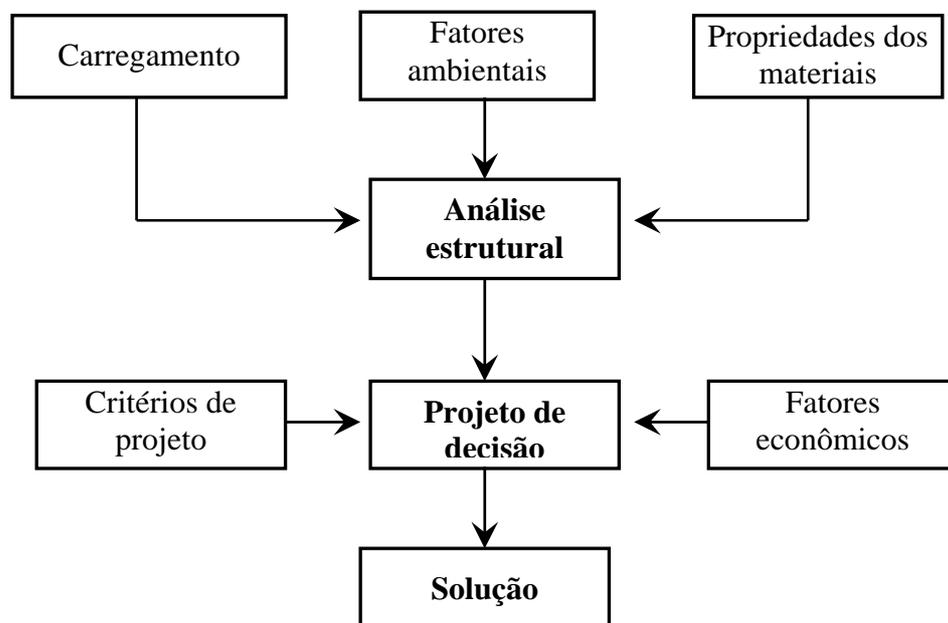


Figura 5: Diagrama simplificado

2.2. CLIMA

Para Medina (1997) o clima pode ser definido como um conjunto de fenômenos meteorológicos que caracterizam, durante um longo período, o estado médio da atmosfera e sua evolução em determinado lugar, resultando daí uma combinação de nebulosidade, umidade, temperatura, vento, pressão barométrica, etc.

Motta (1991) classifica o clima segundo alguns critérios e parâmetros que podem ser:

- Fatores estáticos ou geográficos: relevo, latitude, continentalidade ou maritimidade;
- Fatores dinâmicos: sistemas de circulação atmosférica;
- Temperaturas médias, máximas e mínimas normais.

2.2.1. Clima Brasileiro

O Brasil, pelas suas dimensões continentais é influenciado pelas configurações geográficas, altitude e dinâmica das correntes e massas de ar predominando assim uma diversificação climática bem ampla. Essas massas de ar assumem grande importância, pois atuam diretamente sobre as temperaturas e os índices pluviométricos, provocando as diferenciações climáticas regionais.

De todo o território brasileiro, 92% se situa na zona intertropical delimitado ao norte pela Linha do Equador e ao sul pelo Trópico de Capricórnio. A predominância de climas quentes, com temperaturas médias superiores a 20 °C se explicam por estar situado entre os trópicos e à baixas altitudes do relevo.

Para classificar um clima, devemos considerar a temperatura, a umidade, as massas de ar, a pressão atmosférica, correntes marítimas e ventos, entre muitas outras características.

Segundo Coelho (1990) no Brasil, existem inúmeras classificações climáticas, sendo uma delas feita por Wilhem Köppen. Essa classificação baseia-se fundamentalmente na temperatura, na precipitação e na distribuição de valores de temperatura e precipitação durante as estações do ano. Segundo sua classificação, o Brasil possui 5 tipos de climas:

Equatorial: clima quente e úmido, com pequena estação seca, temperaturas elevadas com médias de 25°C a 27°C e pluviosidade elevada com médias de 1.500 a 2.500 mm/ano;

Tropical: clima quente e úmido, chuvas de verão, temperatura média entre 19°C e 28°C e pluviosidade média inferior a 2000 mm/ano com duas estações bem definidas: o verão (chuvoso) e o inverno (seco);

Semi-árido: clima árido ou semi-árido, quente com chuvas de inverno, médias anuais térmicas superiores a 25°C e pluviosidade média anual inferior a 1000 mm/ano com chuvas irregulares;

Tropical de altitude: clima subtropical ou temperado, verões quentes, chuvas de verão com médias térmicas entre 19°C e 27°C e pluviosidade média de 1500 mm/ano;

Subtropical: clima subtropical ou temperado, chuvas bem distribuídas, sempre úmido com médias térmicas entre 17°C e 19°C e pluviosidade média de 1500 mm/ano;

Na Figura 6 podemos visualizar os climas predominantes no Brasil:

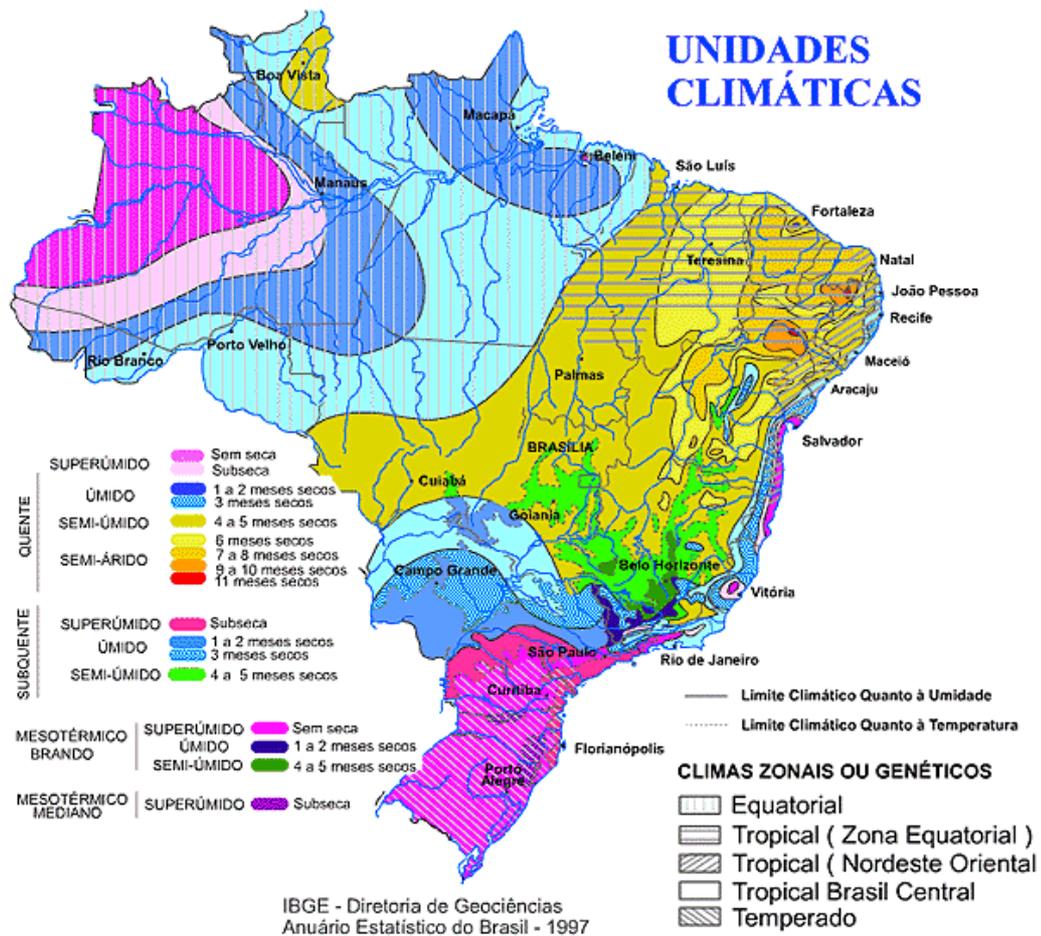


Figura 6: Mapa das unidades climáticas do Brasil

Fonte: IBGE, 1997

2.2.2. Clima Rio Grande do Sul

2.2.2.1. Classificação

O clima no Rio Grande do Sul varia nas diversas regiões conforme a altitude e a aproximação da costa marítima, com estações do ano bem definidas, invernos rigorosos e verões amenos. Devido à sua latitude, apresenta diferenças em relação ao clima do resto do Brasil.

Enquadra-se na zona fundamental temperada e no tipo temperado úmido. Caracteriza-se por apresentar chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura do mês mais quente superior a 22°C, e a do mês mais frio superior a 3°C. A média de temperatura para o estado é de 18°C.

2.2.2.2. Aspectos Pluviométricos:

Das regiões geográficas do Globo, bem regadas por chuvas, o Sul do Brasil é a que apresenta distribuição espacial mais uniforme.

O regime pluviométrico é bastante regular e as chuvas são bem distribuídas durante o ano todo. Com efeito, ao longo de quase todo seu território a altura média da precipitação anual varia de 1.250 a 2.000 mm.

Na região sul do Brasil a quantidade de chuva anual é bastante variável, a presença de tempestades é mais freqüente o que produz elevada intensidade de precipitações. O máximo pluviométrico acontece no inverno e o mínimo no verão em quase toda a região. Com relação à estiagem, é raro o fenômeno de secas prolongadas.

2.2.2.3. Aspectos Térmicos

A temperatura no estado, apesar de sua diversificação espacial, exerce um papel unificador e uniformizador do clima regional. Isso não significa que os valores do comportamento da temperatura sejam semelhantes, mas que não há áreas intra-regionais muito distintas, como se verifica em outras regiões geográficas do Brasil.

Em diversas regiões do estado, as temperaturas podem chegar a extremos de máximo ou mínimo, como a -10°C no inverno e 40°C no verão. O mês mais quente é janeiro, com temperatura entre 25°C e 33°C e o mês mais frio é julho, com temperaturas mínimas que oscilam de $4,0^{\circ}\text{C}$ a $-2,7^{\circ}\text{C}$. As temperaturas mínimas estão entre as mais baixas do inverno do Brasil.

Pode-se perceber através da Figura 7, que no geral as temperaturas ficam entre 16°C e 20°C na maior parte do estado.

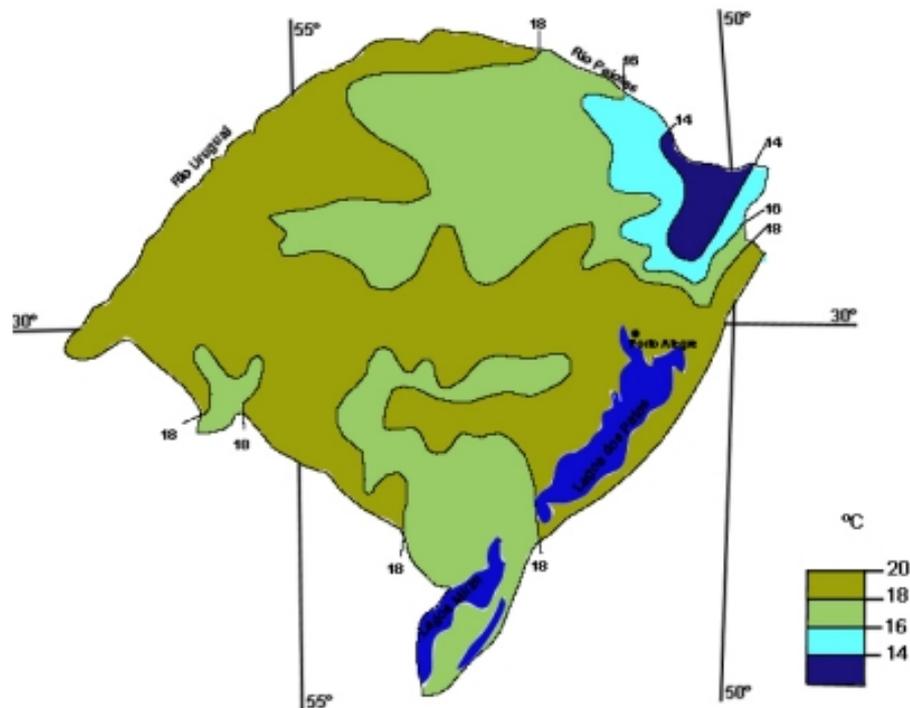


Figura 7: Comportamento da Temperatura

Segundo Motta (1991) as maiores taxas de irradiação solar diária bem como as menores ocorrem no Rio Grande do Sul. Os valores máximos (e mínimos) mostram-se

crecentes (decrecentes), a partir do aumento da amplitude com a latitude causando assim a diferenciação entre as estações do ano, mais acentuadas no Sul e pouco evidentes no Norte.

2.2.2.4 Umidade Relativa:

O valor da umidade no Rio Grande do Sul é muito elevado, pois variam de 75% a 85%. Enquanto no verão e primavera os valores giram em torno de 68% a 85%, no outono e inverno estes se encontram entre 76% e 90%, sendo estável durante as diferentes estações do ano.

2.3. TRANSMISSÃO DE CALOR

Incropera e Witt (2003) trazem uma definição simples, porém geral, em que a transferência de calor consiste na energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura.

Segundo Alvarenga e Máximo (1986) o termo *calor* deve ser usado para designar a energia em *trânsito*, isto é, enquanto ela está sendo transferida de um corpo para outro, em virtude de uma diferença de temperatura. A transferência de calor para um corpo acarreta um aumento na energia de agitação de seus átomos e moléculas, conseqüentemente um aumento da *energia interna* do corpo que provoca uma elevação de sua temperatura. Naturalmente, se um corpo está a uma temperatura mais elevada do que outro, ele pode transferir parte de sua energia interna para esse outro. Esta energia transferida é o calor que está passando de um corpo a outro, assim percebe-se que calor é energia e temperatura não.

Segundo Rodolfo e Balbo (2000) os gradientes térmicos, apesar de não serem considerados em nenhum método de projeto adotado no País, trazem grande influência no cômputo das tensões em pavimentos de concreto. A ação dos gradientes pode fazer as tensões atingirem magnitudes duas vezes maiores do que aquelas encontradas quando da ação isolada de cargas rodoviárias.

Wolf *et. al* (1995) faz uma ilustração das formas de energias climáticas que podem atuar num pavimento. Segundo o autor as principais fontes de energia que atuam sobre a

superfície e as camadas de um pavimento, podem ser ilustradas na Figura 8. Através dela percebe-se os efeitos do sol na forma de radiação direta e de radiação difusa. A radiação da superfície do pavimento, a radiação do ar, a temperatura e a velocidade do ar também influenciam na quantidade de energia que é transferida para a superfície do pavimento. A lei de Newton de transferência de calor por convecção se aplica a esse processo. A transferência de calor ao longo das camadas do pavimento pode ser explicada pela lei de Fourier.

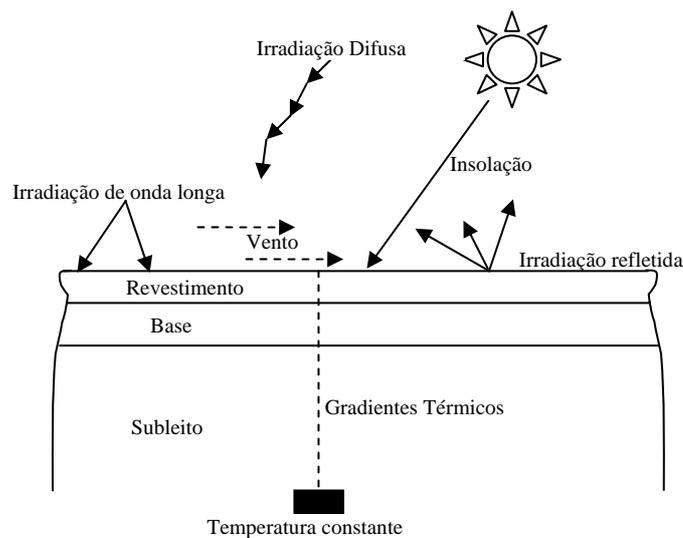


Figura 8: Tipos de energia térmica atuantes em um pavimento com duas camadas

A transmissão de calor pode ocorrer de três maneiras: *condução*, *convecção* e *irradiação*.

2.3.1. Transmissão de Calor por Condução

Segundo Incropera e Witt (2003) a condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia, em um meio, devido às interações entre elas, ou seja, quando um campo térmico da origem a gradientes no interior de um material.

A condução é explicada pela teoria cinética: “As moléculas do corpo mais quente têm maior energia cinética. Assim, através de choques entre as moléculas, a energia se transfere do corpo mais quente para o mais frio” (CHIQUETTO e PARADA, 1992).

Um gradiente de temperatura, dentro de uma substância homogênea, produz movimento da energia de um ponto para outro, cuja *taxa de transferência* é definida pela conhecida *lei de Fourier*. Em um sólido, como por exemplo, uma camada de concreto asfáltico, essa lei é expressa pela equação:

$$q = -ka \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.1)$$

onde:

$\frac{\partial T}{\partial n}$ gradiente de temperatura na direção normal à área;

a área;

k constante de proporcionalidade ou condutividade térmica.

O valor da condutividade térmica é determinada experimentalmente no meio considerado e depende de outras propriedades, como temperatura e pressão. O sinal negativo é explicado pela segunda lei da termodinâmica, em que a transferência de calor é resultante de um gradiente térmico deve ser efetuada de uma região mais quente para outra mais fria.

2.3.2. Transmissão de Calor por Convecção

O modo de transferência de calor por convecção é composto por dois mecanismos: a transferência de calor devido ao movimento aleatório molecular e pelo movimento global do fluido. Assim, a transferência de calor por convecção ocorre entre fluídos em movimento e uma superfície quando os dois se encontram a diferentes temperaturas (INCROPERA e WITT, 2003).

Descreve-se transferência de calor por convecção como sendo a transferência de energia que ocorre no interior de um fluído devido à combinação dos efeitos de condução e do movimento global do fluído. A convecção do calor foi estudada por Newton, que estabeleceu uma lei básica para descrevê-la, afirmando que o fluxo de calor transportado por convecção é diretamente proporcional à diferença de temperaturas entre o sólido e o fluído longe da parede.

As trocas de calor por convecção podem ser aplicadas nos pavimentos, na situação de trocas de calor entre o ar e a superfície do pavimento. A equação desenvolvida por Newton, para essa situação, pode ser expressa pela da equação (2.2):

$$\phi = \bar{h} a (T_a - T_{\text{sup}}) \quad (2.2)$$

onde:

- ϕ transferência de calor;
- \bar{h} coeficiente de película;
- a área de contato;
- T_a temperatura do ar;
- T_{sup} temperatura da superfície.

Tramontini (2007) mostra que a influência do coeficiente de convecção do ar é bem maior do que o calor específico e a condutividade térmica na determinação da temperatura nos pavimentos, e a influência do calor específico é quase a mesma da condutividade térmica.

2.3.3. Transmissão de Calor por Irradiação

A radiação térmica é emitida por todos os corpos que possuem temperatura maior que o zero absoluto. Isso não significa, entretanto, que a quantidade de radiação térmica emitida seja sempre significativa. Nos processos de transporte de calor, depende da quantidade de calor a ser transportada simultaneamente pelos outros mecanismos.

Segundo Roma (2003) a troca de calor por radiação é um fenômeno de transporte, ligado às ondas eletromagnéticas, o que explica o fato de sua transmissão através do vácuo ser mais eficiente do que através de fluidos.

A evidência experimental indica que a transferência de calor radiante é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, enquanto a condução e a convecção são proporcionais à diferença de temperatura linear. A lei fundamental de *Stefan-Boltzmann* pode ser expressa por:

$$\Phi = \sigma T_{ab}^4 \quad (2.3)$$

onde:

T_{ab} temperatura absoluta em graus Kelvin (K) ;

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

A constante σ é independente do material e dado pela lei de Planck. Essa equação é dada para o emissor ideal, ou seja, aquele que transmite energia radiante. Todas as demais superfícies emitem menos e a emissão térmica de muitas superfícies pode ser representada por:

$$q = \varepsilon \sigma T_{ab}^4 \quad (2.4)$$

onde:

ε emissividade da superfície, assume valor de zero a um;

T_{ab}^4 temperatura, a constante;

σ constante;

Nem toda a radiação, que atua sobre uma superfície é absorvida, parte dela é refletida. O fator de absorção é usado para caracterizar absorção de energia. Assim, se a absorção de uma superfície for 0,85 serão absorvidos 85% da energia incidente.

2.4. FLUXO DE CALOR

A lei básica que relaciona o fluxo de calor e o gradiente de temperatura foi obtida com base em dados experimentais atribuídos a Joseph Fourier (1768 – 1830) na época da revolução industrial na Europa que também inventou a máquina a vapor.

A lei de Fourier é expressa pela seguinte equação:

$$\vec{q}(\vec{r}, t) = -k \nabla T(\vec{x}, t) \quad (2.5)$$

onde:

\vec{q} fluxo de calor;

T direção;

∇ gradiente de temperatura;

(\vec{x}) vetor posição;

k coeficiente de condutividade térmica.

Ao realizar o balanço de energia que passa em um sólido homogêneo e isotrópico, tem-se o modelo esquemático da Figura 9:

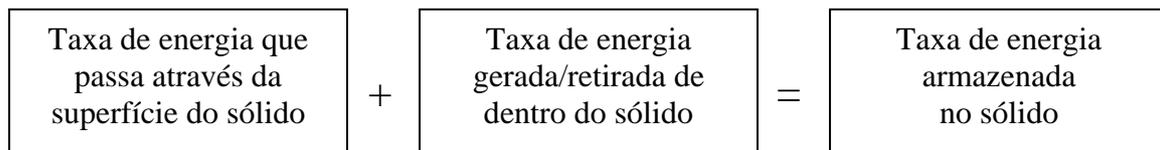


Figura 9: Modelo de taxa de energia

A taxa de energia que passa pela superfície do sólido é a soma do fluxo de calor que passa por toda superfície e é dada por:

$$-\int_A \nabla q(\vec{x}, t) dA \quad (2.6)$$

A taxa de energia que é gerada no sólido é dada pelo somatório das fontes de calor no espaço e no tempo.

$$\int_V q(\vec{x}, t) dV \quad (2.7)$$

onde:

q fonte de calor;

C_p calor específico;

ρ massa específica;

$\frac{\partial T}{\partial t}$ variação da temperatura em função do tempo.

A taxa de energia armazenada no sólido depende da capacidade térmica do material (C_p), da massa específica (ρ) e da variação da temperatura em função do tempo $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$. Se o material não sofre mudança de fase, não há o efeito de energia latente, e a energia pode ser dada por

$$\int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (2.8)$$

Substituindo as equações (2.6), (2.7) e (2.8) no balanço de energia e considerando V muito pequeno para desconsiderar as integrais, tem-se:

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}(\mathbf{x}, t) + g(\mathbf{x}, t) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

Substituindo a Lei de Fourier em (2.1) tem-se:

$$\nabla \cdot [k \nabla T(\mathbf{x}, t)] + g(\mathbf{x}, t) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

Dividindo a equação (2.10), pelo coeficiente de condutividade térmica (k), sendo este constante, e fazendo $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$, onde α é o coeficiente de difusividade térmica, tem-se:

$$\nabla^2 T(\mathbf{x}, t) + \frac{1}{k} g(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

Resolvendo a equação (2.11) para o caso unidimensional, conclui-se que a equação (2.12), é a Equação Diferencial da Transferência de Calor por Condução:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{k} g(\vec{x}, t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.12)$$

Se a fonte de calor $g(\vec{x}, t) = 0$ tem-se o problema homogêneo de condução de calor, que se expressa por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}; t > 0 \quad (2.13)$$

Em outras palavras, a equação do calor (2.13) estabelece que *em qualquer ponto do meio, a taxa de energia líquida transferida por condução para o interior de um volume unitário somado à taxa volumétrica de geração de energia térmica deve ser igual à taxa de variação de energia térmica armazenada no interior desse volume.*

2.5. VARIÁVEIS INTERVENIENTES NO DESEMPENHO DE MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO

Na Pavimentação, materiais e processos construtivos estão sendo substituídos por novos materiais ligantes asfálticos e combinações que apresentem menores custos construtivos e operacionais e maior qualidade e desempenho das rodovias.

Pode-se visualizar na Figura 10 a estrutura das misturas asfálticas com seus principais componentes. A composição da mistura e as propriedades são variáveis que podem interferir no bom desempenho dos pavimentos.

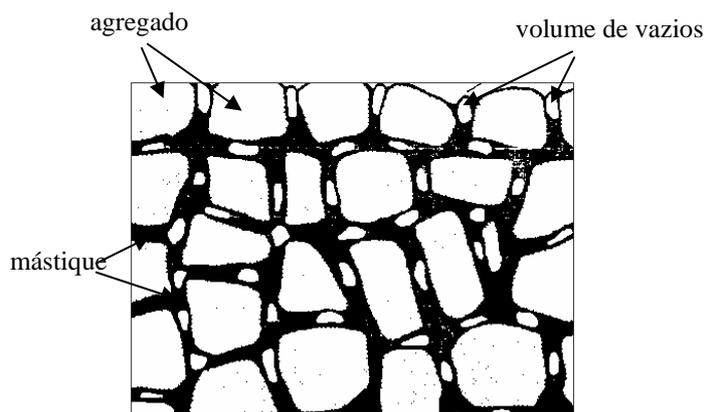


Figura 10: Ilustração da mistura asfáltica

2.5.1. Ligante Asfáltico

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas sobre a influência dos fatores ambientais e dos materiais utilizados na construção de pavimentos.

Ao mesmo tempo em que ocorre o crescimento da frota de veículos, cresce também o número de pneus descartados. Este tipo de resíduo é bastante problemático do ponto de vista ambiental, o que justifica a busca de soluções para a sua disposição final. Os objetivos da adição de borracha de pneus em ligantes asfálticos são minimizar o problema da disposição de pneus usados e melhorar o desempenho dos pavimentos mediante o melhoramento das propriedades dos materiais betuminosos, principalmente aumento da rigidez a elevadas temperaturas, aumento da flexibilidade, redução do desgaste e envelhecimento e aumento da impermeabilização proporcionada pelos revestimentos asfálticos.

Benrucci *et al.* (2002) afirma que a borracha de pneu moída é mais uma alternativa interessante para os problemas brasileiros pois é uma mistura de alta resistência à deformação permanente, trabalhando com alta flexibilidade e menor rigidez. Pode ser aplicada em diversos tipos de pavimentos, inclusive com deflexões mais elevadas e retardando a reflexão de trincas em soluções de restauração.

Lalwani (1997) afirma que o ligante modificado por borracha de pneu traz alterações nas propriedades de viscosidade, viscoelasticidade, elasticidade, suscetibilidade térmica, ponto de amolecimento, dureza, resiliência, resistência e durabilidade.

Segundo Specht (2004) a adição de 12% a 18% de borracha ao ligante, leva à produção de misturas com maior resistência à fadiga e à deformações permanentes e maior

durabilidade. A incorporação de borracha, através do processo seco, melhora as características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico, devido a menor sensibilidade às variações de temperatura.

No Brasil em muitos pavimentos, o derivado de petróleo usado como ligante dos agregados minerais e é denominado como “cimento asfáltico de petróleo”, o termo “asfalto” designa popularmente a mistura do cimento asfáltico com os agregados (LEITE, 1999).

A utilização da borracha de pneu se dá de duas maneiras: pelo “processo seco”, quando as partículas de borracha triturada substituem parte dos agregados na mistura e, após a adição do ligante, formam o *concreto asfáltico modificado com adição de borracha*; e pelo “processo úmido”, onde a borracha de pneus moída é incorporada ao cimento asfáltico antes da adição do agregado, formando o *ligante asfalto-borracha*.

A recuperação elástica do CAP 20 é muito pequena, comparada aos ligantes modificados por borracha. Após o ensaio de envelhecimento de ligantes, a recuperação elástica dos asfaltos-borracha mantém valores semelhantes aos anteriores do envelhecimento, e em outros, aumentou cerca de 17% (CORDEIRO, 2005).

Ensaio realizados por Núñez (2003) no Setor de Misturas Asfálticas do Laboratório de Pavimentação - LAPAV (UFRGS) apontam para o ponto de amolecimento do CAP 20, valores compreendidos entre 49°C e 51°C. Quando o ligante é submetido a efeito de calor e ar, o ponto de amolecimento aumenta para aproximadamente 53°C. Segundo o autor, esses valores são superados por temperaturas registradas no interior do revestimento em concreto asfáltico (máxima de 57°C), o que parece sugerir que este ligante não é adequado para situações em que o revestimento asfáltico é solicitado por tráfego intenso e canalizado de cargas aplicadas a baixas velocidades, como é o caso de corredores de ônibus, efeito agravado notavelmente por elevadas temperaturas.

O uso de ligantes modificados por polímeros é justificado por algumas razões: aumento da resistência à deformação permanente, em virtude da maior viscosidade sob elevadas temperaturas, aumento da vida útil do revestimento e redução da necessidade de inibidores de escorrimiento, embora estes ainda sejam necessários para algumas misturas asfálticas.

Segundo Bringuel *et al.* (2005) o uso de polímero melhora o comportamento elástico do asfalto e contribui para a sua resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga. Auxilia na melhor adesão entre agregados e asfalto, melhora a resistência à oxidação além de (MEMON E FRANCO, 2005) ocorrer simultaneamente a melhoria das propriedades reológicas, à altas e baixas temperaturas, à durabilidade e à recuperação elástica do polímero.

Tayebali et. al (1998) indicam que o aumento da quantidade de fíler nas misturas asfálticas não compromete o desempenho em termos de deformação permanente. Ao contrário, resultados do estudo mostram que o aumento da quantidade de alguns tipos de fíler, dentro de certos limites, tem efeito benéfico em termos de deformação permanente, por aumentar a rigidez do ligante asfáltico.

Neto Filho *et al.* (2004) realizou ensaio de deformação permanente para 4 tipos de misturas asfálticas caracterizadas na Figura 11:

Nome	Granulometria	Tipo de ligante
CAUQ-AC	Faixa C (DNER)	CAP 20
SMA-AC	SMA DMN = 12 mm (AASHTO)	CAP 20
SMA-AP	SMA DMN = 12 mm (AASHTO)	Asfalto modificado por polímero
SMA-AB	SMA DMN = 12 mm (AASHTO)	Asfalto-borracha

Figura 11: Nome e composição das misturas asfálticas avaliadas

Analisando os resultados, apresentados na Figura 12, percebe-se que as três misturas SMA apresentaram coeficiente angular muito próximo, embora a mistura com asfalto modificado por polímero tenha menor deformação a 30.000 ciclos, resultado já esperado devido à ação dos modificadores no desempenho do concreto asfáltico. A mistura SMA com asfalto borracha teve um desempenho igual ao da mistura com polímero até os 1.000 ciclos da simulação e, mesmo aos 30.000 ciclos, a diferença entre ambas foi de apenas 0,6 % de deformação (0,3 mm de afundamento). Diferença de desempenho tão pequena motiva o uso do ligante asfalto-borracha para misturas do tipo SMA, pois além do custo inferior ao do ligante modificado por polímero, a utilização desse tipo de ligante em obras de pavimentação é uma alternativa para a disposição ambientalmente adequada de pneus descartados.

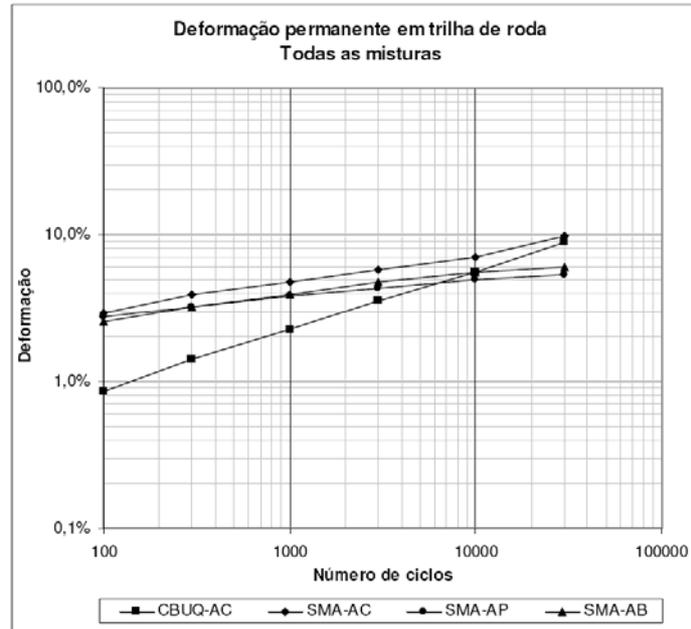


Figura 12: Deformação permanente em trilha de roda para todas as misturas ensaiadas

2.5.2. Volume de Vazios

Segundo Bouldin (1994) o volume de vazios tem um efeito significativo na resistência a formação de buracos no material de pavimentação. O desempenho de um ligante pode ser comprometido quando a mistura não for bem compactada.

As variáveis de mistura, geralmente determinadas através de metodologia de dosagem, são dependentes da origem do agregado e de sua graduação, do ligante e do volume de vazios. Cada um desses componentes pode afetar, significativamente, as propriedades da mistura e seu desempenho em campo. A proposta da dosagem é alcançar um balanço nas propriedades da mistura para uma aplicação específica (MONISMITH *et.al*, 1989).

O conhecimento das propriedades volumétricas são de fundamental importância, pois condicionam o desempenho de uma mistura em pista (HARVEY, 1992; AI, 1998; FHWA, 2001). Serão apresentados nos itens subseqüentes a influência da adição de borracha nas propriedades volumétricas do concreto asfáltico.

O Volume de Vazios (V) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico; sempre são necessários vazios de ar dentro da mistura compactada para permitir a expansão térmica dos ligantes e suportar a leve compactação causada pelo tráfego. Volumes de vazios muito baixos (<3%) comprometem o desempenho das misturas quanto ao ATR

(Afundamento em Trilha de Rodas) e muito altos (<8%) comprometem a durabilidade (AI, 1998).

2.5.3. Propriedades Térmicas

As propriedades físicas que determinam a utilização de inúmeros materiais são aquelas propriedades diretamente relacionadas com mudanças de temperatura. Essas propriedades são importantes para qualquer material, independentemente do seu uso.

Do ponto de vista dos cálculos térmicos, as três propriedades mais importantes são o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica.

Essas três propriedades relacionam-se entre si pela equação:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.14)$$

onde:

- α difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$);
- k condutividade térmica ($Wm^{-1} oC^{-1}$);
- ρ densidade ou massa específica (Kgm^{-3});
- C_p calor específico ($Jkg^{-1} oC^{-1}$).

Nesta equação, o denominador indica a capacidade do produto absorver calor, ao passo que o numerador indica a capacidade do produto transferir calor através dele.

Tramontini (2007) comparou a temperatura na superfície do pavimento aumentando o calor específico do material, visualizado na Figura 13.

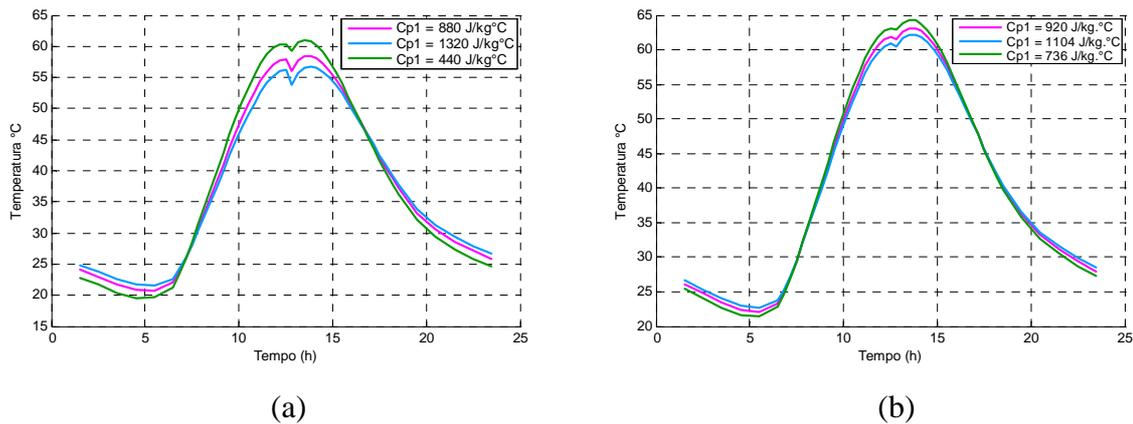


Figura 13: Aumento de $\pm 20\%$ no calor específico do material (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível.

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

A condutividade térmica é uma propriedade termofísica que descreve a taxa do fluxo de calor através do material, sob influência de um gradiente térmico. É importante para o estudo da transferência de calor, como por exemplo, a transferência de calor em camadas de pavimentos.

Segundo Côté e Konrad (2006) a condutividade térmica dos materiais granulares das camadas asfálticas é uma importante propriedade para as análises térmicas e estruturais dos pavimentos.

Segundo Mohsenin (1980) valores numéricos da condutividade térmica de materiais sólidos, granulares e porosos podem variar de acordo com a composição química, conteúdo de matéria fluida, estrutura física, estado, densidade, temperatura e teor de umidade do material.

Quando se compara as temperaturas de sol - ar e coeficiente de transferência de calor por convecção com as temperaturas obtidas variando o calor específico e condutividade térmica do material verifica-se que o primeiro caso tem maior influência na temperatura máxima do pavimento. Isso quer dizer que a variação da temperatura máxima é mais sensível à mudança da temperatura de sol - ar e do coeficiente de transferência de calor por convecção

em relação ao calor específico e à condutividade térmica. A variação do calor específico e da condutividade térmica do revestimento quanto à temperatura máxima do pavimento mantém o mesmo nível de influência (TRAMONTINI, 2007).

Tramontini (2007) realizou um comparativo entre a temperatura na superfície de pavimentos e a condutividade térmica, concluindo que a condutividade térmica não traz grandes influências nas temperaturas máximas, que pode ser visualizado na Figura 14:

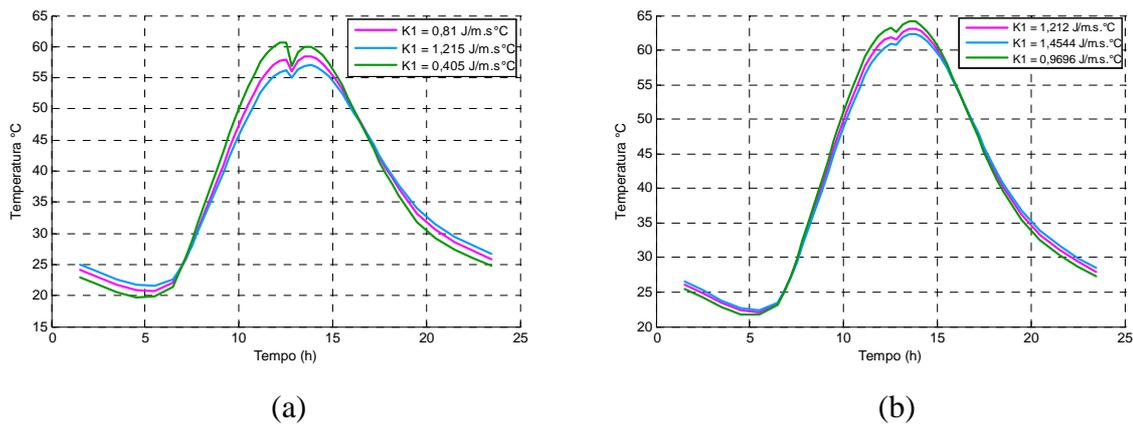


Figura 14: Variando da condutividade térmica do material em $\pm 20\%$ (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível

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

A difusividade térmica expressa a variação da temperatura do material quando submetido a um processo de resfriamento ou aquecimento.

O valor da difusividade térmica do material é afetado pela umidade, temperatura, porosidade e composição.

Na Tabela 1, apresentam-se valores do calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica, para diferentes tipos de materiais de pavimentação.

Tabela 1: Valores encontrados na literatura a respeito das propriedades de materiais asfálticos

<i>Autor</i>	<i>Materiais</i>	ρ (kgm^{-3})	C_p ($Jkg^{-1}^{\circ}C^{-1}$)	k ($Jm^{-1}s^{-1}^{\circ}C^{-1}$)	α (m^2s^{-1}) $\times 10^{-7}$
Barber (1957) ⁽¹⁾	MA		920		
Willianson (1976) ⁽¹⁾	CCP	2320	1000	0,6 a 4	2,58
Hogbin (1967) ⁽¹⁾	MA	2240	830 a 916	1,212	5,88
Incropera e Witt (2003)	Asfalto	2115	920	0,062	0,31 ⁽²⁾
	Borracha macia	1100	2010	0,13	0,58 ⁽²⁾
	Borracha dura	1190	2010	0,16	0,66 ⁽²⁾
	Concreto c/ brita	2300	880	1,4	6,91 ⁽²⁾
Kreith (1992)	Asfalto	2120	920,92	-----	-----
	Borracha	920 a 1230	1423,24	-----	-----
	Concreto	1900 a 2300	879	-----	-----
ABNT (1972)	Asfalto	1600	920	0,43	2,92 ⁽²⁾
	Asfalto	2300	920	1,15	5,43 ⁽²⁾
	Betume asfáltico	1000	1430	0,17	1,18 ⁽²⁾
	Concreto normal	2200 a 2400	1000	1,75	7,95 a 7,29 ⁽²⁾
	Brita	1000 a 1500	800	0,70	8,75 a 5,38 ⁽²⁾
Núñez (2003)	Material Asfáltico	2.442	-----	-----	-----

Nota: ⁽¹⁾ extraído de Medina e Motta (2005)

⁽²⁾ dados calculados a partir dos resultados do autor pela equação 4.16

3. METODOLOGIA

Para se proceder a análise racional de distribuição de temperatura em estruturas de pavimentos se faz necessário o conhecimento das propriedades térmicas dos materiais envolvidos, sendo essas determinadas nessa pesquisa.

Foram determinadas a massa específica e o calor específico, através de procedimentos exclusivamente experimentais, a condutividade térmica através de um algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990) e a difusividade térmica por três processos: Método Experimental, Equação Analítica de Campbell e pelo Método do Problema Inverso. O Problema Direto foi resolvido numericamente pelo Método das Diferenças Finitas, usando o esquema explícito de avanços no tempo.

Foram realizados experimentos de aquecimento de amostras de pavimentos rígidos e flexíveis e medição da temperatura em 4 pontos distintos, para a aquisição da variação da temperatura em função do tempo.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização desta pesquisa, foram preparadas amostras de concreto asfáltico, com diferentes tipos de ligantes e volume de vazios, e amostras de concreto de cimento Portland, visualizadas na Figura 15. A preparação e caracterização das amostras foram realizadas no *Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ*.



(a)



(b)

Figura 15: Estrutura dos corpos-de-prova

(a) concreto asfáltico

(b) concreto de cimento

As amostras possuem formato cilíndrico com 10 cm de diâmetro e aproximadamente 6,35 cm de altura.

A mistura asfáltica, empregada na pavimentação, é geralmente constituída de três componentes principais: o agregado, o enchimento ou fíler e o cimento asfáltico, que é usado como ligante dos agregados minerais.

Nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, apresenta-se as características das amostras utilizadas. O modificador utilizado no AP foi o SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) e no AB 15% de borracha moída de pneu.

Tabela 2: Características das amostras de concreto asfáltico com ligante CAP

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>CAP</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultado</i>
<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	NBR 6560	46 min.	48,6
<i>Penetração (0,1 mm)</i>	NBR 6576	50 – 70	51
<i>Visc. Brookfield 135 °C</i>	MB 517	274 min.	317
<i>Visc. Brookfield 150 °C</i>	MB 517	112 min.	164
<i>Visc. Brookfield 177 °C</i>	MB 517	57 a 285	69
<i>Ductibilidade 25 °C</i>	NBR 6293	60 min.	>150
<i>Massa Específica (gcm⁻³)²</i>	DNER - M 16/64	---	1,009
<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>	NBR 11341	235 min.	>296

Tabela 3: Características das amostras de concreto asfáltico com ligante AP

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>AP</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultado</i>
<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	NBR 6560	60 – 85	66
<i>Penetração (0,1 mm)</i>	NBR 6576	45 -80	70
<i>Visc. Brookfield 135 °C</i>	MB 517	850 – 3000	1115
<i>Visc. Brookfield 150 °C</i>	MB 517	2000 máx.	543
<i>Visc. Brookfield 177 °C</i>	MB 517	1000 máx.	266
<i>Ductibilidade 25 °C</i>	NBR 6293	85 min.	93
<i>Massa Específica(gcm⁻³)²</i>	DNER - M 16/64	---	1,007
<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>	NBR 11341	235 min.	>35

Tabela 4: Características das amostras de concreto asfáltico com ligante AB

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>AB</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultado</i>
<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	<i>NBR 6560</i>	<i>50 – 70</i>	<i>60</i>
<i>Penetração (0,1mm)</i>	<i>NBR 6576</i>	<i>25 – 75</i>	<i>54</i>
<i>Visc. Saybolt-Furol @175 °C (s)</i>	<i>MB 517</i>	<i>---</i>	<i>---</i>

<i>Recuperação Elástica</i>	---	40 – 70	63
<i>Ductilidade 25°C</i>	<i>NBR 6293</i>	---	---
<i>Massa Específica (gcm⁻³)²</i>	<i>DNER –M 16/64</i>	---	1,030
<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>	<i>NBR 11341</i>	235	265

Tabela 5: Característica das amostras de CCP

Traço de concreto (para 1m³)

<i>Cimento</i>	<i>321,72 kg</i>
<i>Areia</i>	<i>965,16 kg</i>
<i>Brita 1</i>	<i>965,16 kg</i>

Nas Tabelas 6, 7 e 8 tem-se a caracterização das amostras de concreto asfáltico, quanto ao tipo e porcentagem de ligante, volume de vazios e as dimensões de cada amostras.

Tabela 6: Caracterização das amostras de concreto asfáltico com ligante CAP

<i>Nº CP</i>	<i>Ligante (%)</i>	<i>Altura (cm)</i>	<i>Diâmetro (cm)</i>	<i>Volume de Vazios (%)</i>
CAP 1	5,00	6,04	10,20	6,64
CAP 2	5,00	6,15	10,20	6,58
CAP 3	5,00	6,09	10,20	6,86
CAP 4	5,50	6,08	10,20	5,16
CAP 5	5,50	6,09	10,20	5,13
CAP 6	5,50	6,09	10,20	4,89
CAP 7	6,00	6,09	10,20	3,50
CAP 8	6,00	6,07	10,20	3,39
CAP 9	6,00	6,02	10,20	4,03
CAP 10	6,50	6,03	10,20	2,42
CAP 11	6,50	6,10	10,20	1,96
CAP 12	6,50	6,03	10,20	2,05
CAP 13	7,00	6,08	10,20	1,55
CAP 14	7,00	6,13	10,20	1,79
CAP 15	7,00	6,14	10,20	1,87

Tabela 7: Caracterização das amostras de concreto asfáltico com ligante AP

<i>Nº CP</i>	<i>Ligante (%)</i>	<i>Altura (cm)</i>	<i>Diâmetro (cm)</i>	<i>Volume de Vazios (%)</i>
AP 1	5,00	6,04	10,20	5,14
AP 2	5,00	6,15	10,20	4,92
AP 3	5,00	6,09	10,20	4,95
AP 4	5,50	6,08	10,20	3,79
AP 5	5,50	6,09	10,20	3,81
AP 6	5,50	6,09	10,20	4,12
AP 7	6,00	6,09	10,20	2,74
AP 8	6,00	6,07	10,20	2,29
AP 9	6,00	6,02	10,20	2,26
AP 10	6,50	6,03	10,20	1,78
AP 11	6,50	6,10	10,20	1,77
AP 12	6,50	6,03	10,20	1,64
AP 13	7,00	6,08	10,20	1,52
AP 14	7,00	6,13	10,20	1,56
AP 15	7,00	6,14	10,20	1,83

Tabela 8: Caracterização das amostras de concreto asfáltico com ligante AB

<i>Nº CP</i>	<i>Ligante (%)</i>	<i>Altura (cm)</i>	<i>Diâmetro (cm)</i>	<i>Volume de Vazios(%)</i>
AB 1	5,50	6,25	10,20	6,43
AB 2	5,50	6,29	10,20	6,30
AB 3	5,50	6,31	10,20	7,00
AB 4	6,00	6,24	10,20	5,13
AB 5	6,00	6,27	10,20	5,54
AB 6	6,00	6,28	10,20	5,38
AB 7	6,50	6,25	10,20	4,60
AB 8	6,50	6,27	10,20	4,35
AB 9	6,50	6,28	10,20	4,38
AB 10	7,00	6,30	10,20	3,34
AB 11	7,00	6,28	10,20	3,07
AB 12	7,00	6,29	10,20	3,36
AB 13	7,50	6,32	10,20	2,79
AB 14	7,50	6,34	10,20	2,54
AB 15	7,50	6,28	10,20	2,47

A caracterização das amostras do concreto de cimento Portland encontra-se na Tabela 9. O traço do concreto utilizado foi 1:3:3 (cimento: areia: brita) e os agregados foram os mesmos utilizados no concreto asfáltico; o cimento foi o CPII F32 e tempo de cura foi sempre superior aos 28 dias.

Tabela 9: Caracterização das amostras de CCP

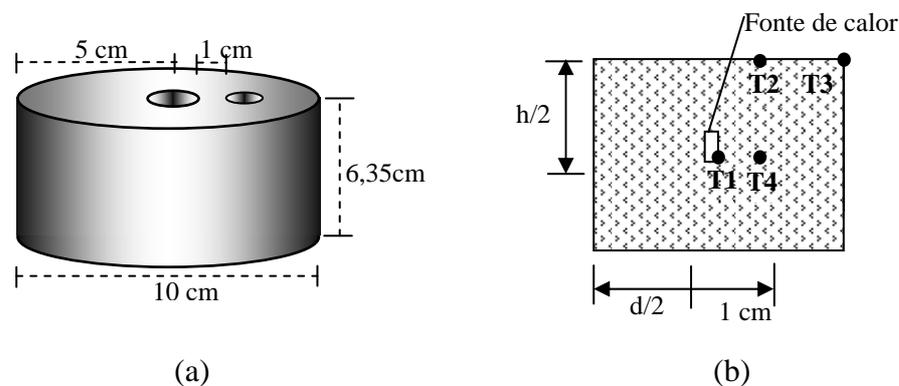
<i>Nº CP</i>	<i>Altura (cm)</i>	<i>Diâmetro (cm)</i>
CCP 1	6,01	10,20
CCP 2	6,13	10,20
CCP 3	6,21	10,20

3.2. DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E EXPERIMENTOS

A parte experimental da pesquisa foi realizada no *Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática* da UNIJUÍ. Foi realizado aquecimento e monitoramento das temperaturas em função do tempo, nos corpos-de-prova.

O aquecimento das amostras foi necessário para viabilizar os cálculos do calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica. Para a obtenção das temperaturas em função do tempo, inseriu-se uma resistência elétrica no centro da amostra e realizou-se o monitoramento da temperatura em 4 pontos durante o período de 700 segundos.

Foram feitos dois furos nas amostras: um no centro, onde foi inserido uma resistência para o aquecimento, e um furo a 1 cm do centro, onde foi inserido um termopar para a coleta de temperatura como mostra a Figura 16 (a). O espaço em aberto nos furos, depois de inserido o termopar, foi preenchido com sobra do próprio material. A disposição da fonte de calor e dos termopares (T1, T2, T3 E T4) podem ser visualizados na Figura 16 (b).

**Figura 16:** Esquema ilustrativo dos corpos-de-prova

(a) estrutura das amostras

(b) distribuição dos termopares e fonte de calor

As medidas de temperaturas foram obtidas através de termopares modelo MTK – Tipo K-Universal, com sensores de diâmetro de $\pm 1mm$ sendo arquivadas eletronicamente através de uma placa de aquisição de dados analógicos/digital (placa A/D) do tipo *LR 7018*, 16 bits, 8 pontos com conversor 485 para 232 e outra placa tipo *LR 7520*, 8 canais (permite o uso de até 8 sensores) de leitura de dados que realiza até 10 leituras por segundo, um computador pessoal processador *PENTIUM 266*, 32MB de memória RAM e uma resistência elétrica aquecida por uma Fonte Estabilizada, com voltagem máxima de 20 V, cedida pelo *Laboratório de Física* da UNIJUÍ, visualizada na Figura 17.



Figura 17: Fonte Estabilizada

Para a calibração dos termopares foi utilizado um termômetro calibrado pelo Laboratório da Pontificada Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC - RS).

A Figura 18 ilustra a montagem do equipamento utilizado para se obter a variação da temperatura em função do tempo. A resistência elétrica foi aquecida pela fonte estabilizada a uma voltagem de 3,0 volts e a aquisição dos dados é feita eletronicamente pelo sistema termopares-placas A/D e computador.

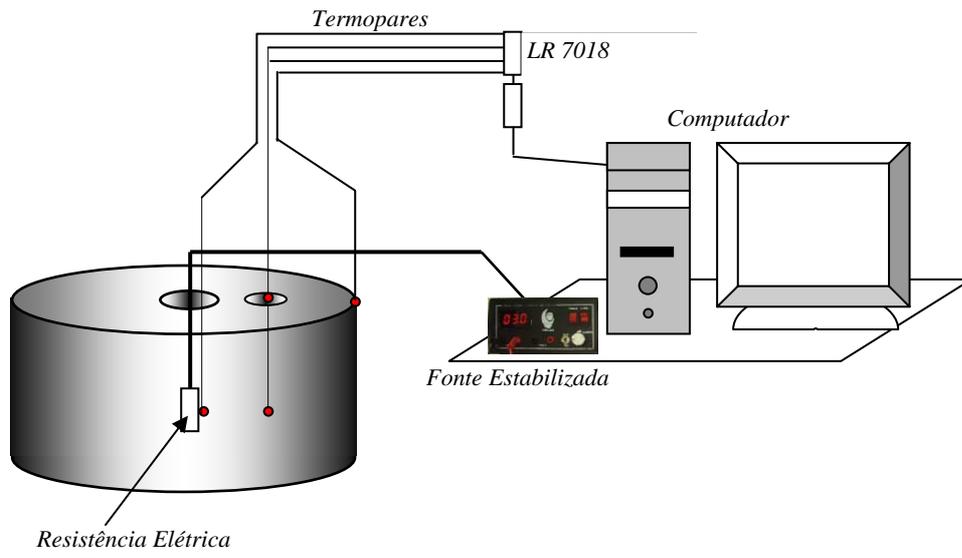


Figura 18: Esquema ilustrativo da montagem dos equipamentos

4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS

4.1. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Para a realização dos cálculos da condutividade térmica utilizou-se um algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990) obtido através de simplificações da resolução analítica da equação de difusão do calor para um meio semi-infinito, na direção r , com uma fonte de calor em $r = 0$, dada pela equação

$$\Delta T = \frac{q^*}{4\pi kt} \exp\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \quad (4.1)$$

onde:

ΔT variação de temperatura medida pelo sensor ($^{\circ}C$);

q^* calor total gerado pela fonte em um intervalo de tempo (Wsm^{-1});

k condutividade ($Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$);

α difusividade térmica (m^2s^{-1});

r distância da fonte ao ponto onde foram realizadas as medidas de temperatura (m);

t intervalo de tempo (s).

Shiozawa e Campbell (1990) analisaram a solução analítica obtida para pontos muito próximos da fonte (no caso do sensor, para $r < 1mm$) e constaram que, nesse caso, o expoente da função exponencial presente na solução, tende a zero anulando o termo que contém a difusividade térmica, como apresenta a equação (4.2).

$$\frac{r_1^2}{4\alpha t} \ll 1 \quad (4.2)$$

Nessas condições, a equação que relaciona a variação de temperatura com o tempo fica dependente somente da condutividade térmica e tem a forma

$$T - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \ln(t + t_0), \text{ para } t > t_0 \quad (4.3)$$

onde:

- T temperatura final ($^{\circ}C$);
- T_0 temperatura inicial ($^{\circ}C$);
- q calor gerado pela fonte por unidade de tempo e comprimento (Wm^{-1});
- k condutividade térmica ($Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$);
- t tempo presente (adimensional);
- t_0 tempo inicial (adimensional).

A observação $t > t_0$ em (4.3) é um artifício que desconsidera os instantes iniciais, para evitar logaritmos negativos, o que resultaria $k < 0$. O cálculo da condutividade térmica é feito considerando que a variação de temperatura é uma função linear de $x(t) = \ln(t + t_0)$, como pode-se observar em (4.4). Os parâmetros S e b de (4.4) são obtidos por ajuste linear, através do método dos mínimos quadrados, com base nos dados experimentais.

$$T(t) = Sx(t) + b \quad (4.4)$$

onde:

- S coeficiente angular;
- b coeficiente linear;

Os coeficientes angular e linear são obtidos pelo ajuste.

Comparando as equações (4.2) e (4.3), tem-se uma expressão para S , que resolvida para k , dá a expressão para o cálculo da condutividade térmica.

$$k = \frac{q}{4\pi S} \quad (4.5)$$

4.2. DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A determinação da difusividade térmica foi realizada através de três métodos distintos: processo experimental, algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990) e problema inverso.

4.2.1. Método Experimental

A difusividade térmica pode ser calculada a partir da sua definição, através da medição da condutividade térmica, da massa específica e do calor específico, por métodos experimentais.

4.2.1.1. Determinação da Massa Específica

Quando se calcula a massa específica primeiramente precisa-se determinar a massa e o volume das amostras.

Para determinar a massa das amostras foi utilizada uma balança analítica. Foram medidos o diâmetro e a altura utilizando um paquímetro e uma régua. A equação (4.6) foi utilizada para o cálculo do volume das i amostras

$$V_i = \frac{\pi d_i^2 h_i}{4} \quad (4.6)$$

onde:

V_i volume (m^3);

d_i diâmetro (m);

h_i altura (m).

A massa específica foi calculada usando a equação

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad (4.7)$$

onde:

ρ_i massa específica (kgm^{-3});

m massa (m);

V volume (m^3).

Os valores encontrados da massa específica para as amostras analisadas são apresentados pela Tabela 10:

Tabela 10: Massa específica (kgm^{-3}) das amostras

<i>Nº da amostra</i>	<i>Ligante Asfalto-Borracha</i>	<i>Ligante Asfalto-Polímero</i>	<i>Ligante cimento Asfáltico de Petróleo</i>	<i>Concreto de Cimento Portland</i>
1	2,46	2,51	2,45	2,19
2	2,46	2,48	2,47	2,30
3	2,45	2,51	2,47	2,37
4	2,48	2,52	2,51	-----
5	2,47	2,52	2,51	-----
6	2,47	2,51	2,50	-----
7	2,48	2,52	2,51	-----
8	2,48	2,54	2,53	-----
9	2,48	2,54	2,53	-----
10	2,48	2,55	2,53	-----
11	2,49	2,52	2,55	-----
12	2,49	2,54	2,54	-----
13	2,49	2,53	2,53	-----
14	2,48	2,52	2,53	-----
15	2,49	2,49	2,51	-----

4.2.1.2.Determinação do Calor Específico

Para determinar o calor específico, realizou-se o monitoramento de temperaturas em quatro pontos distintos das amostras aquecidas por uma resistência elétrica.

Para os cálculos do calor específico precisa-se, primeiramente, determinar a quantidade de calor, a massa e a temperatura média de cada amostra i .

A quantidade de calor (Q), é determinada pela equação

$$Q_i = P_i \Delta t \quad (4.8)$$

onde

$$P_i = \frac{v_i^2}{R_i^*} \quad (4.9)$$

onde:

P_i potência (W);

v_i voltagem (V);

R_i^* resistência (Ω);

Δt tempo (s).

Na Figura 19, através da simulação numérica pelo ajuste de curva, tem-se o domínio de integração e os pontos onde foram coletados os dados experimentais de temperatura em função do tempo (700 segundos). Os dados utilizados no gráfico são da amostras número 3 de cimento asfáltico com ligante asfalto-borracha.

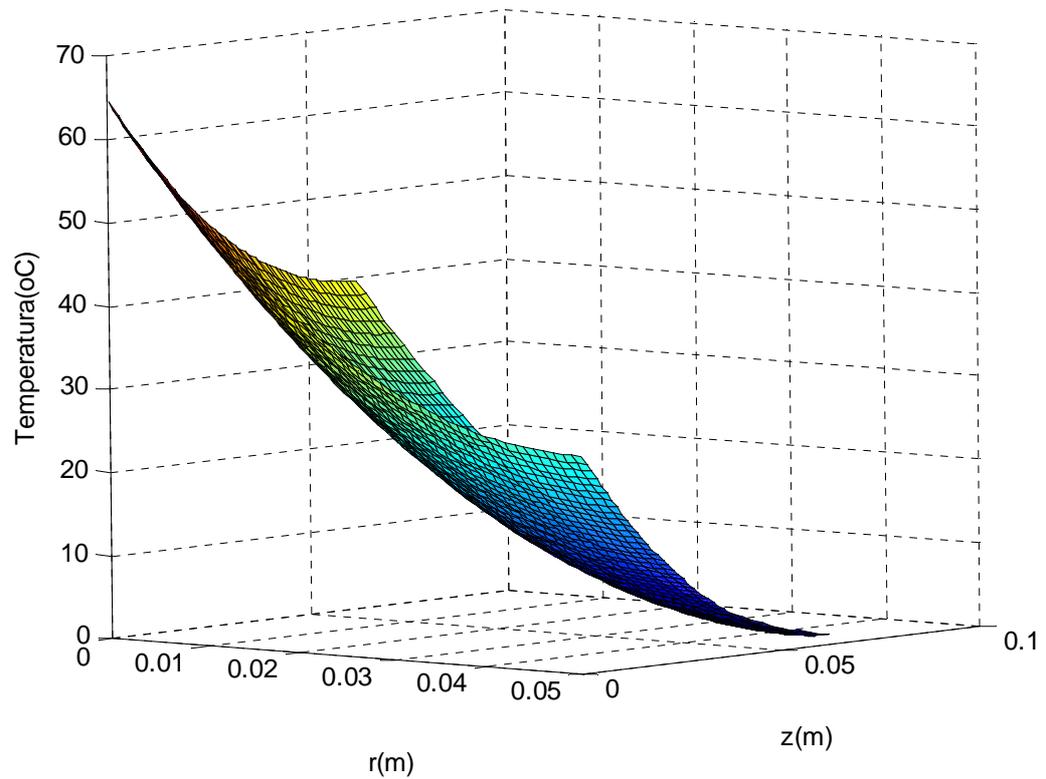


Figura 19: Domínio de integração e os pontos da coleta das temperaturas

O valor da temperatura média foi realizado propondo uma função $T(x,y)$ (Eq. (4.10)) para a distribuição de temperatura na amostra e calculando a temperatura média através do teorema do valor médio. Os valores dos parâmetros A e B foram determinados fazendo um ajuste não linear, utilizando a equação (4.10) e os dados experimentais.

$$T(r, z) = A(r - R)^2 + B\left(z - \frac{h}{2}\right)^2 + T_3 \quad (4.10)$$

Pelo teorema do valor médio, deve existir um valor de temperatura que satisfaça a equação (4.11), onde a é a área do domínio de integração.

$$aTm_i = \iint_A T(x, t) dx dy \quad (4.11)$$

Substituindo (4.10) em (4.11) tem-se

$$aTm_i = \int_0^{h/2} \int_0^R \left[A(x-R)^2 + B\left(y - \frac{h}{2}\right)^2 + T_3 \right] dx dy \quad (4.12)$$

Desenvolvendo a equação (4.12) temos

$$Tm_i = \frac{\frac{AR^3h}{6} + \frac{BRh^3}{24} + \frac{T_3Rh}{2}}{a} \quad (4.13)$$

onde:

- a área (m^2);
- T_{mi} variação da temperatura média ($^{\circ}C$);
- R raio (m);
- A e B coeficientes;
- h altura (m);
- T_3 temperatura no termopar 3 ($^{\circ}C$).

Os valores do calor específico foram obtidos pela equação de quantidade de calor em um corpo, que resolvida para o calor específico torna-se

$$C_i = \frac{Q}{m_i \Delta T_{mi}} \quad (4.14)$$

onde:

- C_p calor específico ($Jkg^{-1}^{\circ}C^{-1}$)
- Q quantidade de calor (Jm^{-3});
- m_i massa (kg);
- ΔT_{mi} variação da temperatura média (C°).

A difusividade térmica é calculada pela equação

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (4.15)$$

4.2.2. Método proposto por Campbell

Esse método de determinação da difusividade térmica, desenvolvido por Campbell *et al.* (1991), utiliza a equação (4.1).

Conhecendo experimentalmente a quantidade de calor fornecida para o corpo, a condutividade térmica, o tempo e uma distância r da fonte de calor, isolando α calcula-se a difusividade por

$$\alpha = -\frac{r^2}{4t \ln\left(\frac{4\pi kt \Delta T}{q^*}\right)} \quad (4.16)$$

onde:

- α difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$);
- r distância da fonte ao ponto onde foram realizadas as medidas de temperatura (m);
- k condutividade térmica ($W m^{-1} ^\circ C^{-1}$);
- t tempo (s);
- ΔT variação da temperatura ($^\circ C$);
- q^* fluxo de calor ($W s m^{-1}$).

4.2.3. Método do Problema Inverso

Para a resolução do problema inverso utilizou-se a equação do calor em coordenadas cilíndricas. Para a resolução do problema inverso primeiramente precisamos resolver o problema direto de transferência de calor.

A solução numérica da equação do calor (4.17) com as condições de contorno (4.18) e condição inicial (4.19) foi implementada usando o Método de Diferenças Finitas, através do método explícito de avanço de tempo

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \text{ ou } \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right), \quad 0 < r < R, \text{ e } t > 0 \quad (4.17)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} (0, t) = q_1, \quad (t > 0) \quad (4.18)$$

$$T(R, t) = T_{amb}(t), \quad (t > 0)$$

$$T(r, 0) = T_0, \quad (0 < r < R) \quad (4.19)$$

onde:

- T temperatura ($^{\circ}C$)
- k condutividade térmica ($Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$)
- α difusividade térmica (m^2s^{-1})
- q_1 fluxo de calor gerado pela fonte (Wm^{-1})
- R raio da amostra cilíndrica (m)
- T_{amb} temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
- T_0 temperatura inicial ($^{\circ}C$)
- r variável espacial (m)
- t intervalo de tempo (s).

A discretização da equação (4.17) usando diferenças finitas centrais é feita com base na expansão das derivadas em Série de Taylor. A derivada temporal tem a forma

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \quad (4.20)$$

A derivada espacial de primeira ordem e segunda ordem tomam, respectivamente, a forma

$$\frac{\partial T}{\partial r} \approx \frac{T_{i+1}^t - T_{i-1}^t}{2\Delta r} \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t}{\Delta r^2} \quad (4.22)$$

onde os sobre-índices t e $t + \Delta t$ são os valores de temperaturas no instante atual e posterior, respectivamente, e o sub-índice i é relativo a posição na direção de r .

Substituindo as derivadas discretizadas na equação (4.17) e resolvendo para o método explícito, obtém-se

$$T_i^{t+\Delta t} \approx \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} (T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t) + \frac{\alpha \Delta t}{2r \Delta r} (T_{i+1}^t - T_{i-1}^t) + T_i^t \quad (4.23)$$

A estimação da difusividade térmica foi obtida através da resolução do Problema Inverso (método da procura em rede). Este problema consiste em encontrar um valor da difusividade térmica que minimiza a diferença (d), equação (4.24), que é a soma do quadrado da diferença entre a temperatura calculada (Tc_i), pelo Problema Direto, e a temperatura (Te_i) obtida experimentalmente, para cada instante de tempo.

A temperatura utilizada para Problema Inverso foi do sensor T1.

$$d = \sum_{i=1}^n (Tc_i - Te_i)^2 \quad (4.24)$$

onde:

d quadrado das diferenças entre as temperaturas calculadas e medidas ($^{\circ}C$);

Tc_i temperatura calculada pelo problema direto com alfa estimado ($^{\circ}C$);

Te_i temperatura medida para um valor de r ($^{\circ}C$);

i número da medida para cada instante de tempo.

Para o cálculo da difusividade térmica através do Problema Inverso foi utilizado o Método de Procura em Rede (MPR), assim chamado e descrito brevemente em Silva Neto e Moura Neto (2005), que apesar de simples, determina a solução ótima de sistemas não lineares e tem bom desempenho computacional para baixo número de parâmetros (menores do que quatro). O MPR é descrito abaixo, na forma de um algoritmo numérico.

Seja $S_{exp} = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ o conjunto de dados experimentais (no presente problema estes dados são os valores de temperatura em função do tempo) em função das variáveis y_k do problema. Sejam $x_1^p, x_2^p, \dots, x_m^p$ vetores cujas componentes são valores dos m parâmetros a ajustar (no presente trabalho existe somente um parâmetro: difusividade térmica). Seja $S = f(x_1^p, x_2^p, \dots, x_m^p, y_1, \dots, y_k)$ a função que envolve os parâmetros x_j^p e as variáveis y_k . (no presente trabalho a função S é o problema direto resolvido numericamente)

1º. Passo: Estimar x_j^I e x_j^n para cada $j = 1, 2, \dots, m$.

2º. Passo: Calcular S estimada, $S_{est} = f(x_1^p, x_2^p, \dots, x_m^p, y_1, \dots, y_k)$, para cada conjunto de valores $X = \{x_1^p, x_2^p, \dots, x_m^p\}$. Cada conjunto X é uma possível solução ótima do problema de ajuste. Assim, são obtidas $N = n^m$ soluções S_{est} .

3º. Passo: Calcular o vetor das diferenças entre as soluções estimadas e os dados experimentais: $\vec{d} = |S_{est} - S_{exp}|$.

4º. Passo: Identificar o menor valor (d_{min}) dentre os componentes do vetor \vec{d} e as correspondentes posições p , do conjunto $X = (x_1^p, x_2^p, \dots, x_m^p)$ que gerou d_{min} . O conjunto X

é a melhor solução dentre as N soluções obtidas, considerando os atuais intervalos $[x_j^l, x_j^n]$ e as n componentes dos vetores \hat{x}_j .

5º. Passo: Refinamento da solução. Definir $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ tal que $\Delta x_j < (x_j^n - x_j^l)/2$ e redefinir x_j^l e x_j^n para cada j .

6º. Passo: Repetir os passos 2 a 5 até que d_{min} não apresente variação significativa, ou

$$\left| d_{min}^{k+1} - d_{min}^k \right| < \varepsilon$$

onde ε é o critério de precisão.

Nas Figuras 20, 21 e 22 têm-se exemplos da temperatura calculada pelo problema direto, para o valor de difusividade térmica ótimo estimado pelo problema inverso e os valores de temperatura medidos. Na Figura 20 tem-se a amostra número 6 de concreto asfáltico de petróleo, na Figura 21 tem-se a amostra número 7 de concreto asfáltico com ligante asfalto-polímero e na Figura 22 tem-se a amostras número 13 de concreto asfáltico com ligante asfalto-borracha. Realizou-se o monitoramento de temperatura durante 700 s. Tem-se para o primeiro e o segundo exemplo, coeficiente de correlação $R^2 = 0.96$ e para o terceiro exemplo tem-se $R^2=0,95$. Para as demais amostras foram obtidos coeficiente de correlação semelhante a estes.

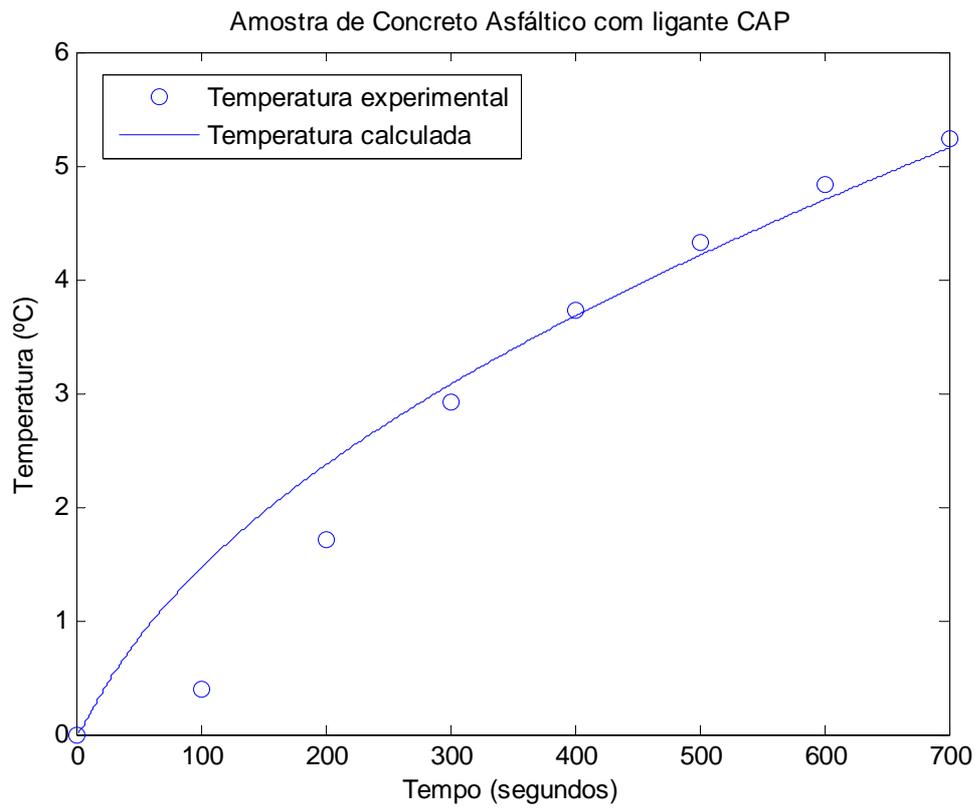


Figura 20: Curvas da temperatura calculada e temperatura experimental em função do tempo

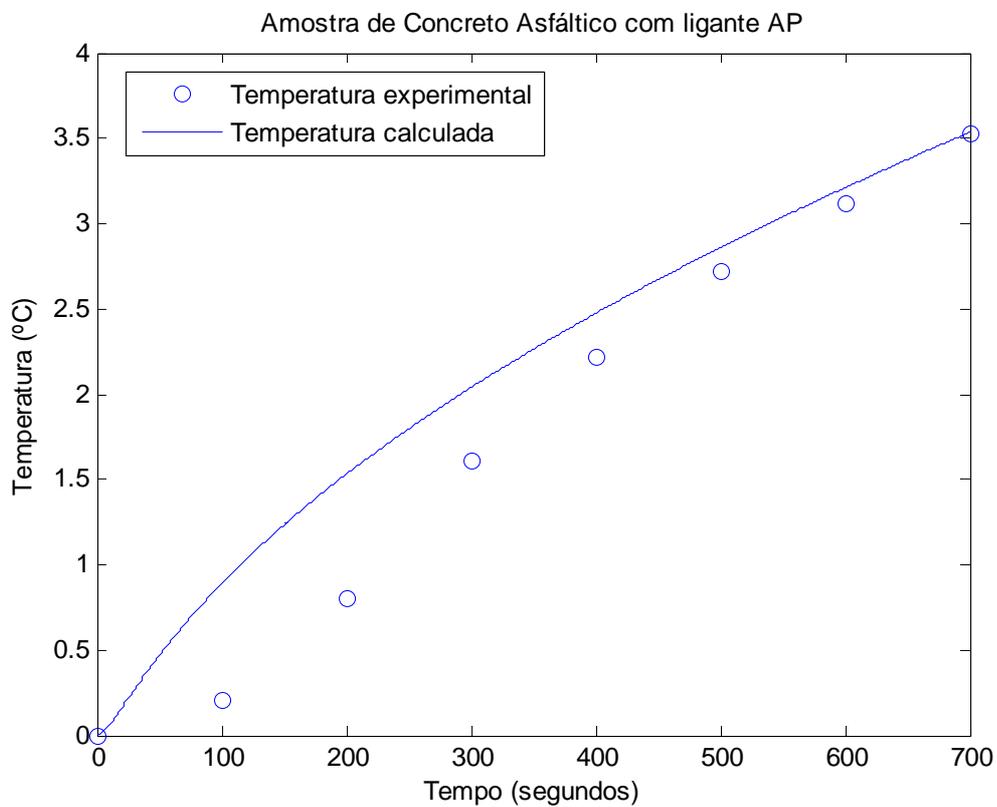


Figura 21: Curvas da temperatura calculada e temperatura experimental em função do tempo

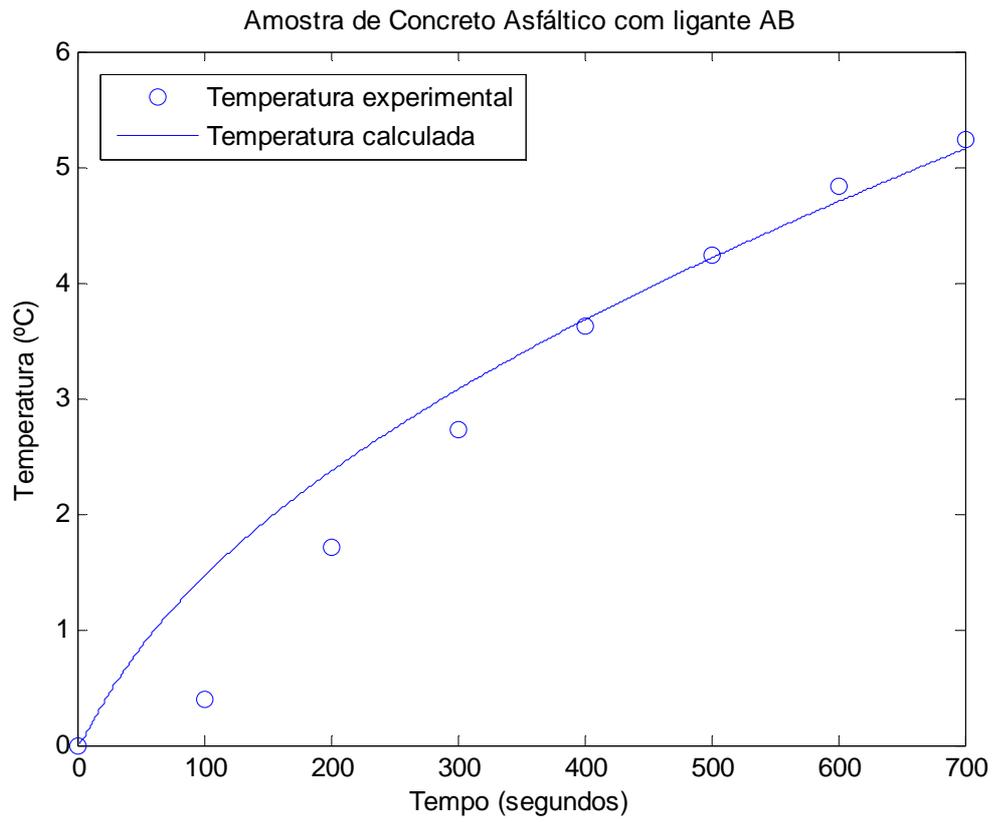


Figura 22: Curvas da temperatura calculada e temperatura experimental em função do tempo

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo, são apresentados os resultados obtidos com os experimentos para os cálculos das propriedades térmicas de Calor Específico (C_p), Condutividade Térmica (k) e Difusividade Térmica (α) dos quatro materiais de pavimentação estudados.

Para a análise dos resultados obtidos utilizaram-se, além de interpretação dos dados tabulados e dos gráfico, técnicas estatísticas de forma a avaliar a influência de cada uma das variáveis controláveis (V , L e ρ) nas variáveis de resposta. Para tanto foram realizadas análises de variância (ANOVA) para cada variável de resposta.

A análise de variância (ANOVA) consiste em verificar se há variabilidade entre as médias dos componentes do grupo e as médias entre os grupos. Nesse processo o nível de significância para as análises foi de 0,05, ou seja, ao se aceitar as hipóteses de que há influências significativas entre um fator controlável e a variável resposta, há, no máximo, uma probabilidade de 5% desta hipótese não ser verdadeira.

5.1. CALOR ESPECÍFICO

Os resultados do calor específico obtidos foram referentes a amostras de concreto asfáltico com ligante convencional (Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP), concreto asfáltico com ligante asfalto-polímero - AP, concreto asfáltico com ligante de asfalto-borracha - AB e concreto de cimento Portland.

Nas Tabelas 11, 12 e 13 são apresentados os resultados do calor específico obtidos para cada umas das 15 amostras de concreto asfáltico com os tipos de ligante: CAP, AP e AB, respectivamente, que possuem diferentes teores de ligante, volumes de vazios e massa específica. A Tabela 14 possui valores relativos ao calor específico de amostras de concreto de cimento Portland.

Tabela 11: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto asfáltico com ligante CAP

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Ligante (%)</i>	<i>Volume de Vazios (%)</i>	<i>Massa Específica (kgm⁻³)</i>	<i>Calor Específico (Jkg⁻¹°C⁻¹)</i>
<i>CAP1</i>	4,50	6,64	2,45	1162,79
<i>CAP2</i>	4,50	6,57	2,47	1034,85
<i>CAP3</i>	4,50	6,86	2,47	1137,13
<i>CAP4</i>	5,00	5,15	2,51	1007,88
<i>CAP5</i>	5,00	5,13	2,51	1242,56
<i>CAP6</i>	5,00	4,88	2,50	1040,89
<i>CAP7</i>	5,50	3,50	2,51	989,45
<i>CAP8</i>	5,50	3,39	2,53	1109,92
<i>CAP9</i>	5,50	4,03	2,53	1183,76
<i>CAP10</i>	6,00	2,42	2,53	967,13
<i>CAP11</i>	6,00	1,96	2,55	930,62
<i>CAP12</i>	6,00	2,05	2,54	1048,96
<i>CAP13</i>	6,50	1,55	2,53	870,73
<i>CAP14</i>	6,50	1,79	2,53	1020,50
<i>CAP15</i>	6,50	1,87	2,51	984,34

Tabela 12: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto asfáltico com ligante AP

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Ligante (%)</i>	<i>Volume de Vazios (%)</i>	<i>Massa Específica (kgm⁻³)</i>	<i>Calor Específico (Jkg⁻¹°C⁻¹)</i>
<i>AP1</i>	5,00	5,14	2,51	1171,61
<i>AP2</i>	5,00	4,92	2,48	951,90
<i>AP3</i>	5,00	4,95	2,51	1122,14
<i>AP4</i>	5,50	3,79	2,52	1033,83
<i>AP5</i>	5,50	3,81	2,52	1105,85
<i>AP6</i>	5,50	4,12	2,51	1084,91
<i>AP7</i>	6,00	2,74	2,52	902,88
<i>AP8</i>	6,00	2,29	2,54	1099,97
<i>AP9</i>	6,00	2,26	2,54	1091,70
<i>AP10</i>	6,50	1,78	2,55	1038,32
<i>AP11</i>	6,50	1,77	2,52	1011,21
<i>AP12</i>	6,50	1,64	2,54	1014,83
<i>AP13</i>	7,00	1,52	2,53	1002,97
<i>AP14</i>	7,00	1,56	2,52	1033,77
<i>AP15</i>	7,00	1,83	2,49	845,04

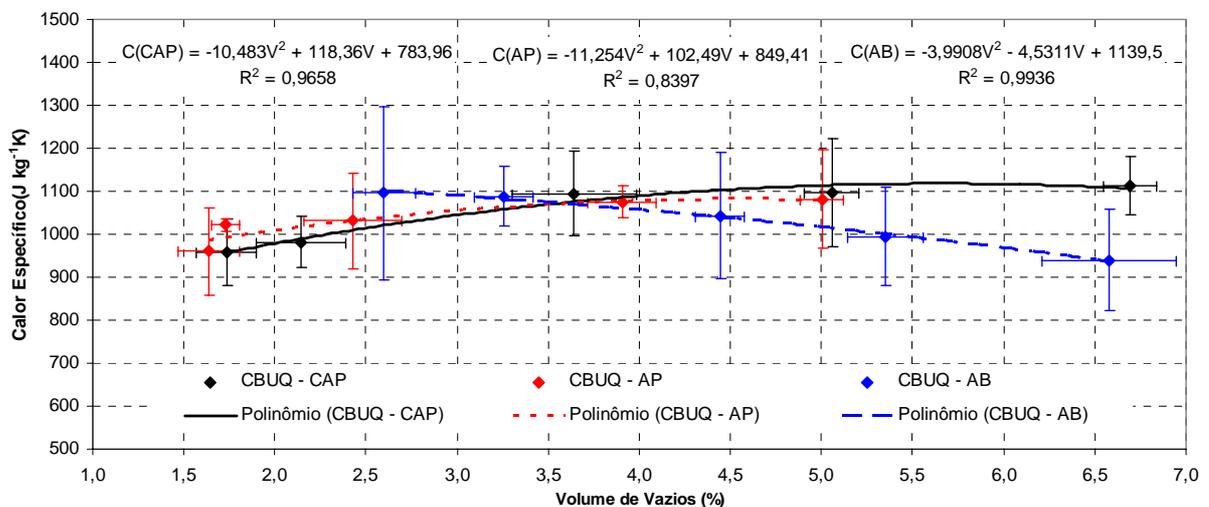
Tabela 13: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto asfáltico com ligante AB

Número da amostra	Teor de Ligante (%)	Volume de Vazios (%)	Massa Específica (kgm^{-3})	Calor Específico ($\text{Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
AB1	5,50	6,43	2,46	949,21
AB2	5,50	6,30	2,46	1052,08
AB3	5,50	7,00	2,45	817,61
AB4	6,00	5,13	2,48	1126,22
AB5	6,00	5,54	2,47	939,81
AB6	6,00	5,38	2,47	917,29
AB7	6,50	4,60	2,48	1184,14
AB8	6,50	4,35	2,48	892,41
AB9	6,50	4,38	2,48	1053,15
AB10	7,00	3,34	2,48	1165,11
AB11	7,00	3,07	2,49	1070,47
AB12	7,00	3,36	2,49	1029,58
AB13	7,50	2,79	2,49	1010,27
AB14	7,50	2,54	2,48	953,45
AB15	7,50	2,47	2,49	1326,07

Tabela 14: Resultados do Calor Específico para as amostras de CCP

Número da amostra	Massa Específica (kgm^{-3})	Calor Específico ($\text{Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
CCP 1	2,19	1280,62
CCP 2	2,30	1053,64
CCP 3	2,37	1152,69

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam, respectivamente, a relação entre a variável do Calor Específico e as variáveis controláveis V, L e ρ .

**Figura 23:** Calor específico em função da variação do volume de vazios

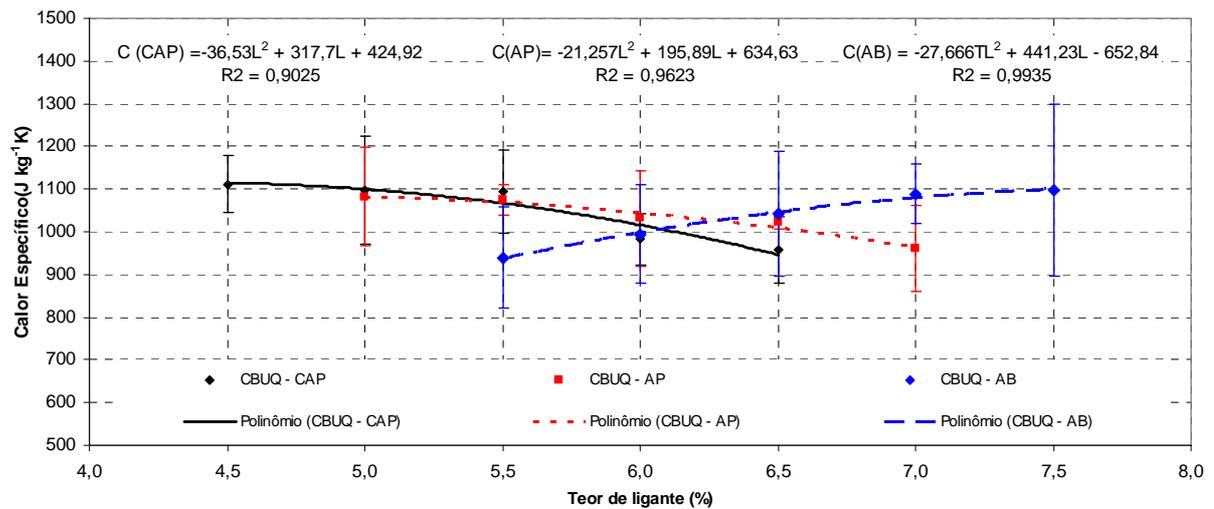


Figura 24: Relação do calor específico em função da variação do teor de ligante

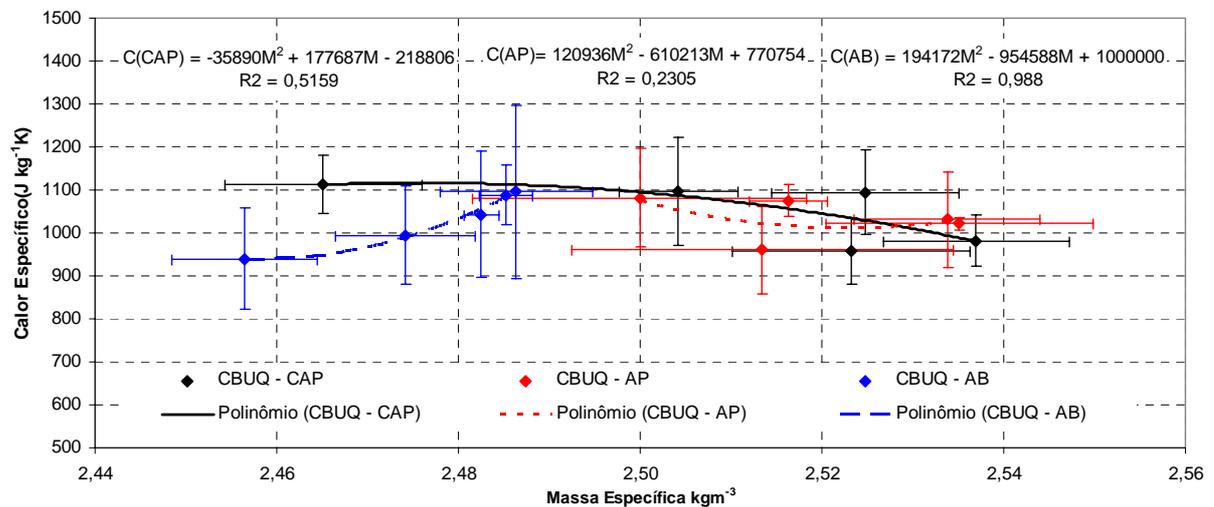


Figura 25: Relação do calor específico em função da variação da massa específica

Nota-se nos gráficos que a mistura preparada com o ligante AB possui um comportamento um pouco diferenciado das demais misturas (com CAP e com AP); tal comportamento pode estar associado ao próprio calor específico do ligante que contém 15% de borracha moída de pneus e/ou a natureza das medidas realizadas que por vezes levam a discrepâncias de valores, conforme demonstrado pelas barras de erro incorporadas às Figuras. Vale ressaltar que o calor específico da borracha é de aproximadamente $920 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Incropera e De Witt, 2003) o que implica em mudanças nas propriedades térmicas do material.

A partir dos dados obtidos foi realizada uma análise estatística, utilizando o *software* Statistica for Windows (versão 4.3B), para indicar a influência das variáveis independentes na variável de resposta (variável dependente).

Ao analisarmos os resultados obtidos pela análise estatística para o calor específico em função das variáveis independentes (V , L e ρ) observou-se comportamentos diferenciados com relação ao tipo de ligante.

Para as amostras de concreto asfáltico com CAP não há influência de nenhuma das propriedades no calor específico e encontrou-se um desvio padrão médio entre as amostras de $86,31 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, assim para essa amostra temos um intervalo de confiança para o calor específico entre $962,46 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1135,08 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Analisando o calor específico para o concreto asfáltico com ligante AP percebeu-se que não ocorrem influências do teor de ligante e volume de vazios. Já no que diz respeito à massa específica possui uma influência no calor específico, desta forma a equação de ajuste apresentada na Figura 25 ($C(\text{AP}) = 120936M^2 - 610213M + 770754$) pode ser utilizado para estimar o valor de C . O desvio padrão médio para as amostras é de $75,95 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, logo para essa amostra temos um intervalo de confiança para o calor específico entre $958,11 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1110,01 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Para o concreto asfáltico com ligante AB os resultados estatísticos, mostram influência no calor específico, apenas do teor de ligante indicando o modelo apresentado na Figura 24 ($C(\text{AB}) = -27,66L^2 + 441,23L - 652,84$) adequado para estimar o c das misturas em função do Teor de Ligante. O volume de vazios e massa específica não mostraram influência significativa. Para as amostras de AB encontrou-se um desvio padrão médio $129,91 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, assim temos um para essa amostra intervalo de confiança para o calor específico entre $902,27 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1162,08 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Através das análises estatísticas, para o concreto de cimento Portland, a massa específica não apresenta influências significativas no calor específico. O desvio padrão médio para essas amostras é de $113,80 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, logo temos um intervalo de confiança para o ρ entre $1048,51 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1276,12 \text{ Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

5.2. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

As análises dos resultados para a condutividade térmica foram realizadas em amostras de concreto asfáltico com ligante convencional - CAP, concreto asfáltico com ligante Asfalto-

Polímero - AP, concreto asfáltico com ligante de Asfalto-Borracha - AB e concreto de cimento Portland - CCP.

Nas tabelas 15, 16 e 17 apresentam-se os resultados para a condutividade térmica obtidos para cada uma das 15 amostras de concreto asfáltico com os tipos de ligante: CAP, AP e AB, respectivamente, que possuem diferentes teores de ligante, volumes de vazios e massa específica. A Tabela 18 possui valores relativos ao calor específico para as 3 amostras de CCP.

Tabela 15: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante CAP

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Ligante (%)</i>	<i>Volume de Vazios</i>	<i>Massa Específica (kgm⁻³)</i>	<i>Condutividade Térmica (Wm⁻¹ °C⁻¹)</i>
<i>CAP1</i>	4,50	6,64	2,45	1,24
<i>CAP2</i>	4,50	6,58	2,47	1,23
<i>CAP3</i>	4,50	6,86	2,47	1,20
<i>CAP4</i>	5,00	5,16	2,51	1,30
<i>CAP5</i>	5,00	5,13	2,51	1,18
<i>CAP6</i>	5,00	4,89	2,50	1,24
<i>CAP7</i>	5,50	3,50	2,51	1,19
<i>CAP8</i>	5,50	3,39	2,53	1,22
<i>CAP9</i>	5,50	4,03	2,53	1,35
<i>CAP10</i>	6,00	2,42	2,53	1,33
<i>CAP11</i>	6,00	1,96	2,55	1,22
<i>CAP12</i>	6,00	2,05	2,54	1,27
<i>CAP13</i>	6,50	1,55	2,53	1,29
<i>CAP14</i>	6,50	1,79	2,53	1,30
<i>CAP15</i>	6,50	1,87	2,51	1,31

Tabela 16: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante AP

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Ligante (%)</i>	<i>Volume de Vazios</i>	<i>Massa Específica (kgm⁻³)</i>	<i>Condutividade Térmica Wm⁻¹°C⁻¹</i>
<i>AP1</i>	5,00	5,14	2,51	1,16
<i>AP2</i>	5,00	4,92	2,48	1,15
<i>AP3</i>	5,00	4,95	2,51	1,18
<i>AP4</i>	5,50	3,79	2,52	1,26
<i>AP5</i>	5,50	3,81	2,52	1,05
<i>AP6</i>	5,50	4,12	2,51	1,26
<i>AP7</i>	6,00	2,74	2,52	1,21
<i>AP8</i>	6,00	2,29	2,54	1,19
<i>AP9</i>	6,00	2,26	2,54	1,21
<i>AP10</i>	6,50	1,78	2,55	1,13
<i>AP11</i>	6,50	1,77	2,52	1,23
<i>AP12</i>	6,50	1,64	2,54	1,31
<i>AP13</i>	7,00	1,52	2,53	1,27
<i>AP14</i>	7,00	1,56	2,52	1,15
<i>AP15</i>	7,00	1,83	2,49	1,28

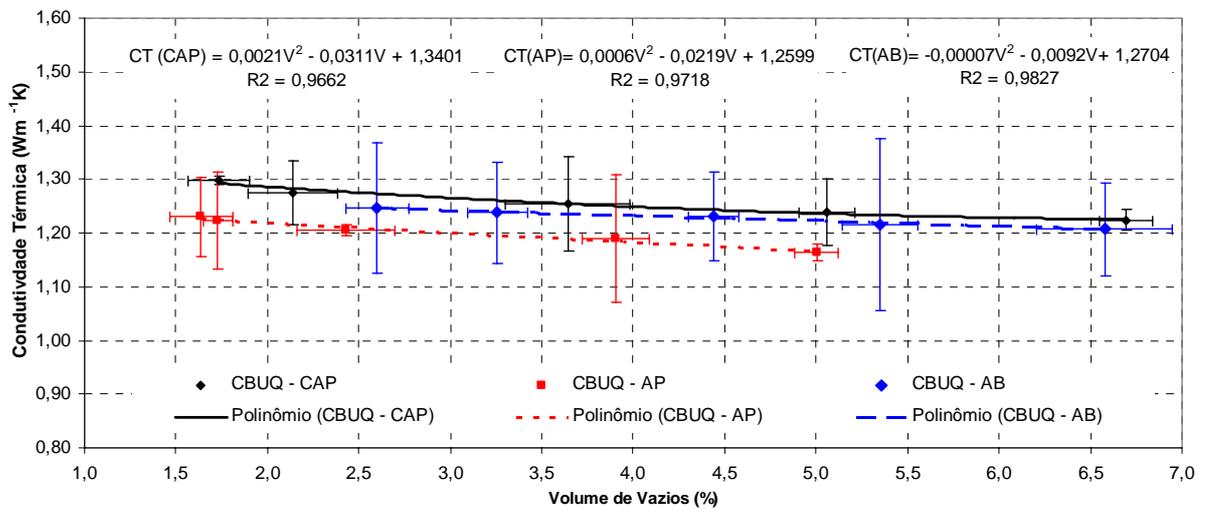
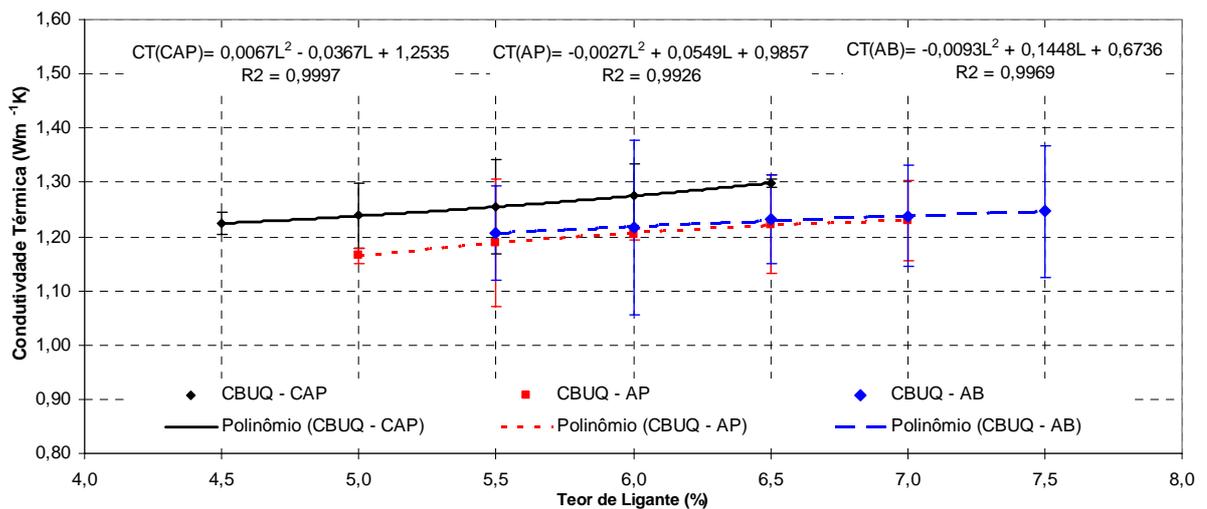
Tabela 17: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante AB

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Ligante (%)</i>	<i>Volume de Vazios</i>	<i>Massa Específica (kgm⁻³)</i>	<i>Condutividade Térmica Wm⁻¹°C⁻¹</i>
<i>AB1</i>	5,50	6,43	2,46	1,29
<i>AB2</i>	5,50	6,30	2,46	1,22
<i>AB3</i>	5,50	7,00	2,45	1,12
<i>AB4</i>	6,00	5,13	2,48	1,39
<i>AB5</i>	6,00	5,54	2,47	1,19
<i>AB6</i>	6,00	5,38	2,47	1,07
<i>AB7</i>	6,50	4,60	2,48	1,32
<i>AB8</i>	6,50	4,35	2,48	1,20
<i>AB9</i>	6,50	4,38	2,48	1,17
<i>AB10</i>	7,00	3,34	2,48	1,16
<i>AB11</i>	7,00	3,07	2,49	1,34
<i>AB12</i>	7,00	3,36	2,49	1,21
<i>AB13</i>	7,50	2,79	2,49	1,39
<i>AB14</i>	7,50	2,54	2,48	1,19
<i>AB15</i>	7,50	2,47	2,49	1,17

Tabela 18: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de CCP

Número da amostra	Massa Específica (kgm^{-3})	Condutividade Térmica $\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$
CCP 1	2,19	1,38
CCP 2	2,30	1,55
CCP 3	2,37	1,50

As Figuras 26, 27 e 28 apresentam, respectivamente a difusividade térmica com os respectivos valores das variáveis independentes (V, L e ρ).

**Figura 26:** Relação da condutividade térmica em função da variação do volume de vazios**Figura 27:** Relação da condutividade térmica em função da variação do teor de ligante

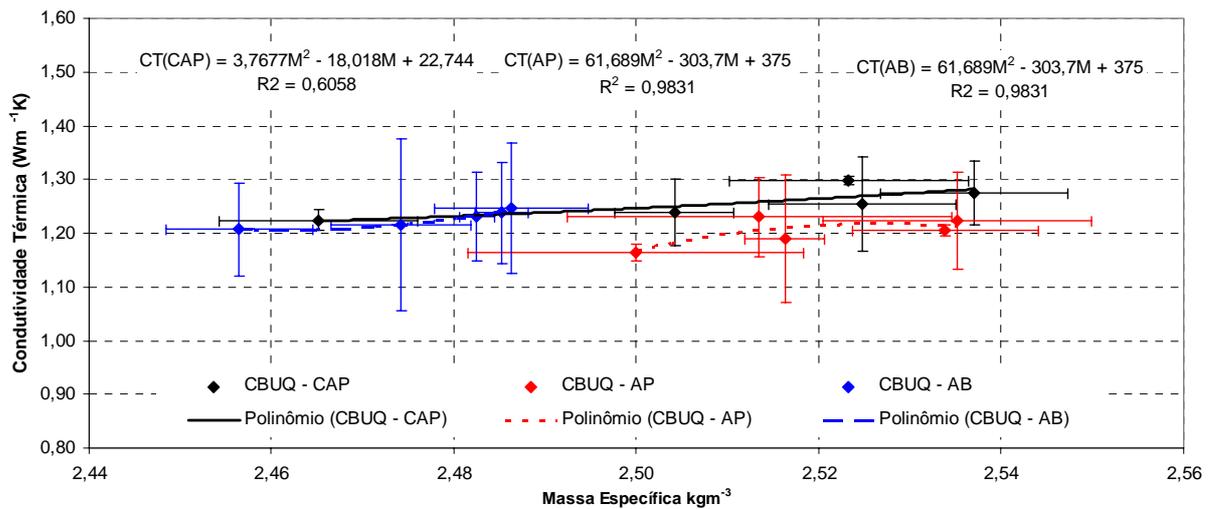


Figura 28: Relação da condutividade térmica em função da variação da massa específica

Com relação aos gráficos podemos perceber que as amostras, apresentam comportamento semelhante, para os 3 tipos de ligantes estudados (CAP, AP e AB). Ao analisarmos os resultados obtidos pela análise estatística, observou-se que as variáveis independentes (V , L e ρ) não mostraram influências significativas na condutividade térmica das amostras estudadas.

Para as amostras de concreto asfáltico com CAP encontramos um desvio padrão médio entre as amostras de $0,05 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, assim para esse tipo de ligante temos um intervalo de confiança para a condutividade térmica entre $1,21 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1,31 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Analisando a condutividade térmica para o concreto asfáltico com ligante AP, encontrou-se um desvio padrão médio de $0,06 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, logo para essas amostras temos um valor de confiança para a condutividade térmica entre $1,14 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1,26 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

As mesmas análises foram realizadas para o concreto asfáltico com ligante AB. Encontrou-se um desvio padrão médio de $0,10 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, assim temos para esse tipo de ligante temos um intervalo de confiança para a condutividade térmica de $1,12 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1,34 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

As análises estatísticas para o CCP, não mostraram influências da massa específica na condutividade térmica. O desvio padrão médio encontrado para essas amostras é de $0,09 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, assim temos um intervalo de amostras para a condutividade térmica entre $1,39 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1,56 \text{ Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

5.3. DIFUSIVIDADE TÉRMICA

As análises dos resultados referentes à difusividade térmica foram realizadas para as amostras de concreto asfáltico com CAP, com AP e AB além do CCP.

Nas Tabelas 19, 20 e 21 são apresentados os resultados da difusividade térmica obtidas para cada uma das 45 amostras de concreto asfáltico com os tipos de ligante: CAP, AP e AB, respectivamente, que possuem diferentes teores de ligante, volumes de vazios e massa específica. A Tabela 22 possui valores relativos ao calor específico de amostras de CCP.

Tabela 19: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante CAP

Número da amostra	Teor de Ligante (%)	Volume de Vazios	Massa Específica (kgm^{-3})	Difusividade Térmica (m^2s^{-1}) $\times 10^{-7}$		
				Método Experimental	Método de Campbell	Problema Inverso
<i>CAP1</i>	4,50	6,64	2,45	4,36	4,16	4,03
<i>CAP2</i>	4,50	6,58	2,47	4,80	4,72	4,58
<i>CAP3</i>	4,50	6,86	2,47	4,61	4,40	4,39
<i>CAP4</i>	5,00	5,16	2,51	5,15	5,12	4,89
<i>CAP5</i>	5,00	5,13	2,51	3,79	3,45	3,11
<i>CAP6</i>	5,00	4,89	2,50	4,75	4,53	4,30
<i>CAP7</i>	5,50	3,50	2,51	4,78	4,68	4,20
<i>CAP8</i>	5,50	3,39	2,53	4,35	4,23	4,20
<i>CAP9</i>	5,50	4,03	2,53	4,52	4,33	4,21
<i>CAP10</i>	6,00	2,42	2,53	5,46	5,22	5,08
<i>CAP11</i>	6,00	1,96	2,55	5,13	5,03	4,80
<i>CAP12</i>	6,00	2,05	2,54	4,79	4,56	4,42
<i>CAP13</i>	6,50	1,55	2,53	5,86	5,53	5,32
<i>CAP14</i>	6,50	1,79	2,53	5,02	4,88	4,76
<i>CAP15</i>	6,50	1,87	2,51	5,30	5,03	4,89

Tabela 20: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante AP

Número da amostra	Teor de Ligante (%)	Volume de Vazios	Massa Específica (kgm^{-3})	Difusividade Térmica (m^2/s) $\times 10^{-7}$		
				Método Experimental	Método de Campbell	Problema Inverso
AP1	5,00	5,14	2,51	3,93	3,83	3,35
AP2	5,00	4,92	2,48	4,89	4,68	4,52
AP3	5,00	4,95	2,51	4,20	4,15	4,10
AP4	5,50	3,79	2,52	4,82	4,76	4,66
AP5	5,50	3,81	2,52	3,78	3,61	3,60
AP6	5,50	4,12	2,51	4,62	4,53	4,24
AP7	6,00	2,74	2,52	5,30	5,13	5,07
AP8	6,00	2,29	2,54	4,28	4,25	4,16
AP9	6,00	2,26	2,54	4,37	4,26	4,07
AP10	6,50	1,78	2,55	4,28	4,16	4,11
AP11	6,50	1,77	2,52	4,81	4,80	4,68
AP12	6,50	1,64	2,54	5,09	5,04	4,92
AP13	7,00	1,52	2,53	4,99	4,72	4,57
AP14	7,00	1,56	2,52	4,40	4,35	4,04
AP15	7,00	1,83	2,49	6,06	6,04	5,92

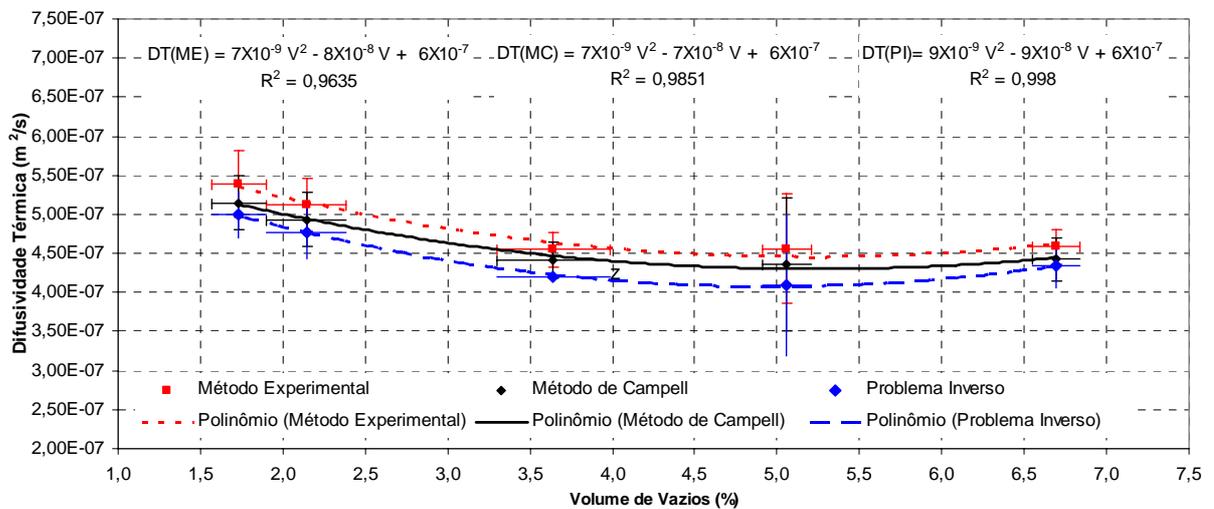
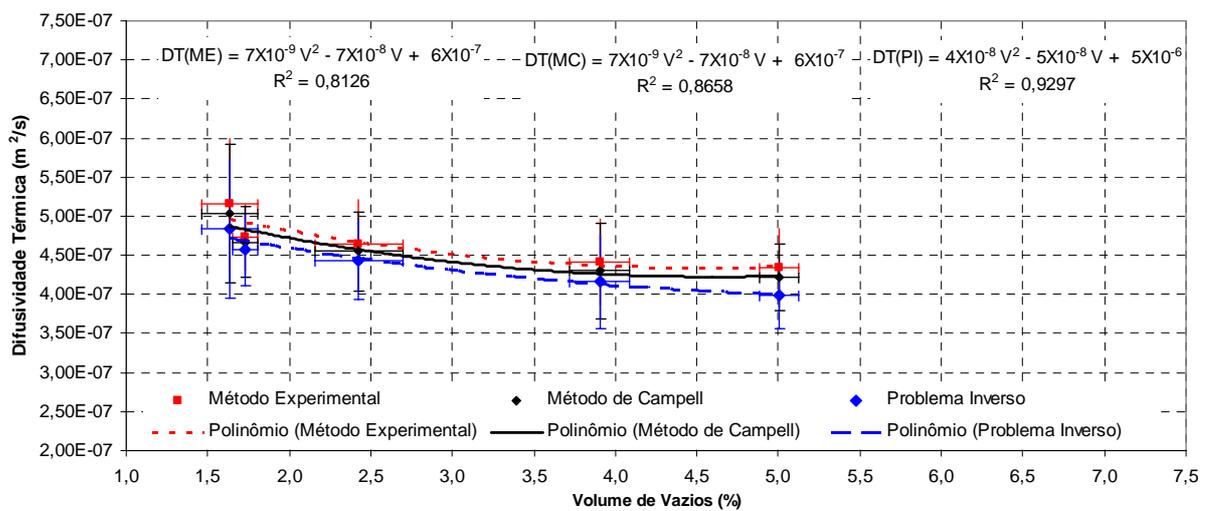
Tabela 21: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto asfáltico com ligante AB

Número da amostra	Teor de Ligante (%)	Volume de Vazios	Massa Específica (kgm^{-3})	Difusividade Térmica (m^2/s) $\times 10^{-7}$		
				Método Experimental	Método de Campbell	Problema Inverso
AB1	5,50	6,43	2,46	5,51	5,23	5,16
AB2	5,50	6,30	2,46	4,71	4,43	4,32
AB3	5,50	7,00	2,45	5,57	5,53	5,51
AB4	6,00	5,13	2,48	4,97	4,82	4,59
AB5	6,00	5,54	2,47	4,25	4,22	4,14
AB6	6,00	5,38	2,47	4,74	4,51	4,48
AB7	6,50	4,60	2,48	4,50	4,38	4,28
AB8	6,50	4,35	2,48	5,41	5,32	5,29
AB9	6,50	4,38	2,48	4,48	4,38	4,30
AB10	7,00	3,34	2,48	4,03	3,87	3,77
AB11	7,00	3,07	2,49	5,05	4,97	4,84
AB12	7,00	3,36	2,49	4,71	4,50	4,25
AB13	7,50	2,79	2,49	5,52	5,41	5,15
AB14	7,50	2,54	2,48	5,02	4,92	4,76
AB15	7,50	2,47	2,49	3,53	3,33	3,04

Tabela 22: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de CCP

Número da amostra	Massa Específica (kgm^{-3})	Difusividade Térmica (m^2/s) $\times 10^{-7}$		
		Método Experimental	Método de Campbell	Problema Inverso
CCP 1	2,19	4,91	4,80	4,71
CCP 2	2,30	6,40	6,37	6,20
CCP 3	2,37	5,48	5,25	5,04

As Figuras 29, 30 e 31 apresentam a relação entre a difusividade térmica e o volume de vazios para as amostras de CAP, AP e AB, respectivamente.

**Figura 29:** Difusividade térmica em função da variação do volume de vazios na mistura de concreto asfáltico com ligante CAP**Figura 30:** Difusividade térmica em função da variação do volume de vazios na mistura de concreto asfáltico com ligante AP

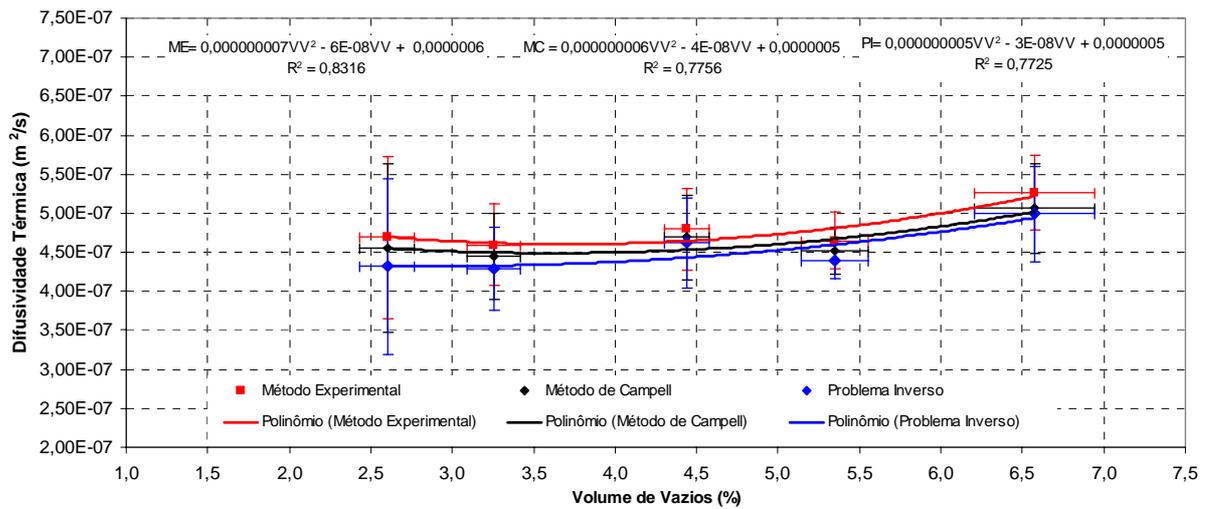


Figura 31: Difusividade térmica em função da variação do volume de vazios na mistura de concreto asfáltico com ligante AB

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam, respectivamente, a relação entre difusividade térmica e teor de ligante e para o CAP, AP e AB.

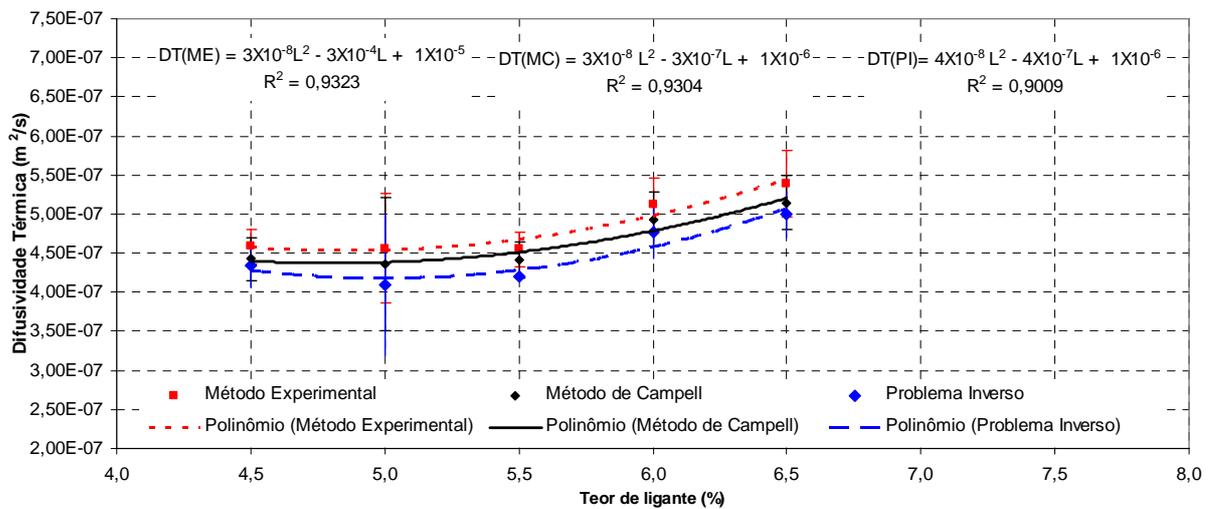


Figura 32: Condutividade térmica em função da variação do teor de ligante na mistura de concreto asfáltico com ligante CAP

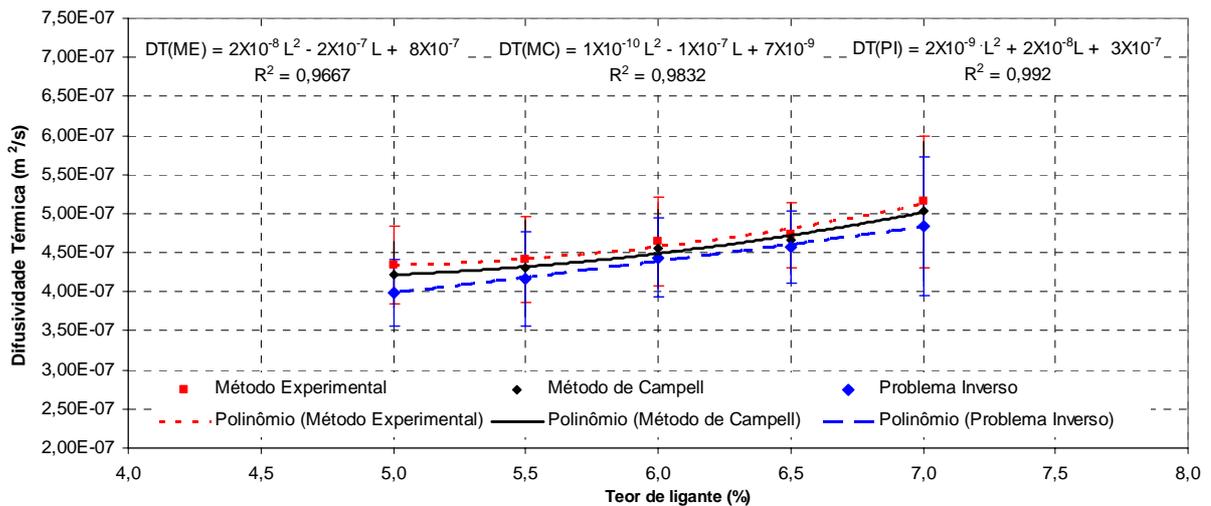


Figura 33: Difusividade térmica em função da variação do teor de ligante na mistura de concreto asfáltico com ligante AP

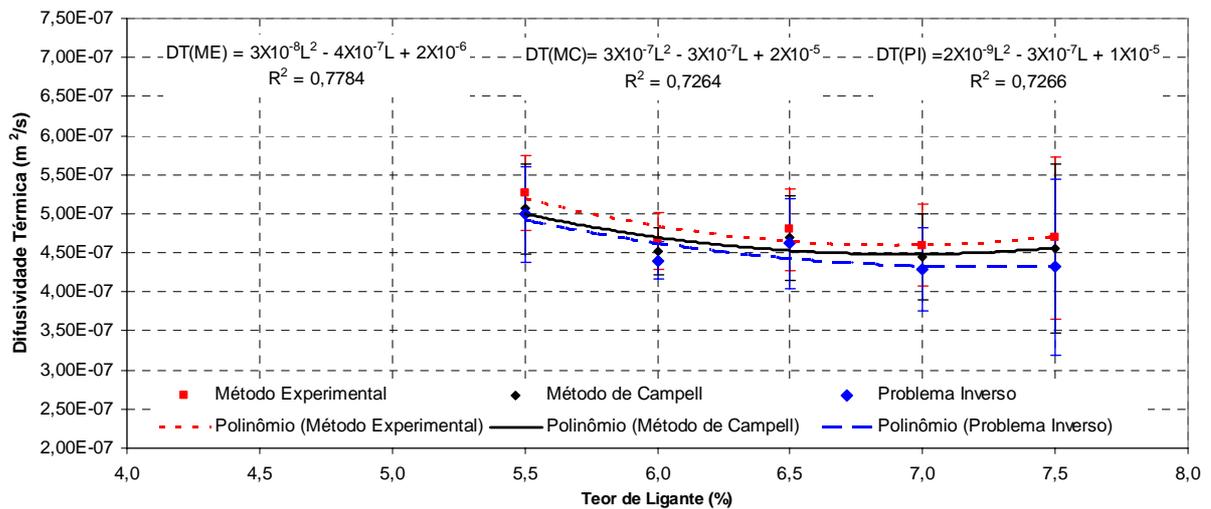


Figura 34: Difusividade térmica em função da variação do teor de ligante na mistura de concreto asfáltico com ligante AB

As Figuras 35, 36 e 37 apresentam a relação entre difusividade térmica e massa específica para o CAP, AP e AB, respectivamente.

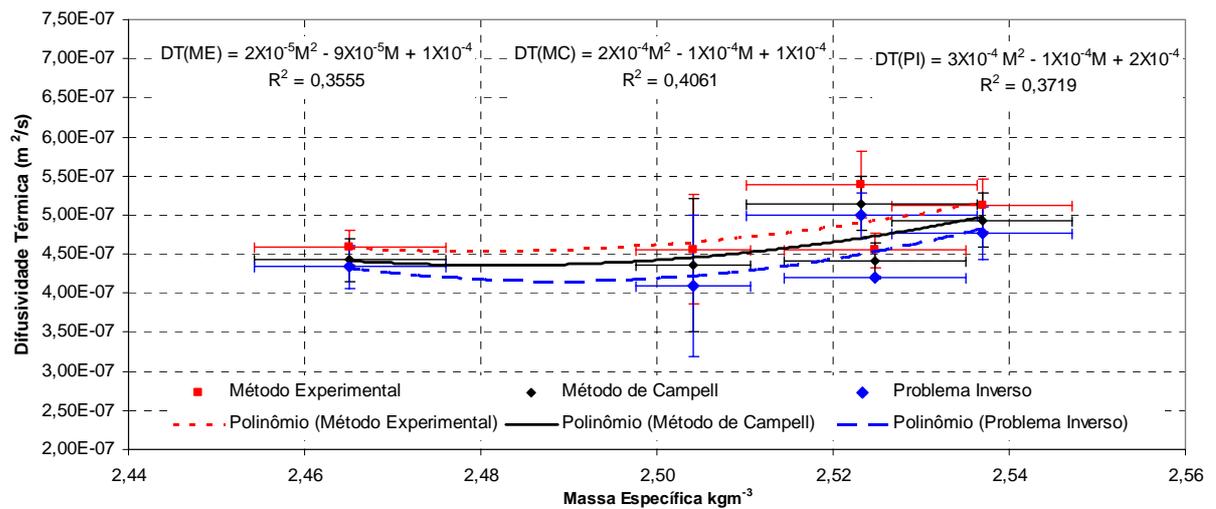


Figura 35: Difusividade térmica em função da variação da massa específica na mistura de concreto asfáltico com ligante CAP

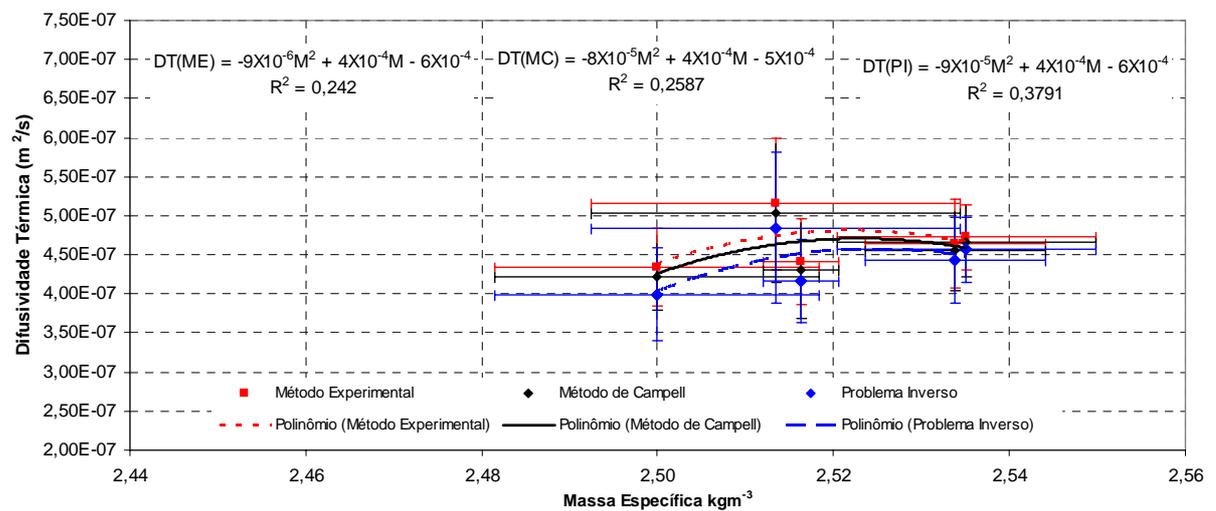


Figura 36: Difusividade térmica em função da variação da massa específica na mistura de concreto asfáltico com ligante AP

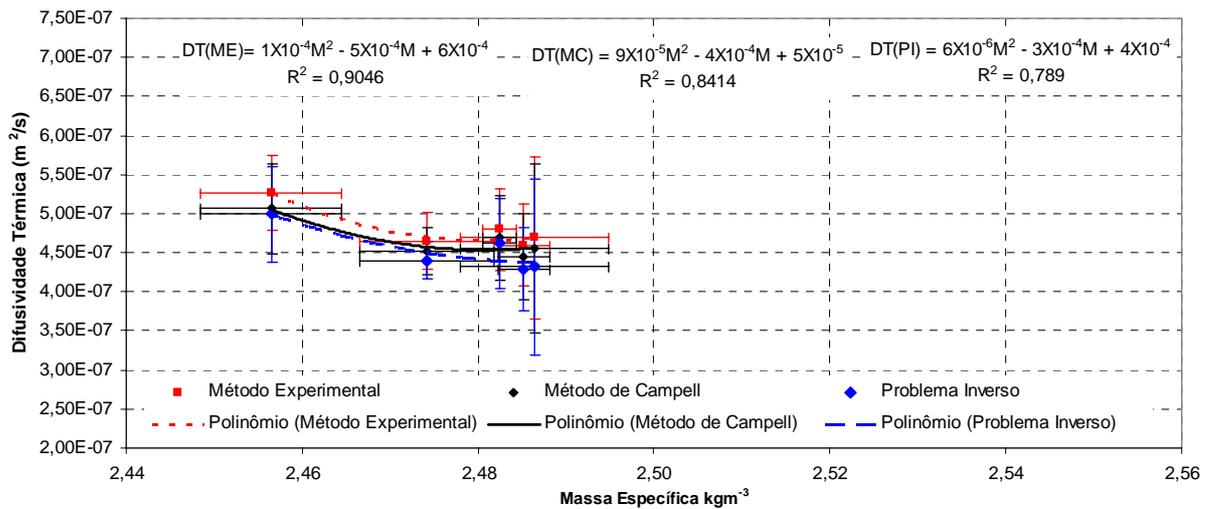


Figura 37: Difusividade térmica em função da variação da massa específica na mistura de concreto asfáltico com ligante AB

Para a análise estatística dos resultados, relacionou-se a difusividade térmica, calculada pelos 3 métodos, Método Experimental, Método de Campell e Método do Problema Inverso, em função das variáveis independentes (V , L e ρ).

Para as amostras de concreto asfáltico com CAP, não há influências significativas das variáveis independentes nos resultados da difusividade térmica obtidos pelos três métodos. Para o Método Experimental encontrou-se um desvio padrão médio de $3,80 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, logo para esse método temos um valor da difusividade térmica num intervalo de confiança entre $4,46 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $5,22 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. O desvio padrão médio encontrado para o Método de Campell foi de $4,08 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, assim temos um intervalo de confiança entre $4,25 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $5,07 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Para o Método do Problema Inverso encontramos um desvio padrão médio de $3,63 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, com isso temos um intervalo de confiança para a condutividade térmica entre $4,12 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $4,84 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Através da análise estatística, para as amostras de concreto asfáltico com ligante AP percebeu-se que não ocorrem influências do teor de ligante e volume de vazios. Já no que diz respeito à massa específica possui influência na difusividade térmica. Desta forma para o Método Experimental a equação de ajuste apresentada ($DT(ME) = -9 \times 10^{-6} M^2 + 4 \times 10^{-4} M - 6 \times 10^{-4}$), pode ser utilizada para estimar o valor de α , apresentando um desvio padrão médio de $5,73 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, assim temos um intervalo de confiança para a difusividade para esse método entre $4,08 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $5,23 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Ao analisar o Método de Campell, podemos indicar a equação de ajuste

(DT(MC) = $-8 \times 10^{-5} M^2 + 4 \times 10^{-4} M - 5 \times 10^{-4}$), como sendo uma forma de estimar o valor da difusividade térmica. Para esse método temos um desvio padrão médio de $5,77 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$, e conseqüentemente um intervalo de confiança para α entre $3,98 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $5,13 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. Para o Método do Problema Inverso a equação de ajuste (DT(PI) = $-9 \times 10^{-5} M^2 + 4 \times 10^{-4} M - 6 \times 10^{-4}$) é dada para estimar o valor de α , esse método nos dá um desvio padrão médio de $6,13 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$, assim temos um intervalo de confiança para a difusividade térmica entre $3,79 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $5,01 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. As equações de ajustes bem como as curvas para os três métodos utilizados podem ser visualizadas na Figura 36.

Nas amostras de concreto asfáltico com ligante asfalto-borracha, a análise estatística mostra que o teor de ligante, volume de vazios e massa específica não trazem influências significativas na difusividade térmica para nenhum dos três métodos utilizados. Encontrou-se, para o Método Experimental um desvio padrão médio de $5,87 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$, logo temos um intervalo de confiança para a difusividade térmica entre $4,21 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $5,39 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. Para a difusividade térmica calculada através do Método de Campbell temos um desvio padrão médio de $6,00 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$, assim temos um intervalo de confiança entre $4,05 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $5,26 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. Ao analisar a difusividade térmica para o Método do Problema Inverso, encontramos um desvio padrão médio de $6,17 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$, conseqüentemente temos um intervalo de confiança para o valor de α entre $3,91 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $5,14 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$.

A análise estatística para as amostras de concreto de cimento de concreto Portland apresenta resultados em que a massa específica não tem influência significativa na difusividade térmica para nenhum dos 3 métodos utilizados para o cálculo desse parâmetro. Para o Método Experimental temos um desvio padrão médio de $7,50 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$, logo o intervalo de confiança encontra-se entre $4,85 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $6,35 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. O desvio padrão médio para o Método de Campbell é de $8,09 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$, assim temos um intervalo de confiança para o α entre $4,67 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $6,28 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. Para a difusividade térmica pelo Método do Problema Inverso temos um desvio padrão médio de $7,82 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$, assim o intervalo de confiança encontra-se entre $4,54 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ e $6,10 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$.

5.4. RESUMO DOS RESULTADOS

Nas Tabelas 23, 24, 25, 26 e 27 apresenta-se um resumo dos resultados para as variáveis dependentes e as variáveis independentes

Tabela 23: Resumo dos resultados obtido para o calor específico

	<i>CAP</i>	<i>AP</i>	<i>AB</i>	<i>CCP</i>
<i>Teor de ligante (%)</i>	-----	-----	$C(AB) = -27,66L^2 + 441,23L - 652,84$	-----
<i>Volume de Vazios (%)</i>	-----	-----	-----	-----
ρ (kgm^{-3})	-----	$C(AP) = 120936 \rho^2 - 610213 \rho + 770754$	-----	-----
<i>Média (J kg⁻¹K)</i>	1048,77	1034,06	1032,17	1162,32
<i>Desvio padrão (J kg⁻¹K)</i>	86,31	75,95	129,91	113,80
<i>Intervalo de confiança (J kg⁻¹K)</i>	962,46 – 1135,08	958,11 – 1110,01	902,27 – 1162,08	1048,51 – 1276,12

Tabela 24: Resumo dos resultados obtido para a condutividade térmica

	<i>CAP</i>	<i>AP</i>	<i>AB</i>	<i>CCP</i>
<i>Teor de ligante (%)</i>	-----	-----	-----	-----
<i>Volume de Vazios (%)</i>	-----	-----	-----	-----
ρ (kgm^{-3})	-----	-----	-----	-----
<i>Média (Wm⁻¹°C)</i>	1,26	1,20	1,23	1,47
<i>Desvio padrão (Wm⁻¹°C)</i>	0,05	0,06	0,10	0,09
<i>Intervalo de confiança (Wm⁻¹°C)</i>	1,21 – 1,31	1,14 – 1,26	1,12 – 1,34	1,39 – 1,56

Tabela 25: Resumo dos resultados obtido para a difusividade térmica para o método experimental

	<i>Método Experimental</i>			
	<i>CAP</i>	<i>AP</i>	<i>AB</i>	<i>CCP</i>
<i>Teor de ligante (%)</i>	----	----	----	----
<i>Volume de Vazios (%)</i>	----	----	----	----
ρ (kgm^{-3})	----	$\text{DT(M)} = -9 \times 10^{-6} \rho^2 + 4 \times 10^{-4} \rho - 6 \times 10^{-4}$	----	----
<i>Média</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-7}$	4,84	4,66	4,80	5,60
<i>Desvio padrão</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-8}$	3,80	5,37	5,87	7,50
<i>Intervalo de confiança</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-7}$	4,46 - 5,22	4,08 - 5,23	4,21 - 5,39	4,85 - 6,35

Tabela 26: Resumo dos resultados obtido para a difusividade térmica para o método de Campbell

	<i>Método de Campbell</i>			
	<i>CAP</i>	<i>AP</i>	<i>AB</i>	<i>CCP</i>
<i>Teor de ligante (%)</i>	----	----	----	----
<i>Volume de Vazios (%)</i>	----	----	----	----
ρ (kgm^{-3})	----	$\text{DT(MC)} = -8 \times 10^{-5} \rho^2 + 4 \times 10^{-4} \rho - 5 \times 10^{-4}$	----	----
<i>Média</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-7}$	4,66	4,54	4,66	5,48
<i>Desvio padrão</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-8}$	4,08	5,77	6,00	8,09
<i>Intervalo de confiança</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-7}$	4,25 - 5,07	3,98 - 5,13	4,05 - 5,26	4,67 - 6,28

Tabela 27: Resumo dos resultados obtido para a difusividade térmica para o método do problema inverso

	<i>Método do Problema Inverso</i>			
	<i>CAP</i>	<i>AP</i>	<i>AB</i>	<i>CCP</i>
<i>Teor de ligante (%)</i>	-----	-----	-----	-----
<i>Volume de Vazios (%)</i>	-----	-----	-----	-----
ρ (kgm^{-3})	-----	$DT(PI) = -9 \times 10^{-5} \rho^2 + 4 \times 10^{-4} \rho - 6 \times 10^{-4}$	-----	-----
<i>Média</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-7}$	4,48	4,41	4,53	5,32
<i>Desvio padrão</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-8}$	3,63	6,13	6,17	7,82
<i>Intervalo de confiança</i> ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-7}$	4,12 – 4,84	3,79 – 5,01	3,91 – 5,14	4,54 – 6,10

Ao analisar os três métodos utilizados para os cálculos da difusividade conclui-se que o método que apresenta melhor praticidade é o método de Campbell. Sua resolução se torna mais simples por depender de variáveis mais acessíveis. O método experimental depende de variáveis que requerem cálculos, que podem ser de difícil determinação. O método do Problema Inverso é um método que envolve um grande número de cálculos. Requer primeiramente a resolução do problema direto, e após a resolução do problema inverso, tornando-se muito trabalhoso.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

A modelagem matemática tornou-se uma ferramenta essencial na melhoria do controle de processos e da qualidade de produtos, utilizados no dimensionamento de pavimentos. À medida que os modelos se tornam mais sofisticados, necessita-se de dados mais confiáveis das propriedades desses materiais. Pela grande influência da temperatura sobre os pavimentos e pela necessidade de propriedades térmicas mais confiáveis, desenvolveu-se nesse trabalho cálculos para a determinação de propriedades térmicas de diferentes materiais de pavimentação.

Esta pesquisa, experimental, estudou as propriedades térmicas de materiais de pavimentação, com diferentes tipos de ligantes, volume de vazios e teor de ligantes. Os materiais utilizados foram: 15 amostras de concreto asfáltico com ligante cimento asfáltico de petróleo (CAP), 15 amostras de concreto asfáltico com ligante asfalto-polímero (AP), 15 amostras de concreto asfáltico com ligante asfalto-borracha (AB) e 3 amostras de concreto de cimento Portland (CCP). As propriedades enfatizadas foram calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica.

Os resultados obtidos nos ensaios em laboratório, apresentados, analisados e interpretados nos capítulos anteriores, permitiram chegar às seguintes conclusões:

Os dados obtidos para o calor específico das misturas estudadas, a mistura preparada com o ligante AB possui um comportamento um pouco diferenciado das demais misturas (com CAP e com AP); tal comportamento pode estar associado ao próprio calor específico do ligante que contém 15% de borracha moída de pneus e/ou a natureza das medidas realizadas que por vezes levam a discrepâncias de valores, conforme demonstrado pelas barras de erro.

Através da análise de variância (ANOVA), utilizada para avaliar quais variáveis independentes influenciam na variável de resposta, conclui-se que as de massa específica, volume de vazios e teor de ligante, não trazem influências significativas na condutividade térmica.

Os resultados obtidos pelos 3 métodos (Experimental, Campbell e Problema Inverso) para o cálculo da difusividade térmica mostram resultados muito semelhantes, apresentando o mesmo comportamento da temperatura em função do tempo.

Ao analisar os três métodos utilizados para os cálculos da difusividade conclui-se que o método que apresenta melhor praticidade é o método de Campbell. Sua resolução se torna mais simples por depender de variáveis mais acessíveis. O método experimental depende de variáveis que requerem cálculos, que podem ser de difícil determinação. O método do Problema Inverso é um método que envolve um grande número de cálculos. Requer primeiramente a resolução do problema direto, e após a resolução do problema inverso, tornando-se muito trabalhoso.

Ao final desse trabalho, pode-se concluir que os objetivos propostos foram alcançados e os resultados encontrados estão de acordo com resultados apresentados pela literatura, sendo estes mais específicos em relação aos componentes da mistura, podendo contribuir para estudos posteriores que envolvam propriedades térmicas.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para continuidade da pesquisa, indicam-se:

- utilização dos valores encontrados para modelar a transferência de calor em pavimentos;
- utilizar instrumentação *in situ* para determinar os parâmetros c , k e α de materiais de pavimentação;
- analisar a resistência tipo “fio quente” nos valores medidos;
- verificar a importância da variação dos parâmetros encontrados na resposta temperatura de pavimentos através de simulação numérica;
- estudar as variáveis do concreto (vazios de ar incorporados, resistência, fator água cimento, etc.) nas propriedades térmicas do material;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pavimento de concreto- feito para durar**. Vídeo. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação do Ponto de Amolecimento de Materiais Betuminosos - Método do Anel e Bola: ABNT/MB-164/NBR 6560. Rio de Janeiro, 1972.

ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. **Curso de Física**. Vol.2 São Paulo: HARBRA, 1986.

ASPHALT INSTITUTE. Superpave – **Performance graded asphalt – binder specification and testing**. Lexington, Superpave Series N°.1 (SP – 1). 1994. 69p.

ASPHALT INSTITUTE. **HAM construction**. Lexington, Manual Series N°.22 (MS-22). 1998.

BERNUCCI, L. B.; LEITE, L. M.; MOURA, E. **Propriedades mecânicas em laboratório de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros**. 16° Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro – RJ, 2002.

BOULDIN, M.G.; ROWE, G.M.; SOUSA, J.B.; SHARROCK, M.J. **Mix Rheology - a Tool for Predicting the High Temperature Performance of Hot Mix Asphalt**. Applied Paving Technology, Reino Unido, 1994.

BRINGUEL, R. M.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. **Propriedades químicas e reológicas de asfalto modificado por copolímero EVA**. 3^o Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Salvados – BA, 2005.

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

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

COELHO, M. A. **Geografia do Brasil**. Vol.3 São Paulo: Moderna, 1990.

Confederação Nacional do Transporte. **Boletim Estatístico**. 2007 www.cnt.org.br. Acessado em 15/12/2007.

CORDEIRO, W. R.; LOPES, L. A. S.; PINTO, S.; VIEIRA, A. **Utilização de ligantes asfálticos modificados por borracha regenerada de pneus na pavimentação de rodovias**. Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro – RJ, 2005

CÔTÉ, J.; KONRAD, J. M. **Estimating the Thermal Conductivity of Pavement Granular Materials and Subgrade Soils**. Annual Meeting TRB, Washington 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos**: DNER. Rio de Janeiro, 1998, 242p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de pavimentos rígidos**: DNIT. Rio de Janeiro, 2 ed., 2005, 238p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de pavimentação**: DNIT. Rio de Janeiro, 3 ed., 2006, 278p.

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

FAXINA, A. L., SÓRIA. M. H. A., LEITE, L. F. M., BRETAS, R. E. S. **Efeito da temperatura sobre ligantes modificados com borracha de pneu e resíduo de óleo de xisto**. 36ª Reunião Anual de Pavimentação, Curitiba PR. 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION / U. S. DEPARTAMENTO OF TRANSPORTATION. **Superpave mixture design guide**. Washington. 2001, 18p.

FRITZEN, M. A. **Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimentos Asfálticos com Simulador de Tráfego na Rodovia Rio Teresópolis**. Trabalho de conclusão de curso mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

HAAS, R.; HUDSON, W. R. **Pavement Management Systems**. New York: McGraw Hill, 1978. 457p.

HARVEY, J. T. **Mix design compaction procedures for hot-mix asphalt concrete and robber-modified concrete mixture**. Berkeley. 1992. Dissertation (Doctor of Philosophy) – University of California at Berkeley. 450 p.

HUANG, H. Y. **Pavement Analysis and Design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 805p.

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

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

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

KREITH, F. **Princípio da transferência de calor**. 3ed. São Paulo. 1992.

LALWANI, S.; ABUSHIHADA, A.; HALASA A. **Reclaimed rubber-asphalt blends measurement of rheological properties to assess toughness, resiliency, consistency and temperature sensitivity**. Institute for Scientific Research, Kuwait, 1997.

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

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

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

MEMON, G. M.; FRANCO, C. **Polymer modified asphalt (pma) using roton donation and electron accepting technology**. Meirapav 4, Providence, Rhode Island, USA, 2005.

MOHSEIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. London: Gordon and Breach science Publishers, 1980. 407 p.

MONISMITH, C. L.; FINN F. N.; VALLERGA, B. A. A comprehensive asphalt concrete design system. **Asphalt concrete mix: development of more rational approaches**. Philadelphia; William Garter Jr., Ed, ASTM STP 1041, p. 39-71. 1989.

MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, Critérios de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Trabalho de conclusão do curso de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

NETO FILHO, C. L. D.; BERNUCCI, L. L. B.; JÚNIOR, J. L. F. **Avaliação de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha quanto à deformação permanente**. Universidade de São Paulo, XVIII ANPET- Congresso de pesquisa e ensino em transportes. Florianópolis, 2004.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A.; BRITO, L. A. T.; VIVIAN, J. **Modelos de estimativa de temperaturas de pavimentos: contribuição ao estudo de afundamentos nas trilhas de roda em corredores de ônibus de Porto Alegre**. 12^a Reunião de Pavimentação Urbana, Aracaju SE. 2003.

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

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

RODOLFO, M. P.; BALBO, J. T. **Modelagem de tensões em pavimentos de concreto submetidos a gradientes térmicos e cargas rodoviárias**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Laboratório de Mecânica de Pavimentos, São Paulo. 2000.

ROMA, W. N. L., **Fenômeno de Transporte para Engenharia**. São Paulo: RiMa, 2003.

SENÇO, de W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Vol.I São Paulo: Pini, 1997.

SILVA NETO, A. J.; MOURA NETO, F. D. **Problemas Inversos: conceitos fundamentais aplicações**. Ed. UERJ, Rio de Janeiro. 2005.

SHIOZAWA, S.; CAMPBELL, G. S. **Soil Thermal Conductivity “Remote Sensing Reviews”**. 1990, Vol. 5(1), pp. 301-310.

SPECHT, L. P., **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2004.

SPECHT, L. P. **Notas de aula da disciplina de Rodovias II**, curso de Engenharia Civil, UNIJUÍ, 2007.

TAYBALI, A. A.; MALPASS, G. A.; KOSLA, N. P. (1998) Effect of mineral filler type and amount on design and performance of asphalt concrete mixtures. Transportation Research Board, n. 1609. Washington. P. 36-43.

TERTULIANO, G.; GUIMARÃES, G. N. **Mecanismos de transferência de esforços cisalhantes em juntas de pavimento rígido.** 36ª Reunião Anual de Pavimentação, p. 1-10, Curitiba PR. 2005.

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.

VILLELA, A. R. A.; MARCON, A. F. **Análise do desempenho de pavimentos de trechos de rodovias do sul de Santa Catarina.** 35ª Reunião Anual de Pavimentação, p. 1-12, Rio de Janeiro RJ. 2004.

WAHHAB, H. I. A.; ASI, I. M.; RAMADHAN, R. H. **Modeling resilient modulus and temperature correction for Saudi roads.** Journal of Materials in Civil Engineering, 2001.

WALSH, I. D.; SHRUBSOLE, P. **The effect of different aggregates on the durability of asphalt measured by the saturated ageing tensile stiffness test.** Senior Consultant, Jacobs Babbie, Aylesford, Kent- Reino Unido - UK. 200?.

WOLFE, R. K.; BRIAN, W. R.; COLONY, D. C. Standardized elastic moduli pavement layers for overlay design. **Journal of transportation engineering.** Washington, ASCE, v21, n.2, p.221-232. 1995.

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

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](#)