

MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTUDO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE UM SOLO ARGILOSO DURANTE A EXPOSIÇÃO AO FOGO SUPERFICIAL

João Henrique Corrêa Pinto*

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil

André Luís Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil

RESUMO

O artigo apresenta um estudo experimental sobre o comportamento da condutividade térmica de um solo argiloso do Distrito Federal (DF), submetido a gradientes de temperatura em profundidade, com o objetivo de contribuir para a compreensão dos efeitos térmicos provocados por incêndios superficiais no solo. Amostras de solo foram coletadas no Parque Ecológico do Paranoá, preparadas por compactação e expostas a um fluxo de calor transiente. Para monitorar o comportamento térmico, termopares foram instalados em diferentes profundidades das amostras, permitindo o registro contínuo da evolução da temperatura durante as fases de aquecimento e resfriamento. Os resultados revelaram variações significativas na condutividade térmica ao longo do tempo, associadas aos efeitos da redistribuição da umidade interna. Durante o aquecimento, a migração da umidade para regiões mais frias reduziu a condutividade térmica, enquanto o retorno da umidade ao centro do corpo de prova, durante o resfriamento, promoveu o aumento da condutividade. Os dados obtidos demonstram a relevância de se considerar os efeitos térmicos e a dinâmica da umidade na caracterização da condutividade térmica de solos expostos a incêndios superficiais.

PALAVRAS-CHAVE: Condutibilidade térmica, Difusividade térmica, Incêndio florestal superficial, Umidade induzida.

ABSTRACT

This article presents an experimental study on the thermal conductivity behavior of a clay soil from the Federal District (DF), subjected to temperature gradients in depth, aiming to contribute to the understanding of the thermal effects caused by surface fires on the soil. Soil samples were collected from the Paranoá Ecological Park, prepared through compaction, and exposed to a transient heat flux. Thermocouples were installed at different depths within the samples to continuously monitor temperature evolution during heating and cooling phases. The results revealed significant variations in thermal conductivity over time, associated with the effects of internal moisture redistribution. During heating, the migration of moisture to cooler regions reduced thermal conductivity, while the return of moisture to the center of the sample during cooling promoted an increase in conductivity. The data obtained highlight the importance of considering thermal effects and moisture dynamics when characterizing the thermal conductivity of soils exposed to surface fires.

KEYWORDS: Thermal conductivity, Thermal diffusivity, Surface forest fire, Induced moisture.

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais podem ocorrer de forma espontânea ou devido a ações ou omissões humanas (DCERJ, 2024), sendo classificados como desastres naturais frequentemente associados à redução significativa das precipitações hídricas

(CASTRO, 2003).

Os incêndios em vegetação podem ser classificados de acordo com o comportamento do fogo, sendo denominados incêndios florestais quando não controlados pelo homem e caracterizados por seu elevado poder destrutivo (TORRES et al., 2020). Diferenciam-se do fogo

*Autor correspondente: jhfisica@gmail.com



utilizado de forma planejada para diversos fins, como controle de pragas, redução de material combustível, prevenção de grandes desastres ou fins científicos, desde que devidamente planejado, denominado queima controlada (BRASIL, 2024).

Quando o fogo está fora de controle, ele pode se propagar de maneira superficial, subterrânea ou de copa. Segundo Soares e Batista (2007), os incêndios superficiais ocorrem a partir do piso florestal, propagando-se pelo material combustível até uma altura de 1,80 m. Esses incêndios são comumente associados às origens de grandes incêndios, sendo também os mais frequentemente observados devido à facilidade de detecção (SETZER e FERREIRA, 2023).

Por outro lado, os incêndios subterrâneos ocorrem abaixo da superfície, em solos com grande acúmulo de matéria orgânica, húmus ou turfas – material comumente presente em áreas alagadiças, brejos, manguezais e pântanos (TORRES et al., 2020). Esses incêndios são difíceis de detectar, produzem pouca fumaça e são desafiadores para combater, causando grandes danos às raízes e à fauna do solo (SOARES e BATISTA, 2007).

Finalmente, os incêndios de copa atingem combustíveis florestais acima de 1,80 m e normalmente se originam de incêndios superficiais, exceto em casos de descargas atmosféricas ou falhas em sistemas elétricos (SCHUMACHER e SCHUMACHER, 2018). A propagação desses incêndios é influenciada pelos ventos e pela continuidade vertical dos combustíveis e horizontal das copas das árvores (SOARES e BATISTA, 2007).

Os incêndios superficiais são capazes de promover alterações nas propriedades do solo devido à exposição a altas temperaturas, resultando em aumento da repelência à água e diminuição da capacidade de infiltração (ALMEIDA et al., 2016).

A movimentação de brigadistas em áreas alagadiças é lenta, dificultando as atividades de combate e aumentando o risco de acidentes, que podem ser fatais em alguns casos (G1, 2019). Além disso, viaturas de combate a incêndios, devido ao seu peso, podem ter sua mobilidade limitada em determinados solos, tornando-se suscetíveis a danos, como observado em um caso relatado pelo G1 (2015), em que viaturas do CBMDF foram consumidas pelo fogo durante um atendimento em uma região de incêndio florestal.

A forma e a intensidade com que os solos do DF variam sua temperatura em camadas inferiores à superfície quando expostos a incêndios florestais

são parâmetros importantes para prever alterações em suas propriedades hidráulicas, microbiológicas, mineralógicas e, especialmente, em sua resistência mecânica e térmica.

Os solos são considerados meios trifásicos, combinando frações de material mineral com espaços vazios preenchidos por gases e água (PINTO, 2006). Essas características levam a uma propagação dinâmica da energia térmica, influenciada por diversas configurações de solo. Assim, observou-se que os solos do Distrito Federal são ainda pouco estudados sob o ponto de vista térmico quando submetidos a incêndios florestais superficiais – lacuna que este trabalho pretende explorar.

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo geral investigar o comportamento da condutividade térmica de um solo natural do Distrito Federal (DF) submetido a um gradiente de temperatura em profundidade, simulando a passagem de incêndios superficiais.

De forma específica, busca-se:

- caracterizar as propriedades térmicas de uma amostra de solo natural do DF, a partir de gradientes de temperatura em profundidade sob fluxo de calor transiente;
- identificar o comportamento da condutividade térmica do solo durante os períodos de aquecimento e resfriamento;
- avaliar a conformidade dos resultados experimentais obtidos com valores descritos na literatura.

2. REFERENCIAL TÉORICO

2.1 Influência do fogo em solos

O fogo superficial interage de diversas formas com as camadas do solo, onde sua intensidade pode afetar a fração orgânica, a porosidade e a taxa de infiltração, aumentando, assim, a suscetibilidade da região à erosão hídrica (CASSOL et al., 2004), um processo caracterizado pelo transporte de sedimentos de matrizes coesas de solo a jusante (MINELLA et al., 2017).

Outros impactos negativos associados aos incêndios em camadas superficiais do solo incluem a destruição da cobertura vegetal protetora em áreas florestais, uma perda significativa de carbono e nitrogênio, além da redução na capacidade de infiltração, o que pode desencadear deslizamentos de terra, colapsos e erosões causadas tanto pelo vento quanto pela água, resultando em aumento do

escoamento superficial e transporte de sedimentos para corpos d'água adjacentes (ERICKSON e WHITE, 2008).

Em condições de estresse hídrico, Montagnoli et al. (2017) evidenciaram o deslocamento do crescimento de raízes finas (menores que 2 mm) da espécie *Fagus sylvatica* L. em florestas de *Pinus* na Europa para camadas mais profundas, bem como a perda dessas raízes em camadas superficiais, devido à passagem de incêndios florestais, em busca de maior disponibilidade de nutrientes.

Pivello e Coutinho (1992) estimaram que o tempo de reposição dos nutrientes perdidos durante queimadas varia conforme o mineral em questão. O estudo mostrou que, em média, para os teores de fósforo (P), enxofre (S), cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg), um intervalo de três anos entre as queimadas seria adequado para iniciar a reciclagem de nutrientes, evitando o empobrecimento crítico do solo e garantindo a manutenção do ecossistema.

Outra área de estudo importante em solos afetados por incêndios é a sua resposta hidráulica. Pesquisas indicam que os incêndios florestais reduzem a quantidade de matéria orgânica nas camadas mais superficiais, alterando a proporção de argila e silte (STOOF, 2011), o que resulta em uma menor retenção de água em comparação a solos não atingidos por incêndios (ALMEIDA et al., 2016).

2.2 Comportamento térmico do solo em profundidade

No âmbito das propriedades físicas dos materiais, as constantes térmicas desempenham um papel essencial na resposta à energia incidente de fontes externas, por meio de processos de absorção, condução e irradiação de calor, resultando em variações de temperatura nos materiais analisados (OLIVEIRA, 2015).

Os solos são caracterizados como meios trifásicos, compostos por frações de sólidos, ar e água (PINTO, 2006), e essas três fases, quando combinadas, são determinantes para as suas propriedades físicas (SILVA, 2012). A condutividade térmica, a difusividade térmica e a capacidade calorífica específica são as propriedades mais relevantes para o estudo do comportamento térmico dos solos quando submetidos a gradientes de temperatura (SANTOS, 2010).

Alguns estudos buscaram estimar o comportamento térmico dos solos a partir de uma

fonte de calor ambiental, considerando variações temporais associadas ao movimento da Terra. Zimmer (2017) caracterizou as variações de temperatura em diversos tipos de solo nos primeiros 15 cm de profundidade ao longo de um ano, observando um comportamento periódico, com máximos e mínimos de temperatura dependentes das estações do ano.

Foi identificado que o atingimento desses extremos térmicos ao longo da profundidade do solo está associado a uma inércia térmica entre diferentes regiões. A difusividade térmica, que caracteriza essa latência, pode ser definida conforme a equação a seguir (DUARTE, 2004):

$$D = \frac{K}{c_v} = \frac{K}{c_g \cdot \rho_d}, \quad (1)$$

onde, é a difusividade térmica (m^2/s) e K é a condutividade térmica do solo ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), c_v é o calor específico volumétrico ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), c_g é o calor específico gravimétrico ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e ρ_d é a densidade do solo natural ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Considerando que o solo é um meio poroso trifásico, o calor específico volumétrico é influenciado pelas frações gravimétricas dessas três fases: sólida, líquida e gasosa (PREVEDELLO e ARMINDO, 2015). Devries e Van Qijk (1963) propuseram uma estimativa para o calor específico volumétrico, considerando as contribuições dessas três fases, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} c_{v(\text{sol})} \\ = c_{g.m} \cdot f_{g.m} \cdot \rho_{g.m} + c_{g.ag} \cdot f_{g.ag} \cdot \rho_{ag} \\ + c_{g.ar} \cdot f_{g.ar} \cdot \rho_{ar}, \end{aligned} \quad (2)$$

onde, c_v é o calor específico volumétrico do solo ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), $c_{g.m}$, $c_{g.ag}$ e $c_{g.ar}$ são os calores específicos gravimétricos ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), $\rho_{g.m}$, ρ_{ag} e ρ_{ar} são, respectivamente, as massas específicas das partículas minerais, das partículas da água e do ar do solo ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$); e $f_{g.m}$, $f_{g.ag}$ e $f_{g.ar}$ são, respectivamente, as frações volumétricas das partículas minerais, da água e do ar do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Na Tabela 1 (Anexo), apresentam-se valores típicos do calor específico, da condutividade e da difusividade térmica de alguns materiais.

Assim, a capacidade calorífica é uma propriedade dependente da origem mineralógica dos constituintes do solo, combinada com o teor de umidade, a macro e microestrutura dos poros, e o estado de agregação e compactação do solo

(BRADY e WEIL, 2008).

A transmissão de calor no solo por unidade de área ocorre predominantemente por condução, sendo fortemente influenciada pela umidade do solo (PREVEDELLO e ARMINDO, 2015), e pode ser modelada pela equação de Fourier, que é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura em função da variação espacial, por meio de uma constante denominada condutividade térmica:

$$\phi = -K \cdot \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3)$$

onde, ϕ é o fluxo de calor no solo por unidade de área ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), K é a condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$), T é a temperatura (K) e z é a profundidade da superfície do solo (m).

O sinal negativo indica que o fluxo de calor se dá do ponto de maior temperatura para o ponto de menor temperatura (HORTON e WIERENGA, 1984).

Para a estimativa dessas propriedades físicas do solo, diversos métodos já foram utilizados por pesquisadores, sendo a maioria fundamentada em condições naturais e ambientais.

2.3 Métodos numéricos para solução da equação do calor

O método das diferenças finitas centradas no ponto médio é uma técnica amplamente utilizada na resolução numérica de equações diferenciais parciais (EDPs), especialmente na modelagem de problemas de propagação de calor. Esse método consiste em discretizar as derivadas de uma variável contínua, aproximando o comportamento de sistemas físicos, como o fluxo de calor, em uma malha de pontos discretos.

De acordo com Burden e Faires (2011), o método das diferenças finitas é uma ferramenta robusta para a solução numérica da equação do calor, que é governada pela equação diferencial parcial:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

onde, T é a temperatura, x é a posição, e D é a difusividade térmica do material. A aproximação da segunda derivada da temperatura em relação à posição pode ser feita utilizando a formulação centrada no ponto médio. Segundo Chapra (2018), a aproximação das diferenças finitas para a segunda derivada, no ponto i , é dada por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (5)$$

Nesse esquema, a equação é aproximada utilizando os pontos adjacentes à posição i , proporcionando uma solução mais estável e precisa para o cálculo do gradiente de temperatura.

Segundo Patankar (1980), o uso da formulação centrada no ponto médio para resolver a equação do calor é particularmente vantajoso em problemas com condições de contorno bem definidas, pois garante precisão de segunda ordem tanto no tempo quanto no espaço. Isso significa que, à medida que o espaçamento da malha Δx e o passo de tempo Δt se tornam menores, o erro da solução numérica diminui de forma quadrática, assegurando que a solução se aproxime da solução exata.

Dessa forma, a aplicação do método das diferenças finitas centrada no ponto médio para a solução da equação de condução de calor em meios contínuos demonstra-se eficaz na modelagem de problemas complexos relacionados à propagação térmica. Autores como Incropera e DeWitt (2014) destacam que esse método é uma das abordagens numéricas mais utilizadas em modelagens de transferência de calor, permitindo a obtenção de soluções interativas, estáveis e precisas para uma ampla variedade de materiais e condições de contorno.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os materiais e métodos utilizados para determinar os gradientes de temperatura em profundidade, a partir de uma fonte superficial de calor, em três corpos de solo compactados.

3.1 Área de estudo

A área selecionada para a análise das propriedades térmicas do solo foi uma localidade dentro do Parque Ecológico do Pinheiral, situado na região administrativa do Paranoá-DF (Figura 1). Essa área é caracterizada pelo cultivo de uma floresta não nativa de *Pinus* e está localizada nas coordenadas geográficas de 15,764548° S de latitude e 47,771703° O de longitude.

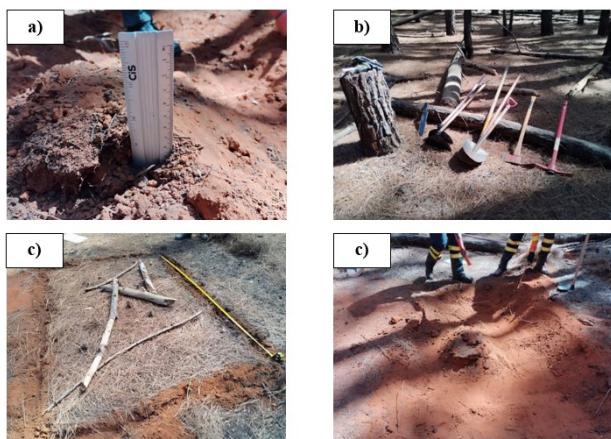


Figura 1 – Caracterização da área de estudo: a) marcação de nível de 20 cm de profundidade, b) ferramentas utilizadas, c) delimitação da área de estudo (3x2m), d) escavação para retirada das amostras deformadas.

Fonte: Os autores.

A área delimitada para a retirada das amostras deformadas foi uma região frequentemente acometida por incêndios florestais, onde se observou uma grande quantidade de árvores tombadas com diversas marcas de queima em suas estruturas.

3.2 Sensores térmicos utilizados

Os termopares utilizados são compostos por condutores unidos por meio de soldas que, a partir da diferença de temperatura, geram uma diferença de potencial entre os condutores. Com base nas propriedades conhecidas desses elementos, essa diferença de potencial é proporcional à temperatura. Os dados coletados foram processados por um receptor de dados, conforme ilustrado na Figura 2.

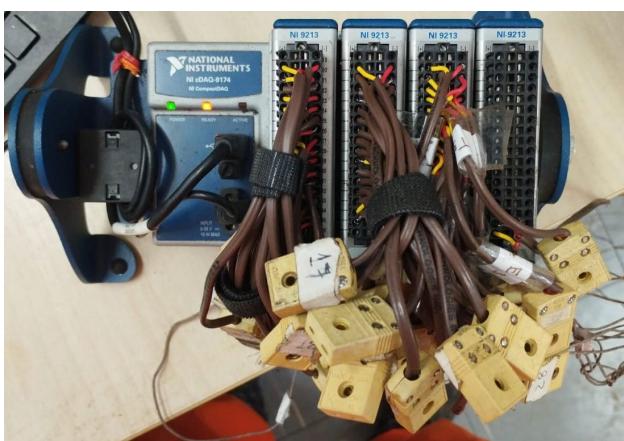


Figura 2 – Receptor de dados para registro de temperatura.

Fonte: Os autores.

Os registros de temperatura realizados pelo equipamento ilustrado anteriormente apresentaram um erro instrumental de 10^{-5} °C, conferindo alta sensibilidade à carga térmica prescrita.

3.3 Ensaios geotécnicos realizados

Para a caracterização da amostra analisada, bem como a confecção dos corpos de prova a serem submetidos à ação do fogo a partir de uma fonte térmica prescrita, foram realizados os seguintes ensaios:

- NBR 6458 (ABNT, 2017) – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.
- NBR 7182 (ABNT, 2016) – Solo – Ensaio de compactação.

Os ensaios acima listados tiveram como objetivo determinar a massa específica do solo, a densidade dos grãos, e identificar a umidade ótima para compactação normal, fornecendo subsídios para a confecção dos corpos de prova que seriam submetidos às fontes térmicas.

3.4 Simulação – exposição dos CPs a gradientes térmicos

O ensaio consistiu em submeter três corpos de prova de solo compactado, com uma umidade de 24%, referente as condições in situ, de brasas alimentadas por combustível (ar atmosférico) na face superior. Foram instalados 5 termopares em cada corpo de prova, localizados na superfície e a 2, 4, 6 e 8 centímetros de profundidade, alinhados ao centro do corpo de prova (Figura 3). O experimento foi conduzido por 4 horas e 26 minutos.



Figura 3 – Amostras com submetidas a cargas térmicas. Fonte: Os autores.

Para capturar de maneira mais precisa as variações de temperatura ao longo dos corpos de prova, a inclusão de um número maior de sensores de temperatura em diferentes profundidades seria

recomendada. Embora os termopares tenham sido instalados em intervalos estratégicos, a distribuição de um maior número de sensores permitiria uma análise mais detalhada da propagação do calor ao longo do tempo e da profundidade.

As temperaturas foram registradas a cada 1 segundo durante a fase de aquecimento, seguida por um período de resfriamento, no qual as fontes de calor prescritas foram removidas. Durante o ensaio, observou-se que a base das amostras sofreu desconfigurações ao longo do tempo.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Caracterização do solo estudado

O ensaio NBR 7182 (ABNT, 2016) foi utilizado para determinar a massa específica natural (ρ_N) máxima do solo analisado, e os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.

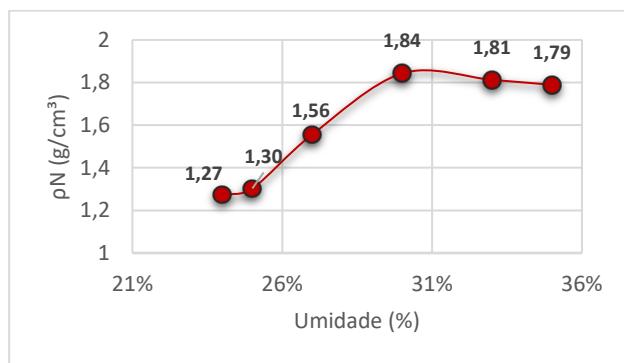


Figura 4 – Curva de Compactação.
Fonte: Os autores.

O ensaio de compactação foi realizado conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando soquete de 2,5 kg e compactação normal com 26 golpes por camada. O teste revelou uma relação clara entre a umidade e a massa específica seca do solo (ρ_d). Os resultados indicaram que a massa específica natural máxima ocorre com uma umidade de 30,88%, atingindo o valor de 1,86 g/cm³.

Esse comportamento reflete o ponto ótimo de compactação, onde o solo alcança sua maior resistência e menor porosidade. A tabela a seguir traz os valores encontrados no ensaio de compactação utilizados para subsidiar a confecção das amostras de solos compactados.

Tabela 1 – Parâmetros para curva de compactação

Referência	ρ_N (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
Ponto 1	1,274	1,029	1,485	41,106
Ponto 2	1,303	1,044	1,449	43,791
Ponto 3	1,556	1,222	1,092	63,934
Ponto 4	1,843	1,420	0,801	95,052
Ponto 5	1,812	1,361	0,878	96,414
Ponto 6	1,789	1,329	0,924	95,724

Adicionalmente, o ensaio NBR 6458 (ABNT, 2017) foi utilizado para estimar a massa específica dos grãos, resultando em um valor de 2,558 g/cm³. O solo analisado apresentou boa capacidade de compactação nas condições do ensaio, com uma densidade natural elevada em relação ao material particulado, indicando uma eficiência no processo de compactação – características típicas de solos argilosos.

A construção da curva de compactação permitiu também, definir a massa específica natural do solo (ρ_N), no teor de umidade de 24%, parâmetros estes necessários para a confecção dos corpos de provas alinhadas as condições naturais do solo *in situ*.

Os autores reconhecem que a variabilidade das amostras de solo pode influenciar os resultados. Para mitigar essa questão, adotou-se uma metodologia rigorosa de compactação com controle de umidade e densidade das amostras, embora a heterogeneidade natural do solo tenha sido um fator limitante. Sugere-se, para estudos futuros, a utilização de técnicas mais avançadas de preparação e compactação das amostras, como o uso de amostras reconstituídas sob condições controladas, para garantir maior uniformidade entre os corpos de prova.

Durante a alimentação das brasas combustíveis, foi observado que houve dificuldade em manter a temperatura constante. O fluxo de ar não foi uniforme, o que tornou desafiador manter a combustão e o fluxo de calor constantes na superfície das amostras. Na Figura 3 é apresentado o gráfico da variação de temperatura em função do tempo para os sensores posicionados nas superfícies superiores dos corpos de prova.

4.2 Comportamento térmico da fonte de calor

As temperaturas foram registradas a cada 1 segundo durante a fase de aquecimento, que teve uma duração de 3 horas, seguida por um período de

refriamento de 1 hora e 26 minutos nas amostras analisadas.

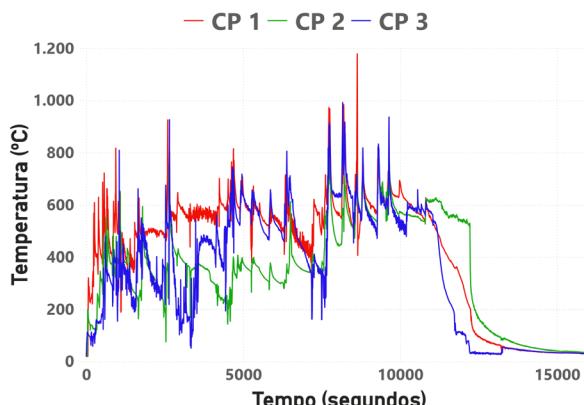


Figura 5 – Variação da temperatura em função do tempo ($z = 0$ cm). Fonte: Os autores.

Na Tabela 2, apresentam-se as médias e os desvios das temperaturas registradas durante a fase de aquecimento, que teve uma duração aproximada de 3 horas.

Tabela 2 – Temperaturas prescritas médias e desvios padrão ($z = 0$ cm)

Amostra	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
CP 1	552,43	104,75
CP 2	407,34	133,55
CP 3	460,63	168,01

4.3 Respostas térmicas no solo em profundidade

As temperaturas máximas nas diferentes profundidades foram registradas (Figura 6) durante o período analisado, com os valores máximos observados nos momentos descritos na Tabela 3.

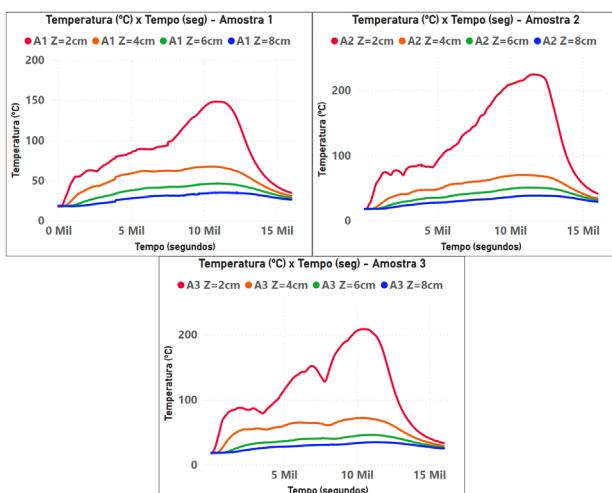


Figura 6 – Temperatura e função do tempo nas diferentes profundidades. Fonte: Os autores.

Tabela 3 – Estatísticas de temperaturas nas amostras.

Profundidade (cm)	Temp. Máxima (°C)	Período (min)	Média (°C)	Desvio (°C)
Amostra 1				
2	148,1	180,9	87,2	35,2
4	67,46	175,16	52,0	13,8
6	46,49	180,23	36,5	8,3
8	35,49	204,2	28,5	5,4
Amostra 2				
2	224,7	193,3	124,6	60,9
4	70,26	179,9	52,1	14,4
6	51,00	186,3	38,6	9,6
8	38,61	196,1	30,5	6,3
Amostra 3				
2	208,5	175,0	115,1	53,9
4	71,94	171,4	54,7	14,2
6	45,98	183,1	35,8	7,6
8	34,90	187,6	28,5	4,7

Houve dificuldade em estabilizar o fluxo de calor transiente nas amostras, assim como em obter corpos de prova com camadas compactadas de maneira completamente uniforme. Este fato contribuiu para comportamentos e respostas diferenciados às variações de temperatura nas seções analisadas.

Embora este estudo tenha se concentrado nas propriedades térmicas do solo, é importante ressaltar que as variações de temperatura também podem afetar suas propriedades mecânicas, especialmente em solos argilosos, onde o teor de umidade exerce um papel crucial. Futuras investigações poderiam focar na análise integrada entre as propriedades térmicas e mecânicas, avaliando como as mudanças no teor de umidade afetam a resistência e a estabilidade do solo.

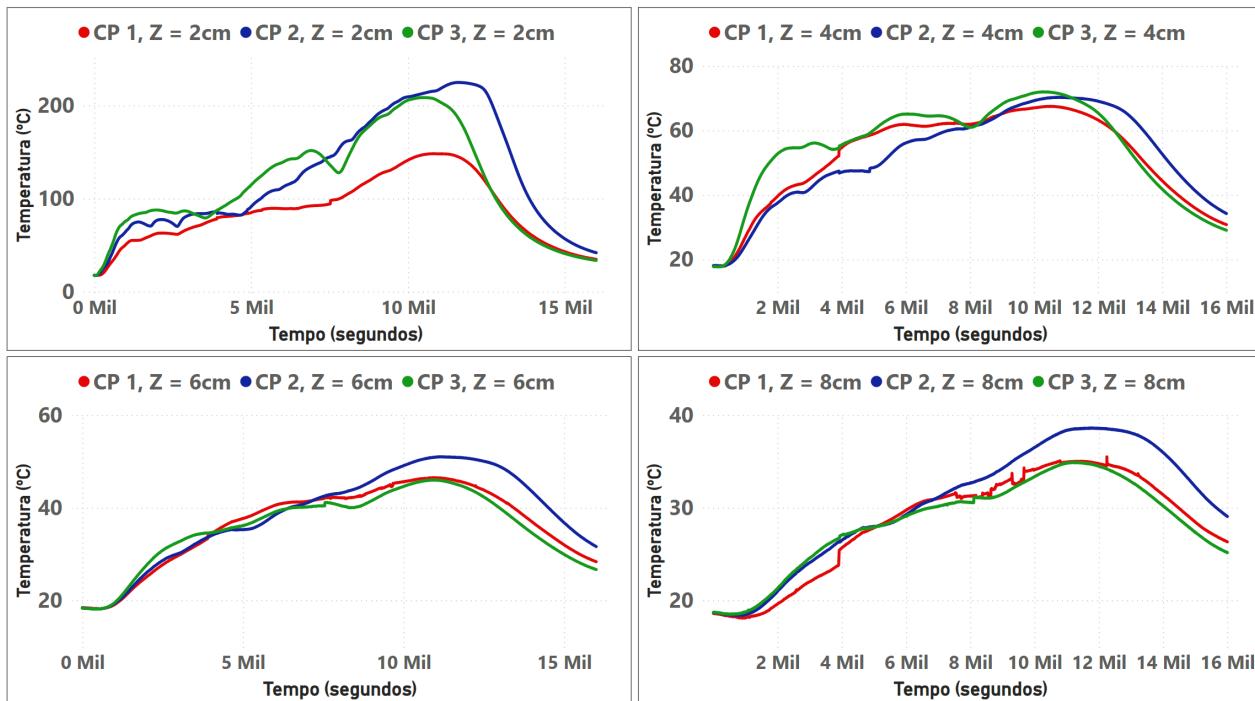


Figura 7 – Comparação da variação de temperaturas entre as amostras. Fonte: Os autores.

Diane dos dados da figura acima, observou-se uma maior correlação entre o comportamento da temperatura em função do tempo nos CPs 1 e 3. Com exceção da temperatura na base da fonte de calor, as correlações foram superiores a 0,9499, indicando uma consistência nos resultados entre essas duas amostras.

Tabela 4 – Correlação do comportamento da temperatura em profundidade.

Correl.	z=0cm	z=2cm	z=4cm	z=6cm	z=8cm
CP (1 e 2)	0,786	0,960	0,928	0,959	0,975
CP (1 e 3)	0,868	0,949	0,954	0,984	0,983
CP (2 e 3)	0,738	0,872	0,843	0,933	0,963

Fonte: Os autores.

Durante os ensaios, as condições ambientais, como a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente, não foram controladas rigorosamente, o que pode ter influenciado os resultados obtidos, especialmente nas variações térmicas e no comportamento da umidade. Recomenda-se que futuros experimentos sejam realizados em câmaras ambientais controladas, onde esses fatores possam ser ajustados para minimizar suas influências nos resultados.

4.4 Aplicação do método de diferenças finitas

Para estimar as constantes térmicas do solo submetido ao ensaio de calor, utilizou-se o método

das diferenças finitas para dois momentos distintos de análise: aquecimento e resfriamento.

O método consistiu em estimar numericamente, para cada intervalo de tempo, a constante de difusividade térmica com base na variação da temperatura ao longo do tempo, bem como nas temperaturas registradas nas profundidades de 2, 4, 6 e 8 centímetros, durante os períodos de aquecimento e resfriamento, conforme as Eqs. 4 e 5.

Durante a análise dos dados, valores negativos de difusividade térmica foram observados, provavelmente devido à sensibilidade dos termopares e à variabilidade do fluxo de calor. Esses valores foram filtrados para focar nos resultados positivos. Futuras pesquisas podem investigar mais detalhadamente a origem desses valores anômalos, utilizando técnicas avançadas de filtragem e controle do fluxo térmico para minimizar ruídos nos dados.

Com o auxílio da Eq. 1, foi possível estimar a constante de condutividade térmica para cada instante durante os períodos de aquecimento e resfriamento das amostras de solo. A massa específica natural das amostras foi estimada em 1300 kg/m³, correspondente à umidade de compactação do ensaio, que foi de 24%. Utilizou-se um valor típico de calor específico para solos argilosos de 731 J/kg/K, tabela em Anexo. Os resultados da condutividade térmica são apresentados na Figura 8, considerando a aplicação

do método das diferenças finitas centrado nas profundidades médias de 4 e 6 centímetros. Os resultados abaixo foram calculados a partir da

combinação das equações 1, 4 e 5.

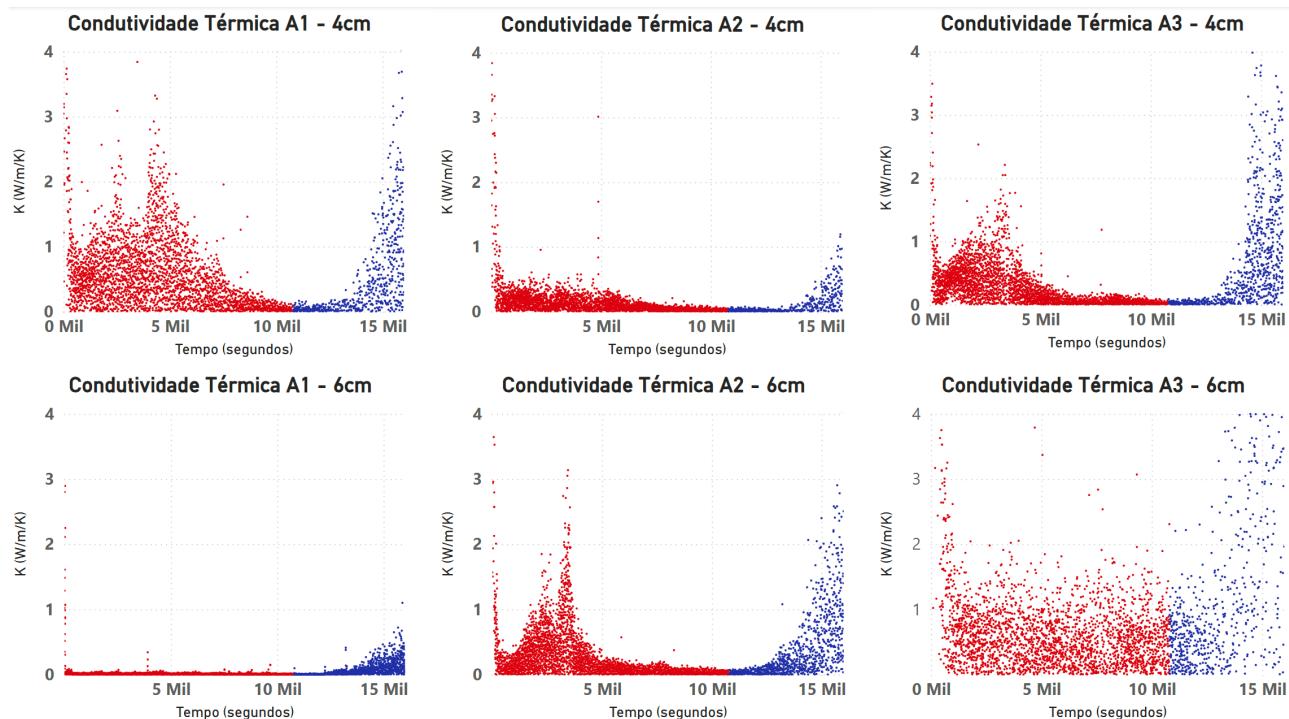


Figura 8 – Variabilidade da condutividade térmica. Fonte: Os autores.

Os resultados, apresentados na Figura 8, indicaram que a condutividade térmica em meios porosos sofre variações ao longo do tempo durante as etapas de aquecimento e resfriamento. Inicialmente, os valores de condutividade são elevados, diminuem durante a fase intermediária e aumentam novamente no final do período de resfriamento.

Os resultados obtidos foram consistentes com estudos anteriores que avaliaram a condutividade e a difusividade térmica em solos argilosos (HOYOS et al., 2024; INCROPERA e DEWITT, 2014). No entanto, variações podem ser observadas dependendo da composição mineralógica e do teor de umidade do solo. Os resultados obtidos nesse estudo se assemelharam aos valores típicos propostos por Mitchell e Soga (2005) e Ferrari (2002), mesmo sendo realizados com solos caracterizados com diferentes propriedades físico-químicas, demonstrando assim conformidade dos resultados a literatura sobre o tema.

Durante o ensaio, percebeu-se que nas fases iniciais de aquecimento e finais de resfriamento, a condutividade térmica apresentou uma redução, seguida por uma estabilização intermediária e, posteriormente, um aumento no final do experimento. Acredita-se que o aumento da temperatura no solo

causa uma redistribuição da umidade, impactando diretamente a condutividade térmica. Hoyos et al. (2024) destacam que a migração da umidade ocorre tanto nas fases líquida quanto vapor, sendo impulsionada por diferenças de temperatura, em um processo conhecido como fluxo de umidade induzido termicamente. Os autores afirmam que, ao ser aquecido, o solo direciona a umidade das regiões mais quentes para as áreas mais frias, alterando temporariamente as propriedades térmicas locais e aumentando a condutividade térmica nas regiões onde a umidade se acumula.

Assim, os resultados indicam que, durante o aquecimento, houve uma redução na condutividade térmica devido à migração da umidade para as regiões mais frias nas bordas do Corpo de Prova (CP), e essa condutividade aumentou novamente com o resfriamento do centro do CP, à medida que a umidade retornou, preenchendo os espaços vazios. Esse comportamento é crítico em aplicações geotécnicas, como aterros termicamente ativos e cabos estruturais que geram calor, influenciando diretamente a eficiência térmica do solo ao redor desses sistemas e podendo impactar as propriedades mecânicas dos solos, que são dependentes dos teores de umidade.

Além do uso do método de diferenças finitas, uma

modelagem teórica mais abrangente, que leve em consideração os processos de condução, convecção e redistribuição de umidade, poderia complementar as análises experimentais realizadas. Modelos numéricos que incluam a convecção, especialmente em solos porosos, podem fornecer uma melhor compreensão dos fenômenos térmicos e suas interações com as propriedades hidráulicas e mecânicas do solo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no estudo das propriedades térmicas dos solos sob um fluxo transiente de calor, foi possível concluir que a exposição dos CPs a um gradiente térmico, especialmente a partir da superfície, provoca impactos significativos nas propriedades térmicas do solo. A pesquisa analisou as variações de temperatura em diferentes profundidades de corpos de prova cilíndricos compactados com solos argilosos, observando-se variações notáveis nas propriedades térmicas, como condutividade e difusividade térmica.

Embora este estudo tenha utilizado três corpos de prova para a análise, a replicação limitada pode ter influenciado a generalização dos resultados. Para estudos futuros, recomenda-se a inclusão de um maior número de amostras replicadas, a fim de aumentar a robustez estatística e permitir uma análise mais detalhada das variações térmicas e de umidade em diferentes condições de solo.

Os resultados mostraram que, com uma fonte de calor prescrita, ocorre uma redistribuição da umidade induzida por gradientes térmicos, fenômeno que influencia diretamente a condutividade térmica e a difusividade do solo.

Os valores experimentais obtidos para condutividade e difusividade térmica foram próximos dos valores teóricos médios reportados na literatura para solos, o que valida a metodologia adotada e as medições realizadas.

Adicionalmente, o estudo ressaltou a dificuldade de manter a temperatura constante nas amostras devido à variabilidade do fluxo de calor, enfatizando a necessidade de mais pesquisas para aprimorar as metodologias experimentais.

Investigações futuras devem considerar a inclusão de sensores adicionais em várias profundidades e regiões dos corpos de prova, bem como a implementação de metodologias de controle rigoroso de fluxo de calor e umidade. Além disso, a aplicação de modelos numéricos mais complexos, que incluem os efeitos de convecção e redistribuição de umidade,

proporcionaria uma visão mais completa dos fenômenos térmicos e suas interações com as propriedades mecânicas do solo.

Além disso, é necessário desenvolver uma modelagem teórica que considere as perdas de calor por convecção nos corpos de prova, uma vez que essas perdas afetam a distribuição de temperatura e a difusão de calor. A influência do fluxo de umidade em função de gradientes térmicos altera localmente os índices de vazios e a porosidade do solo, impactando diretamente a resistência mecânica e suas envoltórias de resistência. Essas alterações podem comprometer a estabilidade de taludes e outras estruturas geotécnicas, sendo um aspecto relevante para estudos futuros sobre a interação entre calor, umidade e propriedades mecânicas dos solos.

Em suma, a pesquisa contribuiu para o entendimento inicial dos impactos térmicos dos incêndios sobre o solo, mas indicou a necessidade de investigações futuras que considerem a variabilidade das propriedades dos solos e o desenvolvimento de modelos numéricos mais precisos para avaliar esses fenômenos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF), em especial à Diretoria de Investigação de Incêndio, pelo apoio técnico e logístico concedido ao longo da pesquisa. A disponibilização de equipamentos e do laboratório da corporação foi fundamental para a realização dos testes experimentais, contribuindo diretamente para o avanço dos resultados obtidos neste estudo.

Estendemos também nossos agradecimentos ao Laboratório GEOFLUXO, da Universidade de Brasília (UnB), pelo suporte científico e acadêmico durante todas as etapas da pesquisa. A colaboração da equipe do GEOFLUXO foi essencial para o desenvolvimento das análises térmicas e interpretação dos dados, proporcionando um ambiente interdisciplinar e inovador que fortaleceu significativamente os objetivos propostos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Almeida, S.; Silva, E.; Martins, F.; Fernandez, H.; Costa, R.; Lança, R. (2016). Propriedades hidráulicas de solos algarvios em cenário pós-incêndio. In: *15º Congresso Nacional de Geotecnia e 8º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*, Porto. Anais [...]. Porto: Universidade do Algarve.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2017).

- NBR 6458: Granulometria de solos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2016). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- Bowers, S. A.; Hanks, R. J. (1962). Specific heat capacity of soils and minerals as determined with a differential scanning calorimeter. *Soil Science*, 94(6), 392–396.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*. 14th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Burden, R. L.; Faires, J. D. (2011). *Numerical Analysis*. 9th ed. Brooks/Cole.
- Brasil. (2024). Lei nº 14.944, de 31 de julho de 2024. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, p. 1, 1 ago. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14944.htm. Acesso em: 7 set. 2024.
- Cassol, E. A.; Lima, V. C.; Lopes, M. A. (2004). Erosão hídrica em solos sob diferentes coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28(2), 369–375.
- Castro, L. C. de. (2003). *Manual de Defesa Civil*. Brasília: Ministério da Integração Nacional.
- Chapra, S. C. (2018). *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists*. 4th ed. McGraw-Hill Education.
- Clivati, A. A. (1991). Método proposto para determinação da difusividade térmica de meios porosos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba.
- Crisóstomo, M. C.; Silva, M. F.; Vale, A. T.; Chaves, B. S. (2021). Caracterização energética de madeira de E. grandis, Pinus sp., T. vulgaris e P. lecointei. *Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal*, 49–61. DOI: 10.37885/210203270.
- Da Silva, E. M. J. A.; Almeida, S. L.; Costa, R.; Fernandez, R.; Granja-Martins, H.; Pedras, C. M. G. (2016). Propriedades hidráulicas de solos algarvios em cenário pós-incêndio. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.1/9132>.
- De Vries, D. A.; Van Wijk, W. R. (1963). Thermal properties of soils. In: Van Wijk, W. R. (Ed.). *Physics of Plant Environment*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 210–235.
- Defesa Civil Estadual do RJ (DCERJ). (2024). Incêndios florestais – O que é? Disponível em: <https://defesacivil.rj.gov.br/index.php/para-o-cidadao/como-agir-em-desastres/22-incendios-florestais>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- Dematte, J. L. I. (1967). Propriedades térmicas dos solos. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, 24(1), 123–134.
- Duarte, D. F. (2004). Estimation from soil temperature of soil thermal diffusivity and heat flux in sub-surface layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 121(2), 231–242.
- Erickson, H. E.; White, D. P. (2008). Efeitos dos incêndios florestais nas propriedades físicas e químicas do solo. *Forest Ecology and Management*, 256(5), 1005–1015.
- Ferrari, P. R. (2002). *Medida da difusividade térmica de um solo incorporado com resíduo industrial de silicato*. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.
- G1. (2015). Fogo queima duas viaturas dos bombeiros em incêndio no DF. Disponível em: <https://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2015/09/fogo-queima-duas-viaturas-dos-bombeiros-em-incendio-no-df.html>. Acesso em: 15 set. 2024.
- G1. (2019). Morre bombeira atingida por árvore em ação de combate a incêndio no DF. Disponível em: <https://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2019/09/15/morre-militar-ferida-durante-acao-de-combate-a-incendio-no-df.ghtml>. Acesso em: 15 set. 2024.
- Hallema, D. W. (2017). *Soil, Water, and Fire: Forest Soil and Water Interaction after Wildfire*. Springer Nature.
- Horton, R.; Wierenga, P. J. (1984). The effect of soil moisture on the thermal properties of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 48(3), 102–108.
- Hoyos, L. R.; Yu, X.; Kaneza, N.; Pokhrel, A. (2024). Thermally induced moisture flow in a silty sand under a 1-D thermal gradient. *Geosciences*, 14. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geosciences14080207>. Acesso em: 26 set. 2024.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P. (2014). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Wiley.
- Minella, J. P. G.; Merten, G. H.; Cassol, E. A.; Fantin-Cruz, I.; Neves, P. S.; Ponciano, L. (2017). Impacto da erosão hídrica no transporte de sedimentos e nutrientes em solos coesos. *Journal of Environmental Management*, 201, 115–124.
- Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Montagnoli de Almeida, S. D. (2001). Respirômetro de Bartha & Pramer para avaliar a produção de CO₂ do solo impactado por resíduo de indústria processadora de sílica-gel e de vinhaça de destilaria de etanol. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro.
- Montagnoli, A.; Terzaghi, M.; Mariotti, B.; Nocentini, S.; Scarascia-Mugnozza, G.; Lingua, E. (2017). Fine root morphological and functional traits in *Fagus sylvatica* and *Fraxinus excelsior* saplings as dependent on species, root order and competition. *Plant and Soil*, 419, 333–346.
- Moreno, R. O. (2018). Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para medição do calor específico do solo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Oliveira, F. J. (2015). Estudo do comportamento térmico de materiais de construção sob condições climáticas extremas. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation.

- Pereira, J. C. R. (1973). Propriedades térmicas de solos tropicais: condutividade e difusividade térmica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2(1), 1–10.
- Pinto, C. de S. (2006). *Mecânica dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Pivello, V. R.; Coutinho, L. M. (1992). Transfer of macro-nutrients to atmosphere during experimental burnings in an open Cerrado. *Journal of Tropical Ecology*, 8, 487–497.
- Prevedello, C. L.; Armindo, R. A. (2015). Comportamento térmico de solos porosos e seus efeitos nas propriedades físicas. *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 113–125.
- Santos, J. P. (2010). Análise numérica do comportamento térmico de solos sob influência de gradientes térmicos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.
- Schumacher, M. V.; Schumacher, G. D. (2018). *Incêndios Florestais*. 3rd ed. Santa Maria: UFSN, Departamento de Incêndios Florestais.
- Setzer, A. W.; Ferreira, L. G. (2023). *Queimadas e Incêndios Florestais: Mediante Monitoramento Orbital*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Silva, A. R. (2012). Propriedades térmicas de solos em condições de campo. Dissertação (Mestrado).
- Zimmer, T. (2017). Dinâmica das Propriedades Térmicas e do Fluxo de Calor no Solo em uma Área de Pastagem no Bioma Pampa. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

ANEXO

Tabela 5 – Propriedades térmicas dos materiais

Calor Específico	Material	J/Kg.K	Referência
	Argiloso	787	Dematte (1967)
	Arenoso	649	Dematte (1967)
	Argilo-Siltosa	1086	Bowers e Hanks (1962)
	Valores médios de solos	731	Mitchell e Soga (2005)
Condutividade Térmica	Material	W/m.K	Referência
	Ar	0,024	Mitchell e Soga (2005)
	Água	0,60	Mitchell e Soga (2005)
	Valores médios de solos	0,25 a 2,9	Mitchell e Soga (2005)
Difusividade Térmica	Material	m ² /seg	Referência
	Valores médios de solos	1 a 7 x 10 ⁻⁷	Pereira (1973)
Densidade	Material	Kg/m ³	Referência
	Água	1000	Incropera e Dewitt (2014)
	Alumínio	2700	Incropera e Dewitt (2014)
	Ar	1,10	Incropera e Dewitt (2014)
	Solo franco argilo-arenoso	1310	Moreno (2018)
	Solo arenoso úmido	1680	Moreno (2018)
	Argilo-arenosa úmido	1090	Moreno (2018)