

Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligantes

Luciano Pivoto Specht, Professor do Mestrado em Modelagem Matemática / UNIJUI, Rua do Comércio 3000, Ijuí, RS, specht@unijui.edu.br

Pedro A. Pereira Borges, Professor do Mestrado em Modelagem Matemática / UNIJUI, Rua do Comércio 3000, Ijuí, RS, pborges@unijui.edu.br

Liliane Hellmann, Mestranda em Modelagem Matemática / UNIJUI, Ijuí, RS.

Resumo

O aperfeiçoamento dos modelos matemáticos para análise do comportamento térmico e mecânico dos pavimentos aumenta a necessidade de se conhecer as propriedades dos materiais utilizados. Este trabalho tem como objetivos analisar métodos de cálculo da difusividade térmica e determinar o valor das propriedades térmicas (calor específico, condutividade e difusividade térmica) de concreto asfáltico preparado com diferentes tipos de ligantes. Amostras destes concretos foram aquecidas com monitoramento da temperatura em função do tempo. A difusividade térmica foi calculada por três métodos: Método Experimental, Equação Analítica de Campbell e pelo Método do Problema Inverso. Os resultados obtidos com os diferentes métodos são coerentes entre si e da mesma ordem de grandeza dos valores encontrados na literatura, mostrando que tais métodos podem ser utilizados para determinação das propriedades térmicas, com precisão, praticidade e custo reduzido. São apresentados também valores típicos das grandezas térmicas medidas para cada tipo de mistura.

Palavras-chave: *Propriedades térmicas. Concreto asfáltico. Projeto de pavimentos.*

Abstract

The improvement of mathematical models for analysis of the thermal and mechanical behavior of pavements increases the need to know the materials characteristics. This paper has as goal analyze methods to calculate thermal diffusivity and determine the thermal characteristics (specific heat, conductivity and thermal diffusivity) of hot mix asphalt prepared with different binder. Samples were warmed to data acquisition of the temperature variation by the time. The thermal diffusivity was calculated by three methods: Experimental, Campbell Analytical Equation and for the Inverse Problem Method. The results obtained with the different methods are in agreement and in according with the values found in the literature, showing that the analyzed methods can be used, with accurately, praticity and low cost, for determination of the thermal characteristics. It was presented too typical values of the thermal characteristics for the materials studied.

Keywords: *Thermal characteristics. Hot mix asphalt. Pavement design.*

1 Introdução

O transporte rodoviário interestadual e internacional de passageiros, no Brasil, é um serviço público essencial, responsável por uma movimentação superior a 140 milhões de usuários/ano. Para um país com uma malha rodoviária de aproximadamente 1,8 milhões de quilômetros, sendo apenas 146 mil pavimentadas (rodovias federais e estaduais), a existência de um sólido sistema de transporte rodoviário, tanto de carga quanto de passageiros é vital (ANTT, 2007). Estima-se que 61% das cargas e 95% dos passageiros transportados no Brasil se dêem por vias rodoviárias (CNT, 2006).

Os pavimentos flexíveis, utilizados em praticamente toda a malha pavimentada brasileira, podem ser definidos como estruturas multicamadas com a finalidade de suportar esforços oriundos do tráfego e resistir às ações do meio ambiente (HASS and HUDSON, 1978; YODER and WITCZAC, 1975; MEDINA e MOTTA, 2005). O desempenho de um pavimento é condicionado por um complexo conjunto de fatores, dentre eles as propriedades térmicas e mecânicas das camadas que o constituem.

Os mais severos defeitos que ocorrem em estruturas flexíveis se refletem no revestimento e permitem identificar dois modos distintos de solicitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material; e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes.

A análise de tensões e deformações em estruturas de pavimento como sistema de múltiplas camadas e a aplicação da teoria da elasticidade e do método dos elementos finitos deram ensejo à consideração racional das deformações resilientes no dimensionamento de pavimentos. Esta é a tendência observada a partir dos anos 60. Assim, cresceu em importância a obtenção dos parâmetros elásticos ou resilientes materiais envolvidos (YODER, 1959; PREUSSLER, 1986; HUANG, 1993; MEDINA, 1997; BROWN, 1997).

A rigidez das misturas asfálticas é altamente dependente da temperatura, podendo variar em até 10 vezes em um espectro de 45°C (PINTO, 1991; SPECHT, 2004; NAZARIAN e ALVARADO, 2006), o que torna indispensável a inclusão desta dependência no processo de análise estrutural (PRADEEP *et al.* 2005; ALKASAWNEH *et al.* 2007). Tal procedimento só é possível com a incorporação de modelos mais sofisticados e com o conhecimento das propriedades térmicas dos materiais envolvidos.

Para o cálculo dos efeitos térmicos sobre os pavimentos, as três propriedades mais importantes são o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica. A condutividade térmica é uma propriedade termofísica que descreve o fluxo de calor através do material, sob influência de um gradiente térmico. A difusividade térmica é a razão entre a capacidade de o material conduzir e armazenar energia térmica. Algumas pesquisas sobre a determinação de tais propriedades em materiais de pavimentação têm sido publicadas nos últimos anos: Mrawira e Luca (2006) pesquisaram a influência de agregados nas propriedades térmicas usando equipamentos sofisticados de laboratório e calcularam a difusividade com base em soluções analíticas da equação do calor; a influência da temperatura na verificação das respostas mecânicas do pavimento pode ser encontrada em (WOLFE, *et al.* 1995; PRADEEP *et al.* 2005; ALKASAWNEH *et al.* 2007 e NAZARIAN e ALVARADO 2006). O projeto de pavimentos, no entanto, depende do conhecimento das propriedades de materiais locais, efetivamente utilizados nas obras, cujos parâmetros podem divergir dos dados da literatura, implicando em equívocos de dimensionamento, o que evidencia a demanda por métodos de rápida execução e de baixo custo para obtenção de tais parâmetros.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivos propor e analisar métodos de cálculo práticos e de baixo custo para a determinação das propriedades térmicas de misturas asfálticas, bem como avaliar a influência do teor de ligante, volume de vazios e massa específica na variação dessas propriedades.

2 Materiais e métodos

Os valores das propriedades térmicas foram determinados através da medida da temperatura em um intervalo de tempo. A massa e o calor específicos foram determinados diretamente a partir de suas definições. A condutividade térmica foi calculada através de um algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990) e a difusividade térmica por três processos: Método Experimental, Equação Analítica de Campbell *et al.* (1994) e pelo Método do Problema Inverso.

Quarenta e cinco amostras cilíndricas (semelhantes àquelas mostradas na Fig. 1) foram preparadas para os ensaios, sendo quinze de concreto asfáltico com ligante asfáltico de petróleo (CAP), quinze de concreto asfáltico com ligante asfalto-polímero (AP), quinze de concreto asfáltico com ligante de asfalto-borracha (AB). As amostras com CAP, AP e AB foram preparadas em cinco conjuntos (três amostras de mesma composição), com diferentes teores de ligantes (L), volume de vazios (V) e massas específicas (ρ). Todas as amostras foram preparadas no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI.



Figura 1: Amostras de concreto asfáltico

A Tabela (1) apresenta as características dos ligantes utilizados para preparo das amostras em concreto asfáltico e a Tab. (2) as características relativas à porcentagem de ligante (relação entre a massa de ligante e a massa total da mistura), volume de vazios (porcentagem de vazios de ar presentes na mistura) e dimensões das amostras em concreto asfáltico utilizadas; propriedades estas determinadas de acordo com Asphalt Institute, 1989. Os agregados utilizados são provenientes de rocha basáltica cuja massa específica é de 3,029g/cm³ e o ajuste granulométrico corresponde ao centro da faixa IVB do Instituto do Asfalto (Asphalt Institute, 1989).

Tabela 1: Características de ensaio das amostras de concreto asfáltico (CAP, AP e AB)

Propriedade	Método	CAP		AP		AB	
		Esp.	Res.	Esp.	Res.	Esp.	Res.
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	46 min.	48,6	60 - 85	66	50 - 70	60
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576	50 - 70	51	45 -80	70	25 - 75	54
Visc. Brookfield 135 °C	ASTM D4402-02	274 min.	317	850 - 3000	1115	---	---
Visc. Brookfield 150 °C		112 min.	164	2000 máx.	543	---	---
Visc. Brookfield 177 °C		57 a 285	69	1000 máx.	266	---	---
Ductibilidade 25 °C	NBR 6293	60 min.	>150	85 min.	93	---	---
Massa Específica (g cm ⁻³)	DNER - M 193/96	---	1,009	---	1,007	---	1,030

Tabela 2: Caracterização das amostras de concreto com ligante CAP, AP, AB e CCP

Amostra	Ligante (%)	Altura (cm)	Volume de Vazios (%)	Amostra	Ligante (%)	Altura (cm)	Volume de Vazios (%)	Amostra	Ligante (%)	Altura (cm)	Volume de Vazios (%)
CAP 1	5,00	6,04	6,64	AP 1	5,00	6,04	5,14	AB 1	5,50	6,25	6,43
CAP 2	5,00	6,15	6,58	AP 2	5,00	6,15	4,92	AB 2	5,50	6,29	6,30
CAP 3	5,00	6,09	6,86	AP 3	5,00	6,09	4,95	AB 3	5,50	6,31	7,00
CAP 4	5,50	6,08	5,16	AP 4	5,50	6,08	3,79	AB 4	6,00	6,24	5,13
CAP 5	5,50	6,09	5,13	AP 5	5,50	6,09	3,81	AB 5	6,00	6,27	5,54
CAP 6	5,50	6,09	4,89	AP 6	5,50	6,09	4,12	AB 6	6,00	6,28	5,38
CAP 7	6,00	6,09	3,50	AP 7	6,00	6,09	2,74	AB 7	6,50	6,25	4,60
CAP 8	6,00	6,07	3,39	AP 8	6,00	6,07	2,29	AB 8	6,50	6,27	4,35
CAP 9	6,00	6,02	4,03	AP 9	6,00	6,02	2,26	AB 9	6,50	6,28	4,38
CAP 10	6,50	6,03	2,42	AP 10	6,50	6,03	1,78	AB 10	7,00	6,30	3,34
CAP 11	6,50	6,10	1,96	AP 11	6,50	6,10	1,77	AB 11	7,00	6,28	3,07
CAP 12	6,50	6,03	2,05	AP 12	6,50	6,03	1,64	AB 12	7,00	6,29	3,36
CAP 13	7,00	6,08	1,55	AP 13	7,00	6,08	1,52	AB 13	7,50	6,32	2,79
CAP 14	7,00	6,13	1,79	AP 14	7,00	6,13	1,56	AB 14	7,50	6,34	2,54
CAP 15	7,00	6,14	1,87	AP 15	7,00	6,14	1,83	AB 15	7,50	6,28	2,47

Raio de todas as amostras: R = 5,10cm

Os experimentos de aquecimento e monitoramento da temperatura foram realizados no Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática da UNIJUI. As amostras foram aquecidas utilizando uma resistência elétrica (fonte de calor, Fig.2) conectada em uma fonte estabilizada. As medidas de temperatura foram obtidas através de um sistema de aquisição de dados composto por termopares modelo MTK – Tipo K-Universal, sensores de diâmetro de ± 1 mm, 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 tipo LR 7520, com 8 canais (permite o uso de até 8 sensores) de leitura de dados, que realiza até 10 leituras por segundo e um computador pessoal com processador PENTIUM 266 com 32MB de memória RAM.

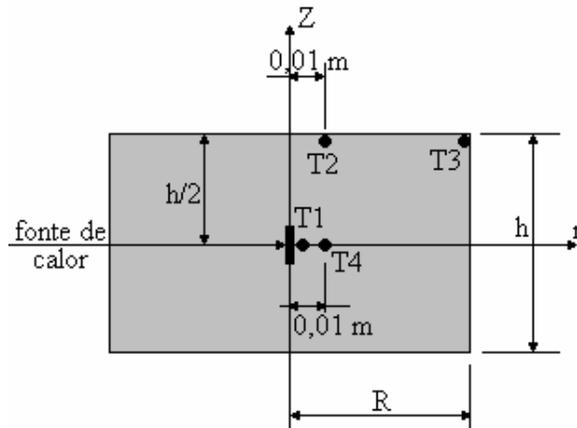


Figura 2: Amostra com localização dos termopares T1, T2, T3 e T4 e fonte de calor

Fez-se a determinação da incerteza nas medições de massa e temperatura, considerando-se os erros sistemáticos e erros randômicos, de acordo com a Eq. (1):

$$U_x = \sqrt{B_x^2 + P_x^2} \quad (1)$$

em que U_x é a incerteza de medida da grandeza x , B_x são os erros sistemáticos e P_x são os erros randômicos.

O erro sistemático na medida da massa (B_m) depende da exatidão do aparelho utilizado (balança analítica) que, neste caso, é de 10^{-3} g de acordo com a informação fornecida pelo fabricante. O erro randômico na medida de massa (P_m) foi considerado o desvio padrão de uma série de repetições de medidas de massa, obtendo-se o valor de 0,011467g. Substituindo-se os valores encontrados de P_m e B_m na Eq. (1), a incerteza na medida de massa foi de $U_m = 0,011511$ g.

O erro sistemático de temperatura (B_T) depende da exatidão do aparelho que, neste caso, significa a diferença em relação à medida padrão de temperatura (termômetro padrão) e o erro de leitura do sistema termopares-placas. Para avaliar esse erro realizou-se medidas de temperatura em copos com água no intervalo de 0 e 80°C, com os termopares e o termômetro padrão; desenvolveu-se uma equação de calibração para cada termopar, que leva em conta as diferenças em relação ao termômetro padrão e a influência da temperatura ambiente. O maior desvio padrão (entre todos os termopares utilizados) das medidas de temperatura em relação à curva de calibração, foi $\sigma_T = 1,6848^\circ\text{C}$. O erro máximo de escala do equipamento, conforme informação do fabricante, foi de 0,75% da medida lida. Considerando-se como temperatura máxima trabalhada de 100°C, o erro de escala é de 0,75°C; somando-se esses erros, obtém-se a incerteza referente aos erros sistemáticos de temperatura: $B_T = \pm 2,4348^\circ\text{C}$; o erro randômico na medida de temperatura (P_T) foi obtido através do cálculo do desvio padrão máximo da temperatura da água em experimentos repetidos, cujo valor encontrado foi de 1,00732°C; substituindo-se as incertezas P_T e B_T na Eq. 1, obtém-se a incerteza total das medidas de temperatura, de $U_T = \pm 2,6350^\circ\text{C}$.

Para determinar o calor específico, foi monitorada a temperatura em quatro pontos distintos (T1,T2,T3 e T4) durante 700s, aquecidas por uma fonte de calor (resistência elétrica), como indica a Fig. 2. A quantidade de calor produzida por esta resistência foi calculada pela Eq (2):

$$Q = P \Delta t \quad (2)$$

onde Q é a quantidade de calor (J), P é a potência da resistência elétrica e Δt é o intervalo de tempo (s).

O calor específico foi calculado pela equação de quantidade de calor em um corpo, que resolvida para o calor específico torna-se

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T_m} \quad (3)$$

onde C_p é calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), m é a massa da amostra (kg), ΔT_m é a variação da temperatura média ($^\circ\text{C}$).

A variação de temperatura média da amostra, para um tempo Δt , foi calculada através do teorema do valor médio da integral dupla de uma função de distribuição de temperatura $T(r,z)$, na forma de um parabolóide de revolução, de acordo com a Eq. (4).

$$\Delta T_m = \frac{1}{a} \int_0^{h/2} \int_0^R \left[A(r-R)^2 + B \left(z - \frac{h}{2} \right)^2 + T_o \right] dr dz \quad (4)$$

onde r e z são as variáveis espaciais (m), para um sistema de referência com origem no centro geométrico da amostra; a é a área de $1/4$ da seção reta da amostra (m^2); T_o é a temperatura ambiente ($^{\circ}C$); A e B são parâmetros de ajuste, h é a altura (m) e R é o raio (m) da amostra. Resolvendo a integral da Eq. (4), obtém-se a Eq.(5), cujos valores dos parâmetros A , B e T_o foram determinados fazendo um ajuste não linear pelo Método de Newton, com base nos dados experimentais, coletados pelos termopares T1, T2, T3 e T4.

$$\Delta T_m = \frac{1}{24a} (4AR^3h + BRh^3 + 12T_oRh). \quad (5)$$

A condutividade térmica foi calculada com base em um algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990), obtido a partir da solução analítica da equação de difusão do calor. A variação da temperatura é dada pela Eq. (6).

$$\Delta T = \frac{q^*}{4\pi} \ln(t - t_o) \quad (6)$$

onde ΔT é a variação de temperatura ($^{\circ}C$), q^* é o calor gerado pela fonte por unidade de tempo e comprimento (Wm^{-2}), k é a condutividade térmica ($Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$), t_o é uma correção no tempo usado para compensar os erros da dimensão finita da fonte de calor e t é tempo (adimensional) (SHIOZAWA e CAMPBELL, 1990).

O cálculo da condutividade térmica é feito considerando que a variação de temperatura é uma função linear de $\ln(t-t_o)$, como pode-se observar na Eq. (6). Ajustando os dados experimentais de ΔT em função de $\ln(t - t_o)$, pelo método dos mínimos quadrados, obtém-se o coeficiente angular S da reta

$$\Delta T = S \ln(t - t_o), \quad (7)$$

onde S é o coeficiente angular ($^{\circ}C$) obtido pelo ajuste.

Comparando as Eqs. (6) e (7), tem-se uma expressão para S , que resolvida para k , dá a expressão para o cálculo da condutividade térmica.

$$k = \frac{q^*}{4\pi S} \quad (8)$$

A difusividade térmica foi obtida através de três métodos: Método Experimental, Método Analítico de Campbell *et al.* (1991) e pelo Método do Problema Inverso.

No Método Experimental a difusividade térmica foi calculada a partir da definição (Eq. 9), usando os valores da condutividade térmica, da massa específica e do calor específico de cada amostra, obtidos experimentalmente.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (9)$$

onde α é a difusividade térmica (m^2s^{-1}), k é a condutividade térmica ($W m^{-1}^{\circ}C^{-1}$), ρ é a massa específica (kgm^{-3}) e C_p é o calor específico ($J kg^{-1}^{\circ}C^{-1}$).

No Método Analítico a difusividade foi calculada a partir da Eq. (10) proposta por Campbell *et al.* (1991).

$$\alpha = \frac{d^2}{4t \ln \left(\frac{4\pi k \Delta T}{q} \right)} \quad (10)$$

onde α é a difusividade térmica (m^2s^{-1}), d é a distância da fonte ao ponto onde foram realizadas as medidas de temperatura (m); k é a condutividade térmica ($W m^{-1}^{\circ}C^{-1}$); t é o tempo (s), ΔT é a variação da temperatura ($^{\circ}C$) e q é o fluxo de calor por unidade de comprimento (Wm^{-1}).

O problema direto de transferência de calor nas amostras simula as condições experimentais descritas anteriormente, com uma fonte de calor no centro da amostra e temperatura ambiente homogeneamente distribuída em cada fronteira. Foi utilizada a equação de condução do calor em coordenadas cilíndricas, duas dimensões, com origem do sistema de referência espacial no centro da amostra (Fig.2). Neste caso, o problema é de eixo simétrico e foi modelado matematicamente pelas Eqs. (11) a (14).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{k} g \text{ para } 0 < r < R, 0 < z < h/2 \text{ e } t > 0 \quad (11)$$

$$T(R, z, t) = T_{amb}(t), \text{ para } t > 0 \quad (12)$$

$$T(r, h/2, t) = T_{amb}(t), \text{ para } t > 0 \text{ e} \quad (13)$$

$$T(r, z, 0) = T_o, \text{ para } 0 < r < R. \quad (14)$$

onde T é a temperatura (°C), α é a difusividade térmica (m^2s^{-1}), g é a fonte de calor, dada pela potência da resistência elétrica ($Wm^{-1}s^{-1}$), T_{amb} é a temperatura ambiente (°C), T_o é a temperatura inicial (°C), R é o raio da amostra (m), k é a condutividade térmica ($Wm^{-1} °C^{-1}$), g é a potência da fonte de calor ($Wm^{-1} s^{-1}$) e z são as variáveis espaciais (m) e t é o tempo (s).

A solução do problema direto foi implementada numericamente usando o Método das Diferenças Finitas, com esquema explícito de avanços temporais, considerando conhecidos todos os parâmetros e condições de fronteira. A solução do problema inverso consiste em determinar a difusividade térmica, estimando valores dessa propriedade e resolver o problema direto, de tal forma que a diferença entre as temperaturas calculadas e medidas nos pontos monitorados seja minimizada. Para resolver o problema inverso foi utilizado o Método de Procura em Rede (SILVA NETO, 2005), que consiste nos seguintes passos:

1º. Passo: Estimar um intervalo de valores de α , $I_1 = [\alpha_{min1}, \alpha_{max1}]$, considerando que nele esteja a difusividade ótima (α_{ot}). Dividir este intervalo em n-1 sub-intervalos de modo que $\Delta\alpha = (\alpha_{max1} - \alpha_{min1}) / (n-1)$, onde $\alpha_1 = \alpha_{min1}$ corresponde a $n=1$, $\alpha_2 = (\alpha_1 + \Delta\alpha)$ a $n=2$, ..., e α_n a n.

2º. Passo: Calcular o Problema Direto com os valores α estimados, o que resulta em n soluções T(r,z,t) e particularmente a temperatura estimada $T_{est}(r_j, z_j, t)$, onde $j = 1, \dots, 4$, são os pontos monitorados e t é o tempo, em segundos.

3º. Passo: Calcular as diferenças entre as soluções estimadas e os dados experimentais:

$$d_i = \sum_{j=1}^4 \sum_{t=0}^{t_f} (T_{est}(t) - T_{exp}(t))_j^2, \text{ onde } i=1,2,3 \dots n, T_{exp} \text{ são as temperaturas obtidas experimentalmente e } t_f$$

é o tempo final.

4º. Passo: Identificar o menor valor de d (d_{min}), entre as diferenças d_i . Esta diferença corresponde ao α_{ot1} para o intervalo I_1 .

5º. Passo: Refinamento da solução. Definir um novo intervalo $I_2 = [\alpha_{min2}, \alpha_{max2}]$, tal que $\alpha_{min2} = \alpha_{ot1} - \Delta\alpha^1$ e $\alpha_{max2} = \alpha_{ot1} + \Delta\alpha^1$.

6º. Passo: Repetir os passos 2 a 5, estimando tantos intervalos I_m , $m = 1, 2, \dots$ até que

$$|d_{min}^{i+1} - d_{min}^i| < \varepsilon \text{ onde } \varepsilon \text{ é o parâmetro do critério de parada.}$$

3 Resultados

Para a análise dos resultados obtidos utilizou-se, além da interpretação dos dados tabulados e dos gráficos, a incerteza das medidas experimentais e técnicas estatísticas, de forma a avaliar a influência de cada uma das variáveis controláveis (V, L e ρ) nas variáveis de resposta (C_p , k e α). A análise da influência da incerteza das medidas experimentais, tanto de massa como de temperatura, no cálculo do calor específico e da difusividade térmica ficaram abaixo de 5% do valor destas propriedades, o que não interfere significativamente na análise de dependência destas, com as variáveis controláveis. 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. Para tanto utilizou-se o *software* Statistica for Windows (versão 4.3B).

Nos gráficos da Figuras 3, 4 e 5 os barras representam o desvio padrão de três medidas em três amostras diferentes.

3.1 Calor específico

As Figuras 3 e 4 apresentam as relações de dependência do calor específico em função do teor de ligante e da massa específica, respectivamente, para os três materiais; e na Tab. 3 os resultados sistematizados. As equações apresentadas (Tab. 3) são para aquelas variáveis que a análise estatística indicou correlação. Os resultados apresentados mostram que a mistura preparada com o ligante AB possui um comportamento diferenciado das demais misturas (com CAP e com AP). Tal comportamento está associado à relação entre o

calor específico dos concretos asfálticos com o respectivo ligante. Provavelmente, os calores específicos dos ligantes CAP e AP são menores do que os demais componentes destes concretos, ocorrendo o inverso para o ligante AB, o qual possui 15% de borracha. Assim, o aumento do teor de ligante nos concretos CAP e AP diminui o valor do calor específico dessas misturas e aumenta o valor dessa propriedade no concreto AB.

A Tabela 3 apresenta ainda um intervalo de valores do calor específico para cada mistura testada; daí obtém-se também um único valor típico para concretos asfálticos (média global de todas as amostras) de $1038,33 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

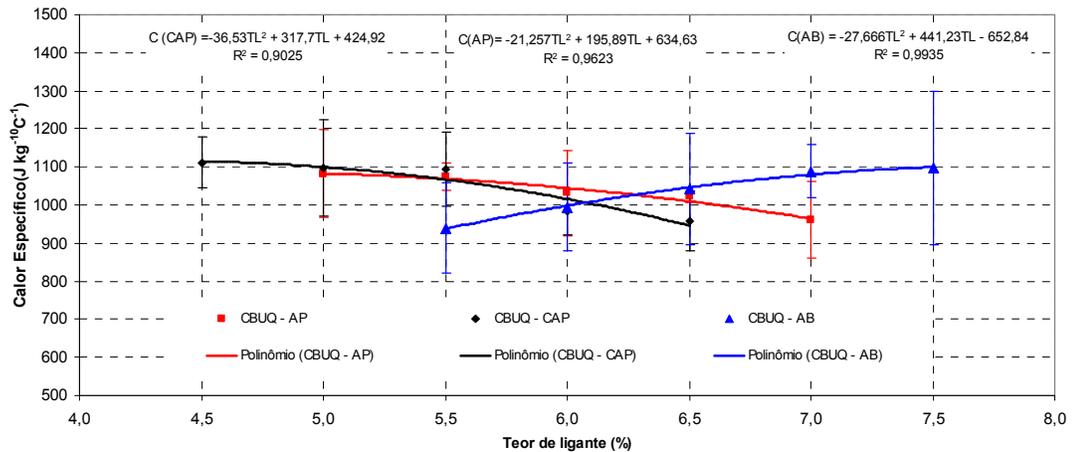


Figura 3: Relação do calor específico em função da variação do teor de ligante

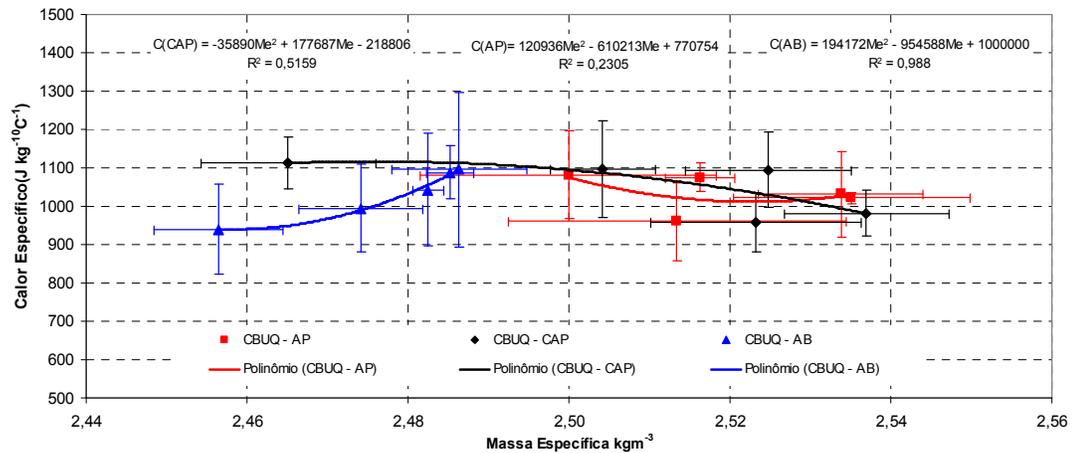


Figura 4: Relação do calor específico em função da variação da massa específica

Tabela 3: Resumo dos resultados obtidos para o calor específico

	CAP	AP	AB
Teor de ligante (%)	sem correlação	sem correlação	$C_p(AB) = -27,66 L^2 + 441,23 L - 652,84$
Volume de Vazios (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Massa Específica (kgm^{-3})	sem correlação	$C_p(AP) = 120936 \rho^2 - 610213 \rho + 770754$	sem correlação
Média ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	1048,77	1034,06	1032,17
Desvio padrão ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	86,31	75,95	129,91
Intervalo de confiança ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	962,46 – 1135,08	958,11 – 1110,01	902,27 – 1162,08

3.2 Condutividade térmica

Os resultados de condutividade térmica estão apresentados na Tab 4, os quais indicam que as amostras apresentam comportamento semelhante, para os 3 tipos de ligantes estudados (CAP, AP e AB). A análise estatística dos resultados mostrou que as variáveis independentes (V, L e ρ) não influenciam significativamente a condutividade térmica das amostras estudadas, como mostra o baixo desvio padrão. O valor característico de k encontrado para concretos asfálticos é de $1,23 \text{Wm}^{-1} \text{°C}$.

Tabela 4: Resumo dos resultados obtidos para a condutividade térmica

	CAP	AP	AB
Teor de ligante (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Volume de Vazios (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Massa Específica (kgm^{-3})	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Média ($\text{Wm}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	1,26	1,20	1,23
Desvio padrão ($\text{Wm}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	0,05	0,06	0,10
Intervalo de confiança ($\text{Wm}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	1,21 – 1,31	1,14 – 1,26	1,12 – 1,34

3.3 Difusividade térmica

Para a análise estatística dos resultados, relacionou-se a difusividade térmica, calculada pelos três métodos, (Método Experimental, Método de Campbell e Método do Problema Inverso) em função das variáveis independentes (V, L e ρ) e os resultados estão apresentados na Tabela 5, 6 e 7, respectivamente. A única correlação estatisticamente válida (considerando nível de significância de 0,05) foi das misturas com AP relacionado à variável massa específica. A Fig. 5 apresenta tal dependência.

Os resultados obtidos pelos três métodos, para o cálculo da difusividade térmica, apresentaram resultados muito semelhantes e, portanto, todos eles podem ser utilizados para este fim. O método experimental é o mais simples com relação aos cálculos e abordagem teórica, mas apresenta o inconveniente de exigir a medida da massa e calor específicos. Os equipamentos e as medidas para os outros métodos são praticamente os mesmos, sendo que as diferenças ocorrem na implementação computacional das rotinas de cálculo. O Método de Campbell utiliza conceitos matemáticos mais simples (ajustes de curvas) do que o Método do Problema Inverso (resolução numérica de equações diferenciais e algoritmos de solução de sistemas não lineares), porém, o trabalho de organização e análise dos dados é semelhante, uma vez implementados os programas computacionais.

Os valores característicos de α foram $4,66 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ para as misturas com CAP e AB e $4,54 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ para as misturas com AP. Como valor característico do concreto asfáltico pode se adotar o valor de $4,62 \cdot 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Tabela 5: Resumo dos resultados obtidos para a difusividade térmica para o método experimental

	Método Experimental		
	CAP	AP	AB
Teor de ligante (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Volume de Vazios (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Massa Específica (kgm⁻³)	sem correlação	$DT(M) = -9 \times 10^{-6} \rho^2 + 4 \times 10^{-4} \rho - 6 \times 10^{-4}$	sem correlação
Média (m²s⁻¹) x10⁻⁷	4,84	4,66	4,80
Desvio padrão (m²s⁻¹) x10⁻⁸	3,80	5,37	5,87
Intervalo de confiança (m²s⁻¹) x10⁻⁷	4,46 – 5,22	4,08 – 5,23	4,21 – 5,39

Tabela 6: Resumo dos resultados obtidos para a difusividade térmica para o método de Campbell

	Método de Campbell		
	CAP	AP	AB
Teor de ligante (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Volume de Vazios (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Massa Específica (kgm⁻³)	sem correlação	$DT(MC) = -8 \times 10^{-3} \rho^2 + 4 \times 10^{-4} \rho - 5 \times 10^{-4}$	sem correlação
Média (m²s⁻¹) x10⁻⁷	4,66	4,54	4,66
Desvio padrão (m²s⁻¹) x10⁻⁸	4,08	5,77	6,00
Intervalo de confiança (m²s⁻¹) x10⁻⁷	4,25 – 5,07	3,98 – 5,13	4,05 – 5,26

Tabela 7: Resumo dos resultados obtidos para a difusividade térmica para o método do problema inverso

	Método do Problema Inverso		
	CAP	AP	AB
Teor de ligante (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Volume de Vazios (%)	sem correlação	sem correlação	sem correlação
Massa Específica (kgm⁻³)	sem correlação	$DT(PI) = -9 \times 10^{-5} \rho^2 + 4 \times 10^{-4} \rho - 6 \times 10^{-4}$	sem correlação
Média (m²s⁻¹) x10⁻⁷	4,48	4,41	4,53
Desvio padrão (m²s⁻¹) x10⁻⁸	3,63	6,13	6,17
Intervalo de confiança (m²s⁻¹) x10⁻⁷	4,12 – 4,84	3,79 – 5,01	3,91 – 5,14

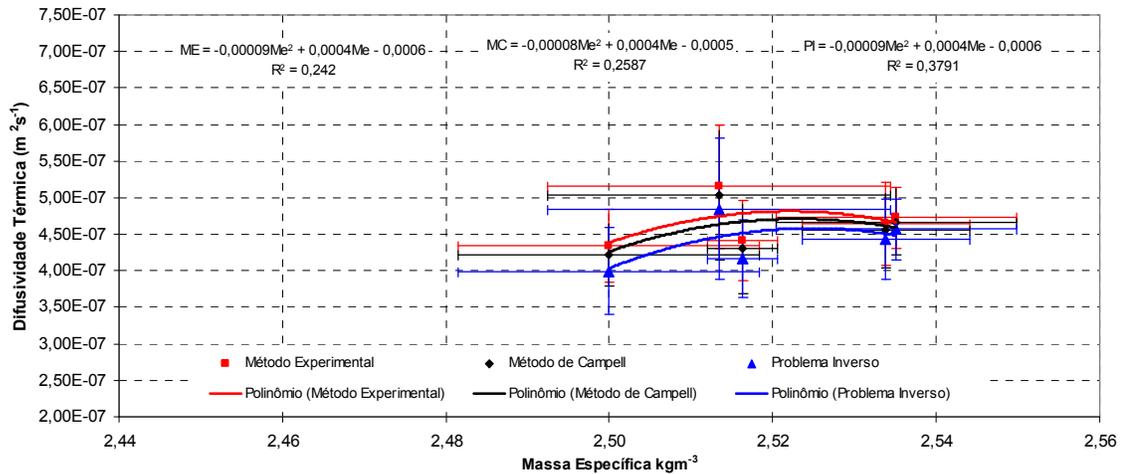


Figura 5: Relação entre a difusividade térmica e a massa específica da mistura de concreto asfáltico com ligante AP

4 Conclusões

Esta pesquisa propôs e analisou métodos para a determinação das propriedades térmicas de concreto asfáltico para pavimentação, bem como avaliou a influência de diferentes tipos de ligantes, volume de vazios, teor de ligantes e massas específicas.

Os dados obtidos para o calor específico denotam 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 à relação entre o calor específico do ligante com os demais elementos da mistura.

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, para o intervalo de variação pesquisado, influências significativas na condutividade térmica.

Os resultados obtidos pelos 3 métodos (Experimental, Campbell e Problema Inverso) para o cálculo da difusividade térmica apresentam resultados muito semelhantes e, portanto, todos eles podem ser utilizados para este fim.

Os resultados encontrados estão de acordo com os resultados apresentados pela literatura (conforme apresentado na Tab. 8), sendo estes mais específicos em relação aos componentes da mistura, podendo contribuir para estudos posteriores que envolvam propriedades térmicas.

As técnicas experimentais utilizadas mostram-se práticas e eficientes para o cálculo das propriedades térmicas e podem, com facilidade, ser utilizadas para a caracterização de outros materiais como compósitos, isolantes térmicos, materiais de construção civil etc.

Tabela 8: Valores encontrados na literatura a respeito das propriedades de materiais

Autor	Materiais	ρ (kgm ⁻³)	C_p (Jkg ⁻¹ °C ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	α (m ² s ⁻¹) · 10 ⁻⁷
Barber (1957) ⁽¹⁾	MA	-----	920	-----	-----
Willianson (1976) ⁽¹⁾	Concreto de Cimento Portland	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 (2005)	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)	Mistura Asfáltica	2442	-----	-----	-----
Luca e Mrawira (2005)	Mistura Asfáltica	2250 - 2450	1475 - 1835	1,45 - 1,81	4,03 - 5,50
Mrawira e Luca (2006)	Mistura Asfáltica	2420 - 2410	1480 - 2000	1,91 - 2,01	4,10 - 5,40
Esta pesquisa e Helmann (2008)	Mistura Asfáltica com CAP	2511	1049	1,26	4,66
	Mistura Asfáltica com AP	2520	1034	1,20	4,54
	Mistura Asfáltica com AB	2477	1032	1,23	4,66
	Mistura Asfáltica (em geral)	2502	1038	1,23	4,62

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

⁽²⁾ dados calculados a partir dos resultados do autor pela equação 1.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Disponível em:

<<http://www.antt.gov.br/passageiro/apresentacaopas.asp>>. Acesso em: 3 set. 2007.

ALKASAWNEH, W. *et al.* Effect of temperature variation on pavement responses using 3D multilayered elastic analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, Delft, v. 8, n. 3, p. 203-212, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperature using rotational viscometer. D4402-02. In: ANNUAL book of ASTM Standards. Philadelphia, 2002. v 4.03.

ASPHALT INSTITUTE. *Asphalt handbook*. Lexington, 1989. (Manual Series N°. 4 MS-4).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *MB-164/NBR 6560*: determinação do ponto de amolecimento de materiais betuminosos: método do anel e bola. Rio de Janeiro, 1972.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6576*: materiais betuminosos: determinação da penetração. Rio de Janeiro, 1998.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-1*: desempenho térmico de edificações - Parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *P-MB-167/NBR 6293*: determinação da ductilidade de materiais betuminosos. Rio de Janeiro, 1971.
- BROWN, S. F. Achievements and challenges in asphalt pavement engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS, 8., Nottingham. *Proceedings...* Nottingham: Keynote Address, 1997.
- CAMPBELL, G. S.; CALISSENDORFF, C.; WILLIAMS, J. H. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 55, p. 291-293, 1991.
- CAMPBELL, G. S. *et al.* Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 2, p. 307-313, 1994.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Pesquisa rodoviária CNT 2006*. Disponível em: <www.cnt.org.br>. Acesso em: 20 dez. 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos*: determinação da densidade e da massa específica: DNER – ME 193/96. Rio de Janeiro, 1996. 6 p.
- HAAS, R.; HUDSON, W. R. *Pavement management systems*. New York: McGraw Hill, 1978. 457 p.
- HELMANN, L. *Determinação de propriedades térmicas de materiais de pavimentação*. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática)-Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008.
- HUANG, H. Y. *Pavement analysis and design*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 805 p.
- INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 698 p.
- KREITH, F. *Princípio da transferência de calor*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher. 1992. 550 p.
- LUCA J.; MRAWIRA D. M. New measurement of thermal properties of superpave asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Miami, v. 17, n.1, p. 72-79, 2005.
- MEDINA, J. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. 570 p.
- MRAWIRA D. M.; LUCA J. Effect of aggregate type, gradation, and compaction level on thermal properties of hot-mix asphalts. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vancouver, v. 33, n. 11, p.1410-1417, 2006.
- NAZARIAN S.; ALVARADO G. Impact of temperature gradient on modulus of asphaltic concrete layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Miami, v. 18, n. 4, p. 492-499, 2006.
- NÚÑEZ, W. P. *et al.* Modelos de estimativa de temperaturas de pavimentos: contribuição ao estudo de afundamentos nas trilhas de roda em corredores de ônibus de Porto Alegre. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 12., 2003, Aracajú. *Anais...* Aracajú: ABPV, 2003. CD-ROM.
- PINTO, S. *Estudo de comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. 1991. 477 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- PRADEEP H. *et al.* Modelling constant displacement rate experiments of asphalt concrete using a thermodynamic framework. *International Journal of Pavement Engineering*, Delft, v. 6, n. 4, p. 241-256, 2005.
- PREUSSLER, E. S. A consideração da resiliência dos solos em projeto de pavimentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 8., 1986, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: ABMS, 1986. p. 70-82.

SHIOZAWA, S.; CAMPBELL, G. S. Soil thermal conductivity. *Remote Sensing Reviews*, London, v. 5, n. 1, p. 301-310, 1990.

SILVA NETO, A. J.; MOURA NETO, F. D. *Problemas inversos: conceitos fundamentais e aplicações*. Rio de Janeiro: UERJ, 2005. 172 p.

SPECHT, L. P. *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. 2004. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WOLFE, R. K.; BRIAN, W. R.; COLONY, D. C. Standardized elastic moduli pavement layers for overlay design. *Journal of Transportation Engineering*. Washington, DC, v. 21, n. 2, p. 221-232, 1995.

YODER, E. J. *Principles of pavement design*. London: John Wiley & Sons, 1959. 569 p.

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

SOBRE OS AUTORES

Luciano Pivoto Specht

Concluiu seu doutoramento no PPGEC/UFRGS em 2004. Atualmente é professor associado da UNIJUI em Ijuí-RS, atuando no curso de graduação em Engenharia Civil e no Mestrado em Modelagem Matemática. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Transportes/Geotecnia/Pavimentação, atuando principalmente nos seguintes temas: pavimentação, asfalto-borracha, concreto asfáltico, fibras e meio ambiente. É sócio da ABPV, ABMS e ANPET.. É tutor do grupo PET (Programa de Ensino Tutorial) do Curso de Engenharia Civil e membro do comitê científico da ANPET e da ABMS e do corpo de avaliadores do MEC/INEP.

Pedro Augusto Pereira Borges

Possui graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela UNIJUI (1983), Mestrado em Educação pela Universidade Estadual de Campinas (1988), Mestrado em Matemática pela UNIJUI (1997) e doutorado em Engenharia Mecânica pela UFRGS (2002). Atualmente é professor titular da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Tem experiência na área de Matemática, com ênfase em Matemática Aplicada. Atuando principalmente nos seguintes temas: Secagem, Métodos Numéricos, Equações Diferenciais Parciais.

Liliane Hellmann

Possui graduação em Ciências - Habilitação em Matemática pelo Centro Universitário Diocesano do Sudoeste do Paraná (2005) e Mestrado em Modelagem Matemática pela UNIJUI (2008) Atualmente é professora da Prefeitura Municipal de Francisco Beltrão – PR.