

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

INVESTIGAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DA
COMBINAÇÃO ENTRE O AQUECIMENTO DE UMA LIGA FERRÍTICA
(Fe-Cr-Al) E A MEDIÇÃO DISTRIBUÍDA DE TEMPERATURA (DTS)

Aluno: Luis Eduardo Bertotto

Orientador: Edson Cezar Wendland

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUIS EDUARDO BERTOTTO

Investigação da umidade do solo por meio da combinação entre o aquecimento de uma liga ferrítica (Fe-Cr-Al) e a medição distribuída de temperatura (DTS)

São Carlos

2023

LUIS EDUARDO BERTOTTO

Investigação da umidade do solo por meio da combinação entre o aquecimento de uma liga ferrítica (Fe-Cr-Al) e a medição distribuída de temperatura (DTS)

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. Edson Cezar Wendland

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B545i Bertotto, Luis Eduardo
Investigação da umidade do solo por meio da combinação entre o aquecimento de uma liga ferrítica (Fe-Cr-Al) e a medição distribuída de temperatura (DTS) / Luis Eduardo Bertotto; orientador Edson Cezar Wendland . São Carlos, 2023.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Conteúdo de água do solo. 2. Pulso de calor.
3. Cabo de fibra óptica. 4. Temperatura como traçador.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **LUIS EDUARDO BERTOTTO**.

Título da dissertação: "Investigação da umidade do solo por meio da combinação entre o aquecimento de uma liga ferrítica (Fe-Cr-Al) e a medição distribuída de temperatura (DTS)".

Data da defesa: 26/05/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Aprovado

Profa. Dra. **Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha**

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Otto Corrêa Rotunno Filho**

(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Hidráulica e Saneamento:

Prof. Associado **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Fernando e Márcia, que nunca mediram esforços para me apoiar durante esses anos.

À minha companheira Lara, por ser meu porto seguro. Seu incentivo, compreensão e confiança tornaram os dias mais fáceis e agradáveis.

Aos demais familiares, em especial meu irmão Fernando e minha cunhada Samantha, que, apesar da distância, sempre demonstraram incentivo.

Ao professor Edson Wendland, pela orientação e oportunidade concedida de realizar esta pesquisa.

Um agradecimento especial ao amigo Alan Reis, por sempre se mostrar disposto, paciente e atencioso durante as inúmeras horas de conversa que contribuíram com o amadurecimento desta pesquisa.

Ao conterrâneo Érick, pelas sugestões que contribuíram com o aprimoramento desta dissertação, e também pela amizade e ótimas risadas do dia a dia.

Agradeço também aos demais amigos do time de monitoramento da Bacia do Ribeirão da Onça, Rubens, Gescilam e Yuri, que tornaram os dias de campo mais leves.

Ao Dimaghi, pela ajuda fornecida durante o manuseio dos sensores utilizados no trabalho.

Aos demais colegas do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC), com quem pude conviver nos últimos anos: Alex Kobayashi, Alex Watanabe, Alessandra, Aline, Ballarin, professor Giovanni Penner, Hélio, Jullian, Lazarini e Lívia.

Ao técnico do LHC, Roberto Bérghamo, cujas dicas e soluções práticas foram essenciais para que este trabalho fosse desenvolvido.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS-USP), em especial às secretárias Sá e Rose, pela disposição de sempre.

Ao Centro de Tecnologia da Informação de São Carlos (CeTI-SC/USP), pelo suporte técnico fornecido durante a fusão dos conectores e das fibras ópticas.

Às agências de fomento, que permitiram a realização do presente trabalho: a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001; o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da bolsa de estudo concedida (processo 131511/2020-3); e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio do auxílio à pesquisa concedido (processo FAPESP 2015/03806-1).

RESUMO

BERTOTTO, Luis Eduardo. Investigação da umidade do solo por meio da combinação entre o aquecimento de uma liga ferrítica (Fe-Cr-Al) e a medição distribuída de temperatura (DTS). 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Os solos desempenham papéis cruciais na manutenção da ecologia global. Assim, o teor de umidade do solo (θ , $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) é destacado por governar diferentes processos hidrológicos. Técnicas de sensoriamento remoto e métodos como a reflectometria no domínio do tempo têm sido usados no seu monitoramento. A partir dos anos 2000, foi introduzido o monitoramento de θ com os dispositivos de medição distribuída de temperatura (DTS), que utilizam cabos de fibra óptica (FO) como sensores e fornecem dados com alta resolução espacial e temporal. A principal metodologia aplicada com os sistemas FO-DTS para estimativas de θ é a do aquecimento ativo, em que se monitora a resposta térmica do solo à aplicação de um pulso de calor. Usualmente, isso é alcançado pela imposição de uma corrente elétrica no revestimento metálico de um cabo óptico, o que eleva a sua temperatura e a do meio circundante. Porém, esses cabos possuem alto custo de aquisição em comparação a cabos tradicionais. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade da execução integrada do aquecimento de uma liga composta de ferro, cromo e alumínio (Fe-Cr-Al) com a medição distribuída de temperatura para o monitoramento de θ . Para sua execução, duas configurações foram testadas em laboratório: com a liga e o cabo de FO em contato (abordagem da sonda única, i.e., SPHP-DTS) e separados por uma distância de solo de 6,03 mm (abordagem da sonda dupla, i.e., DPHP-DTS). Três configurações de pulso de calor foram aplicadas na liga metálica, distintas pela potência e duração do aquecimento: $4,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ durante 180 s; $4,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ durante 600 s; e $21,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ durante 180 s. A resposta térmica do solo foi avaliada pelos métodos da temperatura acumulada (T_{cum} , °C.s) e do máximo aumento de temperatura (ΔT_{max} , °C). O solo de cada experimento foi submetido a dois ciclos de umedecimento e secagem consecutivos, sendo o primeiro usado para a construção de curvas de calibração entre θ e T_{cum} e θ e ΔT_{max} , e o segundo usado para a validação das curvas. Os resultados encontrados indicaram que o pulso de calor $4,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ -180 s levou a estimativas insatisfatórias de θ . Porém, ao estender a sua duração ($4,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ - 600 s), a performance das curvas melhorou consideravelmente na etapa de validação. Essa configuração de aquecimento apresentou desempenho similar à de alta potência ($21,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ -180 s) nas estimativas de θ , o que é relevante para casos em que a disponibilidade de energia para o aquecimento é uma limitante, uma vez que o pulso $4,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ -600 s requer $2520 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ para ser executado, enquanto o $21,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ -180 s requer $3870 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$. Ademais, recomenda-se o uso do método ΔT_{max} em ambas SPHP-DTS e DPHP-DTS. Os resultados indicaram também que erros nas estimativas de θ aumentam à medida que θ aumenta, o que foi associado à ocorrência de histerese térmica das medições do sistema FO-DTS em relação ao θ observado por sensores pontuais. Apesar disso, demonstrou-se a efetividade da liga Fe-Cr-Al como material aquecedor paralelamente às medições de temperatura para a investigação de θ em laboratório.

Palavras-chave: Conteúdo de água do solo. Pulso de calor. Cabo de fibra óptica. Temperatura como traçador.

ABSTRACT

BERTOTTO, Luis Eduardo. Investigation of soil moisture through the combination of the heating of a ferritic alloy (Fe-Cr-Al) and the distributed temperature sensing (DTS). 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

The soils play a crucial role in the global ecology maintenance. Thus, the soil moisture content (θ , $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) is highlighted as it governs different hydrological processes. Remote sensing techniques and methods such as time domain reflectometry have been used in its monitoring. Since the 2000s, it was introduced the monitoring of θ with the distributed temperature sensing (DTS) instruments, which use fiber optic (FO) cables as sensors and provide data with high spatial and temporal resolution. The main methodology applied with the FO-DTS systems for θ estimation is the active heat, in which the thermal response of the soil following the application of a heat pulse is monitored. This is usually achieved by imposing an electric current on the metallic coating of an optical cable, which raises its temperature and that of the surrounding medium. However, these cables have a high acquisition cost compared to traditional cables. Hence, the objective of this study was to evaluate the applicability of the integrated execution of the heating of an alloy composed of iron, chromium, and aluminum (Fe-Cr-Al) with the distributed temperature sensing for the monitoring of θ . For its execution, two configurations were tested in the laboratory: with the alloy and the FO cable in contact (single probe approach, i.e., SPHP-DTS) and separated by a soil distance of 6.03 mm (dual probe approach, i.e., DPHP-DTS). Three heat pulse settings were applied to the metallic alloy, distinguished by heating power and duration: $4.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ during 180 s; $4.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ during 600 s; and $21.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ during 180 s. Soil thermal response was evaluated by the cumulative temperature (T_{cum} , °C.s) and maximum temperature increase (ΔT_{max} , °C) methods. The soil of each experiment was subjected to two consecutive wetting and drying cycles, the first being used to build calibration curves between θ and T_{cum} and θ and ΔT_{max} , and the second used for validation of the curves. The results found indicated that the heat pulse $4.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ -180 s led to unsatisfactory estimates of θ . However, by extending its duration ($4.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ -600 s), the performance of the curves improved considerably in the validation step. This heating configuration presented a performance similar to that of high power ($21.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ -180 s) in the θ estimates, which is relevant for cases in which the availability of energy for heating is a limiting factor, since the pulse $4.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ -600 s requires $2520 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}$ to be performed, while the $21.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ -180 s requires $3870 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}$. Furthermore, it is recommended to use the ΔT_{max} method in both SPHP-DTS and DPHP-DTS. The results also indicated that the errors in the θ estimates increase as θ increases, which was associated with the occurrence of thermal hysteresis of the FO-DTS system measurements in relation to the θ observed by punctual sensors. Despite this, it was demonstrated the effectiveness of the Fe-Cr-Al alloy as a heating material in parallel with temperature measurements for the investigation of θ in the laboratory.

Keywords: Soil water content. Heat pulse. Fiber optic cable. Temperature as a tracer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo dos dispositivos dos métodos (a) SPHP e (b) DPHP	21
Figura 2 – Diagrama de funcionamento de um sistema FO-DTS	23
Figura 3 – Composições típicas dos cabos de fibra óptica usados nos métodos (a) passivo e (b) do aquecimento ativo.....	25
Figura 4 – Representação gráfica de T_{cum} para as condições (a) $t_f < t_p$, (b) $t_f = t_p$ e (c) $t_f > t_p$	27
Figura 5 – Representação gráfica genérica de ΔT_{max}	28
Figura 6 – Resumo da metodologia executada.....	31
Figura 7 – Tubulações de PVC utilizadas para a construção dos experimentos: (a) preparação dos tubos e (b) assentamento do solo	32
Figura 8 – Esquema da seção transversal dos tubos experimentais	33
Figura 9 – Esquema geral dos componentes dos tubos experimentais.....	36
Figura 10 – Posicionamento da liga Fe-Cr-Al e do cabo de fibra óptica nos experimentos de abordagem (a) SPHP-DTS e (b) DPHP-DTS, com detalhe dos elementos em (c)	37
Figura 11 – (a) Dispositivo DTS e (b) fusão das fibras ópticas na caixa de retorno.....	38
Figura 12 – Medições distribuídas de temperatura na configuração experimental construída	39
Figura 13 – Sensor de umidade SKU:SEN0193: (a) impermeabilização dos componentes eletrônicos e (b) placas Arduino para coleta e armazenamento de dados	40
Figura 14 – Termopares: (a) colagem da junção de medição e (b) multiplexador e <i>datalogger</i> para coleta e armazenamento de dados.....	41
Figura 15 – Elementos para gerar e controlar o aquecimento da liga Fe-Cr-Al: (a) fonte de alimentação de bancada, (b) relé e (c) sensor de corrente elétrica	42
Figura 16 – Calibração dos sensores de umidade.....	45
Figura 17 – Modelos usados para o dimensionamento da tensão aplicada na liga Fe-Cr-Al: (a) potência total em função da potência na liga e (b) tensão total em função potência total	47
Figura 18 – Posicionamento dos sensores de umidade e dos termopares no experimento de abordagem DPHP-DTS: (a) visão geral e (b) detalhe	49
Figura 19 – Fotografia da configuração experimental completa.....	49
Figura 20 – Procedimentos de cálculo do aumento de temperatura gerado pelo pulso de calor	53
Figura 21 – Modelos ajustados aos dados observados de θ em função de U_{out} , durante a calibração dos sensores de umidade	57

Figura 22 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a calibração dos sensores de umidade	59
Figura 23 – Variação do teor de umidade ao longo do tempo nas etapas de validação e calibração da metodologia proposta nos experimentos de abordagem (a) SPHP-DTS e (b) DPHP-DTS	59
Figura 24 – Modelos ajustados aos dados observados de i em função de $iACS712$ durante a calibração dos sensores de corrente elétrica próximos aos polos (a) negativo e (b) positivo da fonte	61
Figura 25 – Oscilações nos valores de i em função de θ , para os diferentes pulsos de calor aplicados na liga Fe-Cr-Al.....	63
Figura 26 – Evolução temporal da resposta térmica do solo aos pulsos de calor de diferentes configurações nos experimentos de abordagem SPHP-DTS e DPHP-DTS.....	65
Figura 27 – Modelos de calibração ajustados aos dados observados de θ em função de $Tcum$ e $\Delta Tmax$ na abordagem SPHP-DTS.....	69
Figura 28 – Modelos de calibração ajustados aos dados observados de θ em função de $Tcum$ e $\Delta Tmax$ na abordagem DPHP-DTS	71
Figura 29 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a calibração de θ em função de $Tcum$ e $\Delta Tmax$ na abordagem SPHP-DTS.....	74
Figura 30 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a calibração de θ em função de $Tcum$ e $\Delta Tmax$ na abordagem DPHP-DTS	76
Figura 31 – Relação entre os dados observados de θ e $Tcum$ e $\Delta Tmax$ obtidos nas etapas de calibração e validação na abordagem SPHP-DTS.....	78
Figura 32 – Relação entre os dados observados de θ e $Tcum$ e $\Delta Tmax$ obtidos nas etapas de calibração e validação na abordagem DPHP-DTS	79
Figura 33 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a validação das curvas de calibração de θ em função de $Tcum$ e $\Delta Tmax$ na abordagem SPHP-DTS.....	81
Figura 34 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a validação das curvas de calibração de θ em função de $Tcum$ e $\Delta Tmax$ na abordagem DPHP-DTS	83
Figura 35 – Relação entre as medições pontuais e distribuídas de temperatura para os pulsos de calor de diferentes configurações nos experimentos de abordagem SPHP-DTS e DPHP-DTS	88

Figura 36 – Uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al na direção axial para os pulsos de calor de diferentes configurações no experimento de abordagem DPHP-DTS.....91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das grandezas do solo de acordo com a natureza de suas propriedades.....	17
Tabela 2 – Resumo das características dimensionadas dos pulsos de calor aplicados na liga Fe-Cr-Al	48
Tabela 3 – Coeficientes dos modelos ajustados e métricas estatísticas obtidas durante a calibração dos sensores de umidade	56
Tabela 4 – Resumo das características reais dos pulsos de calor aplicados na liga Fe-Cr-Al ..	62
Tabela 5 – Coeficientes dos modelos ajustados e métricas estatísticas obtidas durante a calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem SPHP-DTS.....	67
Tabela 6 – Coeficientes dos modelos ajustados e métricas estatísticas obtidas durante a calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem DPHP-DTS	70
Tabela 7 – Métricas estatísticas obtidas durante a validação das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem SPHP-DTS	80
Tabela 8 – Métricas estatísticas obtidas durante a validação das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem DPHP-DTS	82
Tabela 9 – Valores extremos e médios de uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al para diferentes estratégias de aquecimento e condições de umidade do solo	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Estrutura da dissertação	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Propriedades do solo	17
3.1.1	Teor de umidade	18
3.1.2	Propriedades térmicas.....	19
3.2	Método do pulso de calor	20
3.3	Medição distribuída de temperatura	22
3.4	Método do aquecimento ativo.....	24
3.4.1	Métodos da temperatura acumulada e do máximo aumento de temperatura	27
3.4.2	Síntese das aplicações das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS.....	28
4	MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1	Configuração experimental	32
4.1.1	Visão geral.....	32
4.1.2	Propriedades do solo utilizado e preparação da amostra.....	34
4.1.3	Detalhamento de materiais, equipamentos e sensores utilizados	35
4.1.4	Calibração dos sensores de umidade	43
4.1.5	Dimensionamento elétrico dos pulsos de calor e calibração dos sensores de corrente elétrica	45
4.1.6	Sistematização das medições.....	48
4.2	Interpretação dos dados de temperatura	51
4.3	Análise estatística.....	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55

5.1	Comportamento dos sensores de umidade	55
5.1.1	Calibração	55
5.1.2	Variação de θ nos experimentos ao longo do tempo	59
5.2	Comportamento elétrico real dos pulsos de calor.....	61
5.3	Evolução temporal da resposta térmica do solo aos pulsos de calor.....	64
5.4	Construção das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max}	67
5.4.1	Qualidade do ajuste de diferentes modelos matemáticos	67
5.4.2	Comportamento dos pontos amostrais e dos modelos de calibração.....	72
5.5	Validação das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max}.....	77
5.5.1	Comportamento dos pontos amostrais e dos modelos de calibração.....	77
5.6	Comportamento térmico do cabo de fibra óptica e da liga Fe-Cr-Al.....	88
5.6.1	Comparação entre as medições distribuídas e pontuais de temperatura.....	88
5.6.2	Uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al na direção axial.....	90
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

1 INTRODUÇÃO

Os solos desempenham papéis cruciais na manutenção da vida ao formar e manter um elo entre os seres humanos, os animais e as plantas (BEZDICEK; PAPENDICK; LAL, 1996). Dentre as muitas funções que os solos exercem na ecologia global, pode-se citar sua importância como modificador da atmosfera por meio de trocas energéticas e gasosas, como meio para o crescimento de plantas e de organismos e como sistema para suprir e purificar a água (BRADY; WEIL, 2013).

Com isso, surge a necessidade de compreender diferentes propriedades dos solos, a fim de promover a gestão sustentável dos recursos naturais (CARVALHO et al., 2015; CHARTZOULAKIS; BERTAKI, 2015). Assim, em um cenário de escassez hídrica crescente, destaca-se o teor de umidade volumétrica do solo (θ , $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), propriedade física que reflete e governa diferentes processos ecológicos e hidrológicos (HE et al., 2018a; DONG; VURAN; IRMAK, 2013; VEETIL; MISHRA, 2020). Nesse contexto, o monitoramento de θ tem sido feito em diferentes escalas espaciais, desde o sensoriamento remoto (MOHANTY et al., 2017) até medições pontuais (LI et al., 2016).

Nessa última categoria, destaca-se o método do pulso de calor (*Heat-Pulse method* - método HP), que monitora a resposta térmica do solo quando submetido a um aquecimento. No método HP, são usados dispositivos de sonda única (do inglês *Single-Probe Heat-Pulse method* - método SPHP) e dupla (*Dual-Probe Heat-Pulse method* - método DPHP). No primeiro, uma fonte de calor (aquecedor) e pelo menos um sensor de temperatura são mantidos um em contato com o outro, em uma única sonda a ser inserida no solo, enquanto no método DPHP são usadas duas sondas paralelas, sendo uma responsável pelo aquecimento e outra pelas medições de temperatura (BRISTOW; WHITE; KLUITNBERG, 1994; HE et al., 2018b).

Porém, mesmo com o aprimoramento contínuo dessas técnicas, elas possuem aplicações limitadas às escalas que abrangem, o que pronuncia a ausência de métodos precisos para determinar θ em escalas intermediárias, i.e., na faixa de poucos metros até a de alguns quilômetros (ROBINSON et al., 2008; SAYDE et al., 2010). Uma alternativa para suprir tal demanda e que tem se destacado nas últimas décadas na realização de estudos ambientais são os dispositivos de medição distribuída de temperatura (*Distributed Temperature Sensing* - DTS) (HE et al., 2018a; SELKER et al., 2006).

Os instrumentos DTS são capazes de realizar medições de temperatura ao longo de cabos de fibra óptica (FO) com extensões que abrangem uma ampla faixa de escala espacial (de poucos metros até mais de 1 km) (REIS et al., 2022; SELKER et al., 2006) e com intervalos de amostragem temporal e espacial de 5 s e 0,127 m, respectivamente (SAKAKI et al., 2019). A principal metodologia que tem sido aplicada com os sistemas FO-DTS para estimativas de θ é o método do aquecimento ativo (*Actively Heated Fiber Optic method* - método AHFO), em que o cabo monitora a resposta térmica do solo à aplicação de um pulso de calor (STRIEGL; LOHEIDE II, 2012).

Ao comparar os métodos HP e AHFO, nota-se que existe uma semelhança natural entre eles, uma vez que ambos monitoram a variação de temperatura do solo gerada pelo seu aquecimento (HE et al., 2018a). No método AHFO, os elementos metálicos de um cabo de FO, dispostos como um revestimento concêntrico aos demais componentes do cabo, funcionam como um condutor elétrico através do qual uma corrente elétrica é imposta, o que leva ao aumento da temperatura do cabo e do meio circundante que é monitorado pelo DTS (BENÍTEZ-BUELGA et al., 2014; SERNA; MUÑOZ; SUÁREZ, 2017; STRIEGL; LOHEIDE II, 2012).

Essa elevação da temperatura do solo relaciona-se com suas propriedades térmicas, como o calor específico volumétrico (C , $J.m^{-3}.^{\circ}C^{-1}$) e a condutividade térmica (λ , $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$). Para um mesmo solo, quanto maior é θ , maiores são C e λ . Uma vez que a água funciona como uma ponte que une as partículas sólidas do solo, ela permite que o calor seja transportado para longe da fonte aquecedora mais rapidamente, além de fornecer maior potencial de armazenamento de calor ao meio poroso, o que dificulta o seu aquecimento (SOURBEER; LOHEIDE II, 2015). Assim, mudanças de temperatura são mais difíceis de serem alcançadas para maiores valores de θ . Dessa forma, por meio da aplicação dos métodos HP e AHFO, é possível estabelecer uma relação inversamente proporcional entre θ e o aumento de temperatura observado (GAMAGE et al., 2021; LAGOS et al., 2020).

Assim como no método HP, o método AHFO permite que a temperatura seja monitorada pelo mesmo cabo que emite o calor (abordagem SPHP-DTS), ou por um segundo cabo paralelo ao cabo aquecedor (abordagem DPHP-DTS). Nessa última, uma distância de solo de poucos milímetros separa o cabo aquecedor do cabo sensor de temperatura (BENÍTEZ-BUELGA et al., 2014; HE et al. 2018a). Por outro lado, na abordagem SPHP-DTS, o solo circunda ambos os elementos, de forma que o emissor de calor e a fibra óptica funcionam como uma unidade.

As distinções de cada abordagem permitem que variações construtivas sejam executadas, especialmente no que tange ao uso de diferentes elementos aquecedores. Nesse sentido, fios de níquel e cromo embutidos dentro de cabos de FO e posicionados de forma paralela às fibras foram usados na abordagem SPHP-DTS (SOURBEER; LOHEIDE II, 2015). Da mesma forma, medições de temperatura foram efetuadas por um cabo óptico paralelo e separado por solo de um cabo elétrico composto por cobre, usado para o aquecimento (SHEHATA; HEITMAN; SAYDE, 2022).

O uso de diferentes materiais para gerar o aquecimento do solo é uma estratégia particularmente interessante, especialmente considerando o alto custo de aquisição dos cabos de FO revestidos com armadura metálica, tipicamente usados em aplicações do método AHFO (SHEHATA; HEITMAN; SAYDE, 2022). No caso particular do Brasil, ainda há maior dificuldade em adquirir cabos que aliem o revestimento metálico com as características ópticas requeridas pelo dispositivo DTS (e.g., diâmetro da fibra óptica). Isso exige que esses cabos sejam importados e em quantidades mínimas de 1 km, o que também eleva o custo de aquisição.

Nesse contexto, este trabalho buscou associar a medição distribuída de temperatura de um cabo óptico usual de telecomunicações ao uso de uma liga metálica ferrítica para gerar o aquecimento do solo. O uso desse material composto essencialmente por ferro, cromo e alumínio (i.e., liga Fe-Cr-Al) foi pretendido como uma alternativa mais atrativa para pesquisas envolvendo os sistemas FO-DTS, tendo em vista, especialmente, a popularização em território nacional do uso da temperatura como um traçador para a investigação de θ .

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a aplicabilidade da execução integrada de uma liga ferrítica (Fe-Cr-Al) aquecida com a medição distribuída de temperatura para o monitoramento da umidade do solo por meio da aplicação das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS em escala de laboratório. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Analisar a resposta térmica do solo ao aquecimento gerado por pulsos de calor com diferentes configurações de potência e duração aplicadas à liga Fe-Cr-Al;
- ii. Investigar o comportamento elétrico da liga Fe-Cr-Al durante a execução dos pulsos de calor;
- iii. Construir e validar curvas de correlação (calibração) entre o teor de umidade do solo e diferentes métodos de análise de dados de temperatura distribuída;
- iv. Comparar as medições distribuídas com medições pontuais de temperatura;
- v. Avaliar a uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al na direção axial.

2.1 Estrutura da dissertação

A partir dos objetivos apresentados, a dissertação está estruturada nas seguintes seções: Revisão Bibliográfica, Material e Métodos, Resultados e Discussão e Considerações Finais. A seção de Revisão Bibliográfica (tópico 3) busca sintetizar, com base na literatura científica, as propriedades dos solos que são relevantes para o embasamento da pesquisa executada, bem como introduzir ao leitor o funcionamento da tecnologia de medição distribuída de temperatura. Adicionalmente, é feito um paralelo entre o método do pulso de calor e o método do aquecimento ativo, tendo como contexto as suas aplicações em estudos de solos não saturados.

A seção de Material e Métodos (tópico 4) exibe a configuração experimental construída para a execução desta pesquisa. Também, a sistematização das medições dos diferentes equipamentos e sensores empregados é apresentada, em conjunto da forma de análise dos dados coletados. Em seguida, a seção 5 corresponde a apresentação dos Resultados e Discussão, e busca responder aos objetivos propostos de forma a contribuir com a construção do conhecimento, tendo em vista o contexto em que este trabalho se insere. Por fim, a seção de Considerações Finais (tópico 6) busca fazer um balanço dos principais resultados encontrados nesta dissertação, bem como procura apontar as limitações da mesma e direcionar as possibilidades de continuidade de pesquisa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Propriedades do solo

Os constituintes do solo existem nos estados sólido, líquido e gasoso. A fase sólida é representada por partículas minerais e orgânicas, enquanto a fase líquida corresponde à água, que pode conter sais dissolvidos. A fase gasosa é composta por ar, que frequentemente apresenta um alto teor de vapor de água (YONG; WARKENTIN, 1975). Na interação entre essas três fases, o solo pode ser dividido em solo saturado, onde o espaço poroso está totalmente preenchido por água (formando um meio bifásico), e em solo não saturado, em que a água ocupa parcialmente o espaço poroso, dividindo-o com o ar (meio trifásico) (LIBARDI, 2018). A condição em que o solo se encontra totalmente seco também forma um meio bifásico, mas que ocorre com maior dificuldade, porque a água é fortemente atraída pelas partículas e pelos poros do solo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015). Qualquer variação que ocorra em uma só fase ou nas três fases em conjunto leva à alteração das interações entre elas, devido à complexidade da composição e das propriedades do solo (YONG; WARKENTIN, 1975).

Em razão desse complexo sistema formado no solo, as propriedades que o caracterizam envolvem grandezas de natureza física, mecânica, térmica, elétrica, hidráulica, físico-química, dentre outras. A Tabela 1 apresenta algumas grandezas do solo categorizadas de acordo com a natureza de suas propriedades. Nos próximos tópicos, o foco será direcionado ao teor de umidade e às propriedades térmicas calor específico e condutividade térmica.

Tabela 1 – Classificação das grandezas do solo de acordo com a natureza de suas propriedades

Natureza das propriedades do solo	Grandezas relacionadas
Física ¹	Densidade aparente seca, densidade saturada, densidade dos sólidos, índice de vazios, porosidade, teor de umidade volumétrico e grau de saturação.
Mecânica ¹	Resistência ao cisalhamento, resistência à compressão, resistência à tração, coesão e ângulo de atrito.
Térmica ²	Temperatura, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica.
Elétrica ³	Condutividade elétrica, resistividade elétrica e potencial elétrico.
Hidráulica ¹	Vazão, densidade de fluxo, velocidade de percolação, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica e carga hidráulica.
Físico-química ¹	Potencial redox, pH, superfície específica, ponto de carga zero e estabilidade dos agregados.

Fonte: adaptado de Carvalho¹ et al. (2015), He² et al. (2018a) e Pozdnyakova³ (1999).

3.1.1 Teor de umidade

A água armazenada na superfície terrestre é uma variável chave que controla vários processos climáticos. Além de impactar nas trocas gasosas com a atmosfera, ela é de grande relevância para os ciclos energético e hidrológico (SENEVIRATNE et al., 2010). Nesse contexto, o conteúdo de água do solo é um fator dominante na interação solo-planta-atmosfera e na infiltração e percolação da água através da zona não saturada (STRIEGL; LOHEIDE II, 2012).

Uma maneira direta e precisa de medir a umidade de uma amostra de solo é por meio da separação da água do meio poroso, o que é usualmente alcançado por meio do aquecimento (KARGAS; SOULIS, 2012). Isso permite quantificar o teor de umidade gravimétrico do solo, θ_g ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (EMBRAPA, 2017):

$$\theta_g = \frac{m_w}{m_s} \quad (1)$$

Em que m_w é a massa de água (kg), e m_s é a massa de solo seco (kg).

Por outro lado, o teor de umidade volumétrico do solo, θ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), é definido pela relação entre o volume total de uma amostra de solo, V_t (m^3), e o volume de água contido nessa amostra, V_w (m^3) (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015). No entanto, a quantificação de θ é comumente feita por meio de sua correlação com θ_g (ROBINSON et al., 2008):

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \theta_g \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (2)$$

Em que ρ_b é a densidade aparente do solo seco ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), e ρ_w é a massa específica da água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

As Equações 1 e 2 representam as formas mais simplificadas de se obter θ_g e θ , respectivamente. No entanto, existem outras técnicas usuais que permitem estimar θ indiretamente, em tempo real e muitas vezes de forma não destrutiva. Dentre elas, o sensoriamento remoto se destaca para medições em grande escala ($> \sim 80 \text{ km}^2$), por meio, por exemplo, do satélite *Soil Moisture Active Passive* (PANCIERA et al., 2014; ROBINSON et al., 2008).

Para escalas intermediárias (de alguns m^2 até 80 km^2) (ROBINSON et al., 2008), há a possibilidade de empregar os radares de penetração no solo (WEIHERMÜLLER et al., 2007), a indução eletromagnética (REEDY; SCANLON, 2003) e os dispositivos de medição

distribuída de temperatura (SAYDE et al., 2010), sendo esse último método abordado na seção 3.3. Já para medições pontuais, podem-se citar os métodos da reflectometria no domínio do tempo (ABDULLAH et al., 2018), da sonda de nêutrons (KODIKARA et al., 2014) e o método do pulso de calor (ZHANG et al., 2014). Para o contexto deste trabalho, destaca-se esse último, que será abordado na seção 3.2.

3.1.2 Propriedades térmicas

As três principais propriedades térmicas do solo são o calor específico volumétrico, a condutividade térmica e a difusividade térmica. O calor específico, c ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), também referido como calor específico volumétrico, C ($\text{J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$), é definido como a quantidade de calor necessária para causar uma variação unitária de temperatura por unidade de massa ou de volume de substância, nesse caso o solo (BENÍTEZ-BUELGA et al., 2014).

Frequentemente, C relaciona-se com θ por meio da Equação 3 (KLUITENBERG, 2002), em que C é expresso como a soma ponderada dos valores de calor específico dos constituintes do solo, desprezando-se o seu conteúdo orgânico e a fase gasosa. A Equação 3 permite identificar que C é tão maior quanto maior for θ , indicando que uma variação unitária de temperatura em um solo úmido requer maior quantidade de calor para ocorrer, em comparação a um solo seco (ABU-HAMDEH, 2003).

$$C = \rho_b c_s + \rho_w c_w \theta \quad (3)$$

Em que c_s é o calor específico das partículas sólidas do solo ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), e c_w é o calor específico da água ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$).

Já a condutividade térmica, λ ($\text{J.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ou $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), é definida como o calor conduzido pelo solo quando submetido a um gradiente de temperatura, sendo, portanto, uma propriedade que descreve a habilidade do solo em transmitir calor (HE et al., 2018b). O movimento do calor no solo tem sua taxa de fluxo determinada tanto pela força de um gradiente de temperatura quanto pela facilidade com que esse fluxo se move através do solo (BRADY; WEIL, 2013), sendo essa última definida pela magnitude de λ .

A λ é influenciada por diversos fatores, sendo os mais importantes o grau de compactação do solo e o seu teor de umidade. No caso desse último, devido à maior condutividade térmica da água do que do ar (0,61 e 0,03 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ a 25°C, respectivamente), o calor atravessa mais rapidamente um solo úmido ou saturado do que um solo seco (BRADY; WEIL, 2013). Em baixos valores de θ , λ é regido, principalmente, pelo conteúdo volumétrico

de ar no solo, com pequenas variações decorrentes da composição mineral de sua fase sólida. Porém, à medida que θ aumenta, λ passa a ser controlado pelo contato entre as fases que compõe o solo, e.g., pelo envolvimento das suas partículas sólidas pelas películas de água contidas nos poros (ROBINSON et al., 2008).

Por fim, a difusividade térmica, α ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), descreve a taxa de transmissão de variações de temperatura que ocorrem no solo. A difusividade é igual a razão entre λ e C , podendo, portanto, ser interpretada como a proporção entre a habilidade do solo em transmitir calor e a sua habilidade em armazenar calor (HE et al., 2018b). Assim, α é suscetível à ocorrência de mudanças relativas em λ e C , e, por conta disso, seu comportamento em função de θ não é tão facilmente descrito como o dessas duas últimas propriedades do solo (ABU-HAMDEH, 2003).

A importância das propriedades térmicas do solo na manutenção de diferentes processos hidrológicos reflete-se nas suas relações com as transferências de calor e de água através da superfície terrestre e do meio subterrâneo, as quais têm grande relevância na dinâmica do tempo e do clima do planeta (OCHSNER; HORTON; REN, 2001; ZHENG et al., 2015). Direta ou indiretamente, o uso dessas propriedades tem sido cada vez mais considerado como alternativa frente a outras metodologias para determinar θ (ROBINSON et al., 2008).

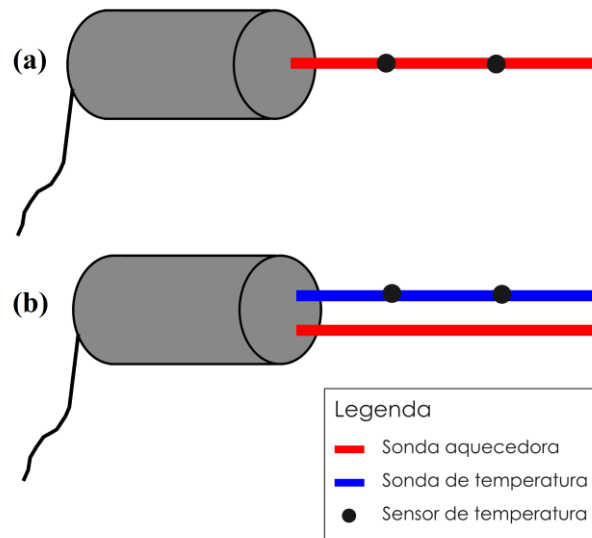
3.2 Método do pulso de calor

Para o monitoramento de diferentes propriedades do solo, o método do pulso de calor (método HP) baseia-se em medições da resposta térmica do solo à aplicação de um pulso de calor (HE et al., 2018b). Esse pulso é gerado por uma fonte de calor (i.e., material aquecedor) inserida no solo, e que normalmente é composta por ligas metálicas de níquel e/ou cromo. Já para o monitoramento da temperatura de resposta do solo ao aquecimento, usualmente são empregados termopares ou termoresistores (BRISTOW; WHITE; KLUITENBERG, 1994; DIAS et al., 2013). No método HP, são utilizados dispositivos com diferentes geometrias, tais como os de sonda única (método SPHP) e de sonda dupla (método DPHP). A Figura 1 apresenta um esquema desses dispositivos e seus componentes.

No método SPHP, uma única sonda com alguns centímetros de comprimento é inserida no solo. Nessa sonda, o material aquecedor e pelo menos um sensor de temperatura devem ser mantidos em contato um com o outro (Figura 1a). Usualmente, o aquecedor é de mesmo comprimento da própria sonda, enquanto as medições de temperatura são realizadas por sensores pontuais distribuídos ao longo do comprimento da sonda. Após a inserção da sonda

no solo, a temperatura é medida durante o aquecimento, e, em alguns casos, durante o resfriamento que ocorre depois que o aquecimento é interrompido (BRISTOW; WHITE; KLUITENBERG, 1994; HE et al., 2018b).

Figura 1 – Esquema ilustrativo dos dispositivos dos métodos (a) SPHP e (b) DPHP



Fonte: adaptado de Forster (2019).

Tanto no método SPHP quanto no DPHP, as medições de temperatura fundamentam-se na emissão de um fluxo de calor radial pelo aquecedor (HE et al., 2018b). A taxa de transmissão radial de calor, e, portanto, a temperatura de resposta do solo, depende da sua mineralogia, do tamanho das partículas, de ρ_b e, principalmente, de C , λ e θ (SHIOZAWA; CAMPBELL, 1990). Diferente do método SPHP, no método DPHP são utilizadas duas sondas dispostas em paralelo e separadas por alguns milímetros de distância (Figura 1b). Nesse caso, uma sonda possui o material aquecedor (sonda aquecedora), enquanto a outra contém os sensores de temperatura (sonda de temperatura) (BRISTOW, 1998).

As estimativas de C e λ pelo método HP partem de soluções da equação geral de transferência de calor radial em meios porosos (CARSLAW; JAEGER, 1959). Algumas soluções para o método SPHP podem ser encontradas em Shiozawa e Campbell (1990) e em Bristow, White e Kluitenberg (1994). Já para aplicações do DPHP, destacam-se os modelos analíticos *Infinite Line Heat Source solution* (CAMPBELL; CALISSENDORFF; WILLIAMS, 1991) e de Knight e Kluitenberg (2004), e também a solução semianalítica de Knight et al. (2012). A partir desses modelos, é usual estimar θ por meio, por exemplo, da Equação 3.

Os princípios do método HP possuem outras aplicabilidades que abrangem diferentes componentes hidrológicas. Dentre elas, podem-se citar estimativas da densidade do fluxo de água em meios porosos saturados (LU et al., 2018) e não saturados (MORI et al., 2005), da evaporação de água do solo (DEOL et al., 2014) e do fluxo de seiva no caule de plantas (GREEN; CLOTHIER; JARDINE, 2003). Para maiores detalhes acerca do método HP, recomenda-se ao leitor a consulta de He et al. (2018b).

3.3 Medição distribuída de temperatura

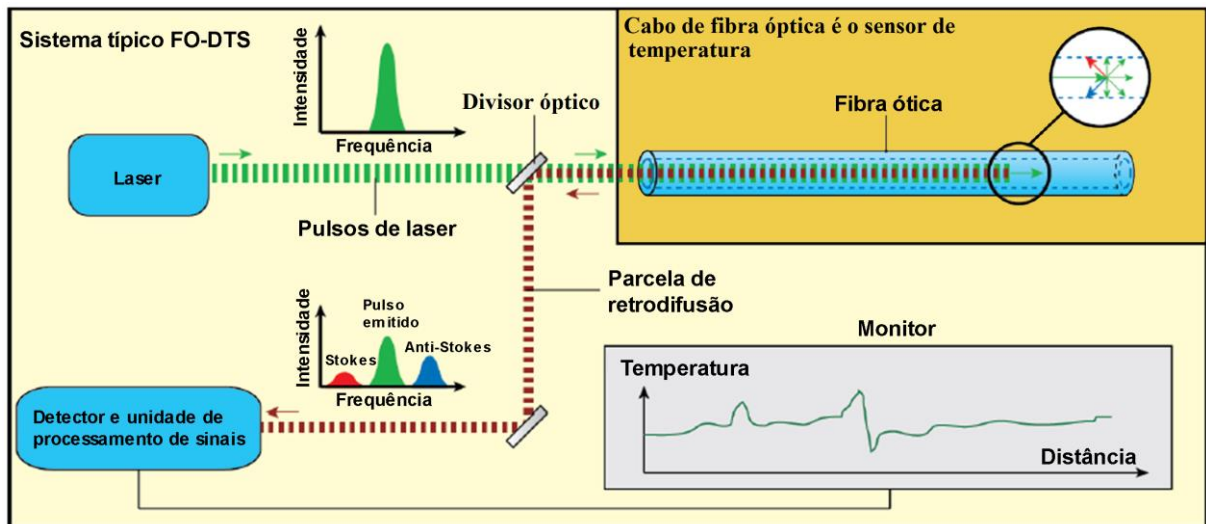
Os dispositivos de medição distribuída de temperatura (DTS) são instrumentos capazes de medir a temperatura de forma espacialmente distribuída ao longo de cabos de fibra óptica (FO) com extensões que atingem a marca de 10 km (HAUSNER et al., 2011). Ao conjunto formado por um dispositivo DTS e cabos de FO, dá-se o nome de sistema FO-DTS. Desenvolvidos nos anos 1980, esses sistemas foram primeiramente utilizados para o monitoramento da ocorrência de incêndios e de vazamentos em tubulações de óleo e gás (TYLER et al., 2009). Mesmo que o seu uso em aplicações nas geociências tenha dado os primeiros passos nos anos 1990, foi apenas a partir da década de 2000, mais precisamente com o trabalho de Selker et al. (2006), que o potencial dos sistemas FO-DTS para o monitoramento hidrológico foi colocado em evidência.

Para medir a temperatura de um cabo de FO, o DTS emite um pulso de laser com frequência conhecida que percorre a fibra ao longo de toda a extensão longitudinal do cabo. Ao percorrer esse caminho, pela interação entre o laser e a estrutura cristalina, o pulso sofre o fenômeno da retrodifusão, isto é, parte do laser é absorvido pela fibra óptica do cabo e parte é refletido na mesma direção em que foi inicialmente emitido. Nesse processo de retrodifusão, o pulso de laser retorna à direção original com duas frequências distintas, sendo uma acima e outra abaixo da frequência do pulso emitido. Isso acontece porque a energia cinética dos fótons incidentes não se conserva, o que faz com que as frequências do laser incidente e refletido sejam diferentes. A esse fenômeno dá-se o nome de efeito Raman (SUÁREZ et al., 2011).

A parcela de laser com frequência superior à emitida é denominada parcela ou sinal de retrodifusão anti-Stokes, e a porção que sofreu retrodifusão com frequência inferior à emitida é chamada de sinal Stokes. O sinal de retrodifusão Stokes é produzido quando um fóton excita uma molécula vibrante localizada na estrutura de vidro da fibra, fazendo-a alcançar um estado de energia molecular ligeiramente superior ao original. Por outro lado, quando o fóton incidente atinge uma molécula previamente excitada e essa molécula retorna ao estado vibracional básico,

gera-se o sinal de retrodifusão anti-Stokes (SUÁREZ et al., 2011). A Figura 2 apresenta como as medições de temperatura são obtidas pelos sistemas FO-DTS.

Figura 2 – Diagrama de funcionamento de um sistema FO-DTS



Fonte: adaptado de Suárez et al. (2011).

A intensidade do sinal de retrodifusão anti-Stokes depende fortemente da temperatura da fibra óptica, enquanto a intensidade do sinal Stokes é pouco dependente dessa temperatura. Por causa dessas diferentes dependências de cada parcela à temperatura, a relação entre os sinais anti-Stokes e Stokes pode ser usada para determinar a temperatura da fibra óptica (SUÁREZ et al., 2011). Assim, uma vez que a velocidade e o tempo de propagação do pulso de laser ao longo do cabo sejam conhecidos, valores de temperatura podem ser atribuídos a diferentes pontos da fibra em que a retrodifusão ocorreu (GRATTAN; SUN, 2000).

Os dispositivos DTS mais avançados são capazes de fornecer medidas de temperatura dos cabos de FO com intervalos de amostragem espacial e temporal de 0,127 m e 5 s, respectivamente. Além disso, a resolução espacial dos DTS, que consiste na distância ao longo da qual os 10% e os 90% de uma mudança abrupta de temperatura pode ser detectada, alcança valores de 0,25 m (SAKAKI et al., 2019; SHEHATA; HEITMAN; SAYDE, 2022). Para informações detalhadas sobre a performance dos sistemas FO-DTS, recomenda-se ao leitor a consulta de Bolognini e Hartog (2013) e de Tyler et al. (2009).

Ainda que o uso da temperatura como traçador em sistemas hidrológicos seja de longa data (TYLER et al., 2009), graças a essas características dos sistemas FO-DTS, o seu uso na

medição e no monitoramento de diferentes variáveis e processos hidrológicos tanto em laboratório quanto *in situ* tem ganhado destaque nos últimos anos. Dentre essas aplicações, pode-se citar estimativas de θ (SAYDE et al., 2014), de λ (APPERL; BERNHARDT; SCHULZ, 2019) e da taxa de evaporação da água do solo (LAGOS et al., 2020). Também, no que tange a análise do movimento da água no solo, destacam-se estudos de mapeamento da formação de bulbos de umidade no solo (GAMAGE; BISWAS; STRACHAN, 2018), de identificação de pontos de interação rio-aquífero (REIS et al., 2022; REIS, em desenvolvimento) e de estimativas de taxas de infiltração em aquíferos de recarga gerenciada (MEDINA et al., 2020).

Para estimativas de θ a partir de medições distribuídas de temperatura, dois métodos têm sido utilizados: o método passivo e o método do aquecimento ativo. No método passivo, o sistema monitora a temperatura natural do meio circundante (STEELE-DUNNE et al., 2010). Propriedades do solo como θ podem ser inferidas a partir de variações da temperatura do solo ocasionadas pela temperatura do ar (CAO et al., 2016). Em aplicações de campo, por exemplo, esse método baseia-se em mudanças de temperatura do solo causadas pelo ciclo diário da temperatura. Entretanto, essa abordagem apresenta grandes obstáculos em condições em que a resposta térmica do solo às variações naturais de temperatura não é expressiva a ponto de permitir a detecção de diferentes condições de umidade. Isso dificulta a obtenção de valores precisos de θ (SAYDE et al., 2010; STEELE-DUNNE et al., 2010).

Com essas limitações, e a partir da inspiração do método HP, o método de aquecimento ativo (método AHFO) foi desenvolvido (SAYDE et al., 2010; WEISS, 2003), em que o cabo óptico monitora a variação de temperatura do solo gerada pelo seu aquecimento (HE et al., 2018a). Essa aplicação será apresentada no tópico a seguir.

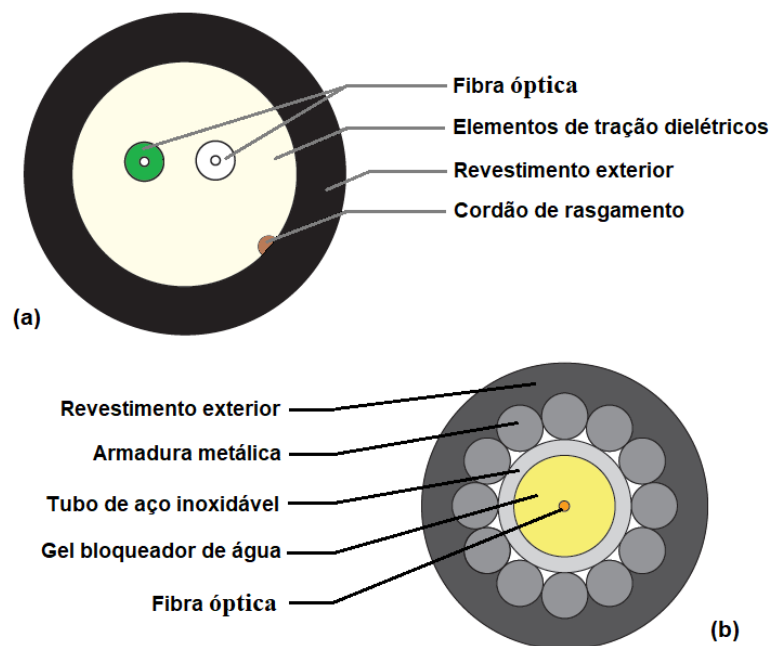
3.4 Método do aquecimento ativo

Assim como o método HP, o método AHFO monitora a resposta térmica do solo à aplicação de um pulso de calor (STRIEGL; LOHEIDE II, 2012). Nesse caso, o sistema FO-DTS utiliza cabos de FO que possuem elementos metálicos em sua composição, que usualmente são dispostos como um revestimento concêntrico aos demais componentes do cabo (BENÍTEZ-BUELGA et al., 2014; SERNA; MUÑOZ; SUÁREZ, 2017). Esse revestimento que, em aplicações de telecomunicação, tem a função de reforçar a proteção à fibra óptica, é uma armadura formada por um conjunto de filamentos de cobre e/ou aço que percorrem toda a

extensão longitudinal do cabo (CIOCCA et al., 2012). A Figura 3 apresenta a diferença entre a seção de um cabo revestido e a de um cabo de FO de composição simplificada.

Quando uma tensão elétrica é aplicada na armadura metálica dos extremos de uma seção desse cabo, uma corrente elétrica passa a fluir por esses elementos, que funcionam como condutores elétricos. Com isso, o cabo de FO é aquecido e ocorre um aumento da sua temperatura e do meio circundante, que é monitorada pelo DTS (SERNA; MUÑOZ; SUÁREZ, 2017). Tal como no método HP, essa reposta térmica do solo ao seu aquecimento é função de propriedades como C e λ , o que permite que θ seja investigado de diferentes maneiras (SHIOZAWA; CAMPBELL, 1990; WANG et al., 2016). Ademais, isso torna o método AHFO mais eficiente do que o método passivo em estimativas de θ .

Figura 3 – Composições típicas dos cabos de fibra óptica usados nos métodos (a) passivo e (b) do aquecimento ativo



Fonte: adaptado de (a) America Fujikura Ltd. (2002) e (b) America Fujikura Ltd. (2011).

Trabalhos precursores da metodologia AHFO incluíam o uso de um único cabo de FO (SAYDE et al., 2010), em que a temperatura era monitorada pelo mesmo cabo que emitia o calor. Pela similaridade com o método SPHP, essas aplicações passaram a ser comumente denominadas de SPHP-DTS (HE et al., 2018a). Nesse sentido, apesar das diferenças nas escalas

de aplicação, algumas pesquisas buscaram beneficiar a abordagem SPHP-DTS a partir da utilização de soluções matemáticas do método SPHP.

Por exemplo, em um experimento conduzido em um lisímetro, Ciocca et al. (2012) utilizaram modelos consolidados do método SPHP para encontrar λ e θ por meio de medições de temperatura obtidas com o aquecimento ativo. Ao comparar os cálculos de θ com medições de sensores, os resultados demonstraram ótima correlação, sobretudo para maiores valores de θ (CIOCCA et al., 2012).

Contudo, enquanto os modelos do método SPHP limitam-se a cálculos precisos apenas de λ e θ , o método DPHP pode ser utilizado com acurácia para encontrar θ , C e λ (HE et al., 2018a). Determinados por isso, Benítez-Buelga et al. (2014) realizaram em laboratório o primeiro estudo de viabilidade da integração entre o método DPHP e o método AHFO. Nessa abordagem, chamada de DPHP-DTS, dois cabos de FO são posicionados em paralelo e separados por uma certa distância de solo, da ordem de milímetros. Assim, um cabo tem a função de aquecer o solo (i.e., cabo aquecedor) e outro a de monitorar as variações de temperatura (i.e., cabo de temperatura) geradas pelo aquecimento (BENÍTEZ-BUELGA et al., 2014).

A partir de medições de temperatura, é possível calcular λ e/ou C com modelos do método DPHP, o que, no caso dessa última propriedade, permite estimar θ com a Equação 3. Benítez-Buelga et al. (2014) realizaram esse procedimento usando o modelo analítico de Knight e Kluitenberg (2004), e concluíram que existe um erro nas estimativas de θ em relação a medidas pontuais, especialmente para menores valores de θ . Nesse sentido, outras pesquisas envolvendo a aplicação da abordagem DPHP-DTS em laboratório indicam que estimativas confiáveis de C , λ e θ são alcançadas especialmente quando modelos semianalíticos (e.g., Knight et al., 2012) são empregados (APPERL; BERNHARDT; SCHULZ, 2019; SHEHATA et al., 2020).

No entanto, aplicações do método AHFO para investigar θ não se restringem ao uso desses modelos originários do método HP. Nesse sentido, métodos que requerem menos esforço computacional e que ainda permitem estabelecer correlações entre θ e a resposta térmica do solo ao aquecimento foram desenvolvidos, e têm sido aplicados com resultados satisfatórios. Dentre esses métodos, destaca-se a temperatura acumulada e o máximo aumento de temperatura, que serão apresentados a seguir.

3.4.1 Métodos da temperatura acumulada e do máximo aumento de temperatura

O método do aumento da temperatura acumulada, T_{cum} (°C.s), foi concebido por Sayde et al. (2010) em uma aplicação da abordagem SPHP-DTS em laboratório. Seu cálculo é feito pela Equação 4 (SAYDE et al., 2010):

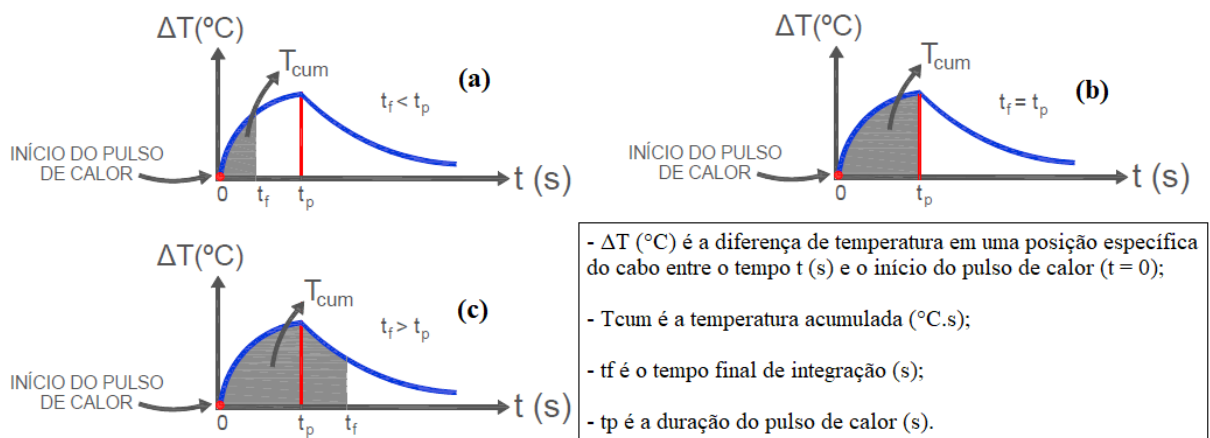
$$T_{cum} = \int_0^{t_f} \Delta T(t) dt \quad (4)$$

Em que $\Delta T(t)$ é a diferença de temperatura em uma posição específica do cabo entre o tempo t (s) e o início do pulso de calor ($t = 0$) (°C), e t_f é o tempo final de integração (s).

T_{cum} é função das propriedades térmicas do solo. Maiores valores de C e λ , que aumentam em função de θ , elevam a taxa com que o calor é conduzido para longe do material aquecedor, o que reduz o valor da integral da Equação 4 (SAYDE et al., 2010). Dessa maneira, T_{cum} pode ser relacionada ao θ por meio de equações de correlação (calibração) (DONG et al., 2017).

Graficamente, T_{cum} é representada pela área sob a curva de ΔT em função do tempo t . Nesse aspecto, a Figura 4 apresenta três cenários de aplicação desse método, considerando a relação entre t_f e a duração do pulso de calor, t_p (s). Esses cenários envolvem as condições de $t_f < t_p$ (Figura 4a), $t_f = t_p$ (Fig. 4b) e $t_f > t_p$ (Fig. 4c). Nessa última, considera-se o período de resfriamento do solo, após o fim do aquecimento.

Figura 4 – Representação gráfica de T_{cum} para as condições (a) $t_f < t_p$, (b) $t_f = t_p$ e (c) $t_f > t_p$



Fonte: autor (2023).

No entanto, apesar dessas possibilidades, o uso de $t_f = t_p$ é consolidado na literatura (BENÍTEZ-BUELGA et al., 2016; GAMAGE; BISWAS; STRACHAN, 2019; LAGOS et al., 2020). Além disso, Serna, Muñoz e Suárez (2017) testaram diferentes valores de t_f e concluíram que não existem diferenças expressivas entre as aplicações de $t_f = t_p$ e $t_f \neq t_p$.

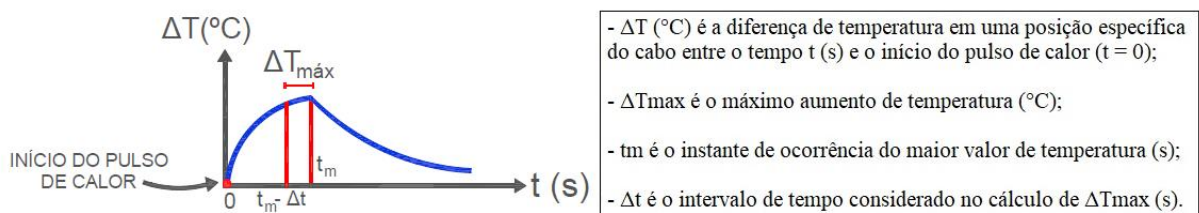
Outro método de análise de dados de temperatura usualmente utilizado é o máximo aumento de temperatura, ΔT_{max} (°C). Esse método representa uma média dos valores de temperatura coletados durante um certo intervalo de tempo, Δt (s) (STRIEGL; LOHEIDE II, 2012), e que pode ser escrito no formato genérico:

$$\Delta T_{max} = \frac{1}{N} \sum_{t_m-\Delta t}^{t_m} \Delta T(t) \quad (5)$$

Em que t_m é o instante de ocorrência do maior valor de temperatura (s), e N é o número de medidas de temperatura contidas em Δt .

A Figura 5 ilustra a aplicação do método ΔT_{max} para um número N e um intervalo Δt arbitrários. Assim como no método T_{cum} , ΔT_{max} pode ser correlacionado ao θ por meio da definição de modelos de calibração. Maiores valores de θ elevam C e λ , que, por sua vez, diminuem ΔT_{max} (DONG et al., 2017).

Figura 5 – Representação gráfica genérica de ΔT_{max}



Fonte: autor (2023).

3.4.2 Síntese das aplicações das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS

Até onde a revisão de literatura desta pesquisa se baseia, o uso direto dos métodos T_{cum} e ΔT_{max} na investigação de θ por meio do aquecimento ativo restringe-se à abordagem SPHP-DTS. Porém, uma vez que ambos os métodos se baseiam unicamente nas medições de temperatura do sistema FO-DTS, seus usos passam a ser válidos para ambas SPHP-DTS e DPHP-DTS. Além disso, no contexto dessa última, o cálculo de ΔT_{max} é comum em modelos do método DPHP que estimam as propriedades térmicas do solo (e.g., KNIGHT;

KLUITENBERG, 2004), sendo, portanto, uma métrica indiretamente usada na abordagem DPHP-DTS (BENÍTEZ-BUELGA et al., 2014).

A investigação de θ a partir de T_{cum} ou ΔT_{max} ocorre por meio da construção de uma curva ou de um modelo de calibração. De maneira geral, valores de θ são obtidos de forma direta com o uso de sensores pontuais, sendo posteriormente relacionados a T_{cum} ou ΔT_{max} calculados a partir das medições distribuídas de temperatura (GAMAGE; BISWAS; STRACHAN, 2018). Assim, obtém-se uma curva de calibração, que pode ser validada por meio da repetição das medições sob condições semelhantes às originais (LAGOS et al., 2020).

Essas aplicações têm gerado resultados satisfatórios nas estimativas de θ , com execução da abordagem SPHP-DTS (GIL-RODRÍGUEZ et al., 2013; SERNA; MUÑOZ; SUÁREZ, 2017). Apesar da abordagem DPHP-DTS restringir-se ao uso dos modelos matemáticos usuais do método DPHP, sua aplicação ainda permite discussões acerca da evolução temporal da resposta térmica do solo ao aquecimento (SHEHATA et al., 2020), que também será executada neste trabalho.

Ademais, é importante destacar que essa resposta térmica depende da configuração do pulso de calor aplicado. Nesse sentido, diferentes estratégias de aquecimento têm sido avaliadas, variando-se a taxa com que o calor é aplicado ao material aquecedor por unidade de comprimento ($J.s^{-1}.m^{-1}$), e também a duração do pulso de calor (t_p). A taxa de calor aplicado corresponde à potência aplicada por metro de material aquecedor ($W.m^{-1}$). Assim, em função da intensidade da potência aplicada e da duração do aquecimento, é comum classificar os pulsos de calor como sendo de alta ou baixa potência, e também como sendo de curta ou longa duração.

Nesse aspecto, estratégias de aquecimento configuradas com alta potência e curta duração são consolidadas (i.e., $20 W.m^{-1}$ e 180 s), uma vez que garantem excelente correlação entre θ e dados distribuídos de temperatura (APPERL; BERNHARDT; SCHULZ, 2019; GAMAGE; BISWAS; STRACHAN, 2018; SAYDE et al., 2010;). Apesar disso, a execução dessas configurações de alta potência ainda representa um obstáculo a ser superado, especialmente em condições onde a disponibilidade de energia para gerar o aquecimento pode ser limitada (e.g., aplicações de campo) (DONG et al., 2017). Por causa disso, recentemente, algumas pesquisas buscaram avaliar diferentes estratégias de aquecimento. Em comparação a aplicações de alta potência, ótimos resultados foram encontrados especialmente utilizando pulsos de calor de baixa potência e longa duração (i.e., $5 W.m^{-1}$ e 600 s) (GAMAGE et al., 2021).

Por fim, deve-se destacar que algumas variações práticas foram executadas no contexto das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS. Por exemplo, ao aplicarem essa última, Shehata, Heitman e Sayde (2022) avaliaram dois materiais aquecedores distintos: um cabo de FO ativo típico e um cabo elétrico usual composto por cobre. Medições de temperatura foram efetuadas por um cabo óptico paralelo e separado por uma certa distância de solo das fontes aquecedoras. As combinações testadas mostraram que a precisão do sistema FO-DTS foi semelhante quando qualquer um dos dois cabos de aquecimento foi usado, sugerindo que um elemento de aquecimento mais simples pode ser utilizado como alternativa ao cabo de FO com revestimento metálico (SHEHATA; HEITMAN; SAYDE, 2022).

Da mesma forma, Sourbeer e Loheide II (2015) aplicaram a abordagem SPHP-DTS utilizando um cabo de FO que possui os elementos aquecedores inclusos dentro do revestimento externo do cabo. Porém, nesse caso, diferentemente do habitual revestimento metálico concêntrico às fibras, fios aquecedores de níquel e cromo eram posicionados de forma paralela ao revestimento da própria fibra óptica. Esses exemplos que fogem do uso dos cabos de FO ativos tradicionais abrem oportunidades para diferentes aplicações das metodologias SPHP-DTS e DPHP-DTS, tal como a que foi executada neste trabalho.

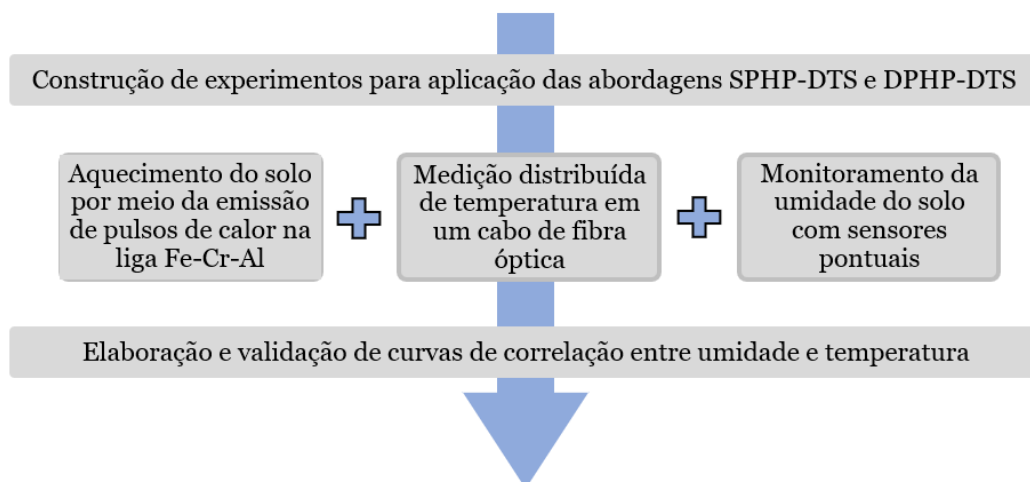
4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, dois modelos físicos experimentais foram construídos em laboratório para a aplicação das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS. Em ambas, uma liga ferrítica foi empregada para gerar o aquecimento do solo, enquanto a variação de temperatura foi monitorada por um sistema FO-DTS. O material aquecedor é composto majoritariamente por ferro, cromo e alumínio (i.e., liga Fe-Cr-Al), enquanto o cabo de FO empregado possui composição típica de cabos usados em aplicações gerais de telecomunicações.

Os experimentos foram construídos utilizando duas tubulações de PVC DEFoFo, cada uma com 1 m de comprimento, com seus eixos longitudinais dispostos na horizontal. Os tubos foram devidamente preparados para receber, em seu interior, o solo e demais componentes. Um dos tubos foi arranjado para admitir a liga Fe-Cr-Al em contato com o revestimento externo do cabo óptico (abordagem SPHP-DTS), enquanto o outro foi projetado para manter a liga e o cabo separados por uma distância de centro a centro de 10 mm (DPHP-DTS).

O teor de umidade foi monitorado em cada tubo experimental com sensores pontuais. Com isso, foi possível elaborar e validar modelos de calibração entre θ e diferentes métodos de análise de dados de temperatura distribuída. Essas curvas foram feitas a partir da resposta térmica do solo ao aquecimento da liga Fe-Cr-Al utilizando pulsos de calor de diferentes configurações (i.e., diferentes valores de potência aplicada e de duração do pulso). A Figura 6 resume os processos metodológicos executados durante o desenvolvimento desta pesquisa. Nos próximos itens, esses procedimentos serão apresentados detalhadamente.

Figura 6 – Resumo da metodologia executada

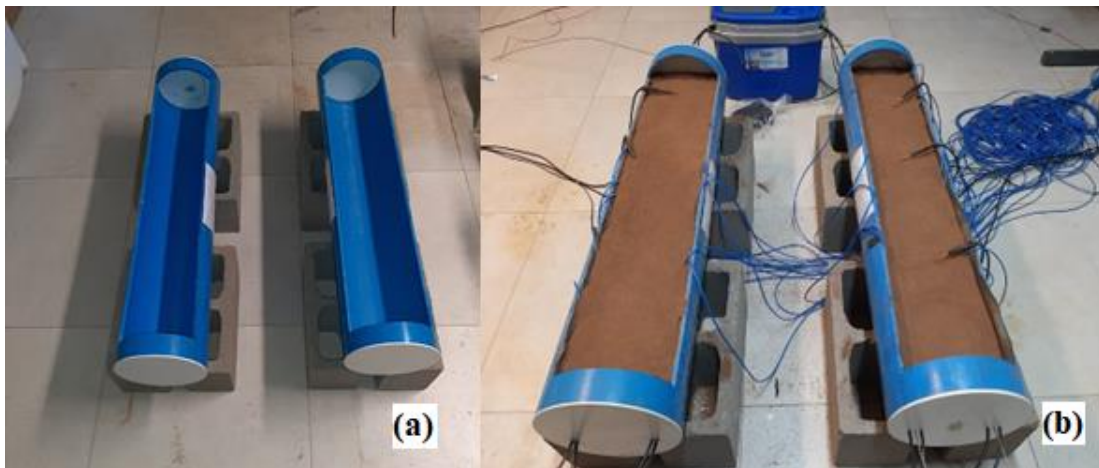


4.1 Configuração experimental

4.1.1 Visão geral

A Figura 7 apresenta as duas tubulações de PVC DEFoFo utilizadas para construir os modelos experimentais de aplicação das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS. Ambos os tubos, cada um com 1 m de comprimento e 200 mm de diâmetro, foram posicionados longitudinalmente na horizontal. Os tubos de PVC foram devidamente preparados com o corte de parte de suas superfícies, de forma a criar uma abertura que permitisse o posicionamento do solo e demais componentes em seu interior (Figura 7a). Além disso, as extremidades de cada tubo foram vedadas com uma chapa de PVC de 10 mm de espessura e de mesmo diâmetro externo dos tubos, garantindo que não houvesse perdas de água e de material granular através delas. Como 5 mm de cada chapa foram colados dentro da tubulação, o comprimento útil de cada tubo foi de 0,99 m. Ademais, as chapas foram furadas para permitir que a liga Fe-Cr-Al e o cabo de FO atravessassem o solo contido nos experimentos (Figura 7b).

Figura 7 – Tubulações de PVC utilizadas para a construção dos experimentos: (a) preparação dos tubos e (b) assentamento do solo

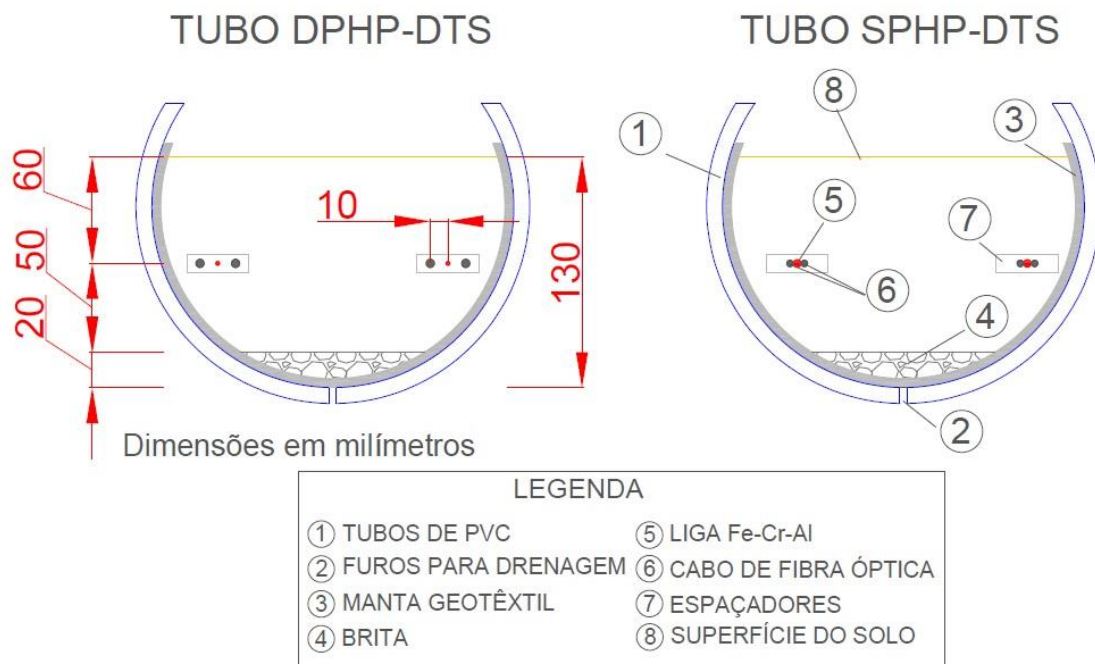


Fonte: autor (2023).

A Figura 8 apresenta um esquema em corte transversal de cada tubo, exibindo alguns elementos de seus constituintes. O fundo de cada tubulação foi perfurado com furos de 4 mm de diâmetro, espaçados de centro a centro em 20 mm, a fim de permitir a ocorrência de drenagem livre, quando do umedecimento do solo. Por isso, uma fina manta geotêxtil foi posicionada em toda a superfície interna dos tubos. Assim, foi possível evitar perda de material

granular fino e permitir apenas a passagem de água através dos furos. Além disso, para aumentar a uniformidade da drenagem, uma camada de brita de cerca de 20 mm de espessura foi assentada no fundo dos tubos. Acima das britas, uma camada de aproximadamente 50 mm de solo foi assentada, de forma a atingir o plano horizontal de posicionamento da liga Fe-Cr-Al, do cabo de FO e dos demais componentes dos experimentos (ver tópico 4.1.3).

Figura 8 – Esquema da seção transversal dos tubos experimentais



Fonte: autor (2023).

Conforme a Figura 8 exhibe, um dos tubos foi preparado para admitir a liga e o cabo óptico em contato (SPHP-DTS), enquanto o outro foi projetado para manter a liga e o cabo separados por uma distância de centro a centro de 10 mm (DPHP-DTS). Para garantir o posicionamento adequado da liga Fe-Cr-Al e do cabo, foram utilizadas peças de acrílico (i.e., espaçadores). Os espaçadores foram confeccionados sob medida para atender às necessidades geométricas e de dimensionamento, de forma a permitir apenas a passagem e o ajuste da liga e do cabo, conforme seus respectivos diâmetros.

Após o posicionamento desses materiais, medidas efetuadas com um paquímetro (precisão de 0,05 mm) em diferentes pontos do experimento DPHP-DTS mostraram que a distância real de centro a centro entre a liga e o cabo foi de 9,58 mm, enquanto a distância de solo foi de 6,03 mm. Por fim, outra camada de solo com cerca de 60 mm de espessura foi

assentada, de maneira a cobrir a liga Fe-Cr-Al e o cabo de FO. Dessa forma, a altura total de solo de cada experimento foi de, aproximadamente, 130 mm (Figura 8).

4.1.2 Propriedades do solo utilizado e preparação da amostra

O solo utilizado nos experimentos foi coletado na cidade de São Carlos-SP, na área experimental de Fundações (latitude 22°0'38,441" S e longitude 47°53'45,686" W) do departamento de Geotecnia da Escolha de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. De acordo com o sistema de classificação Köppen, o clima de São Carlos é subtropical úmido (Cwa), com inverno seco e verão quente e úmido (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é de 1512 mm (RODRÍGUEZ; TEIXEIRA, 2021), e a temperatura média anual varia de 12 a 28 °C (MORAIS et al., 2020).

O solo da área de estudo é um exemplo típico de solos tropicais brasileiros, que sofrem o processo de laterização. O perfil do solo apresenta uma camada residual de arenito (areia média a fina, com presença variável de argila) coberta por uma camada superficial (de 1 a 6,5 m de profundidade) de areia argilosa laterítica (solo coluvial). Uma espessa camada de seixos separa a camada superficial do solo residual. Ao longo do tempo, a camada superior foi exposta ao intemperismo tropical (i.e., altas temperaturas e chuvas intensas), levando à formação de um solo de elevada porosidade (MORAIS et al., 2020).

A profundidade de coleta do solo usado para construir os experimentos foi de, aproximadamente, 2 m. Nesse nível, o solo possui composição de 62 % de areia, 26 % de argila e 12 % de silte (MACHADO; VILAR, 2003), sendo, portanto, segundo a classificação do triângulo textural do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, um solo franco-argilo-arenoso. Além disso, o solo em questão apresenta ρ_b de 1386 kg.m⁻³, densidade das partículas sólidas, ρ_s , de 2759 kg.m⁻³ e índice de vazios, e , igual a 0,99 (MACHADO, 1998; MORAIS; TSUHA; VILAR, 2021). Uma completa caracterização do perfil do solo do campo experimental de Fundações pode ser encontrada em Machado e Vilar (2003) e em Moraes et al. (2020).

Para o seu posicionamento no experimento, a amostra de solo coletada em campo foi previamente preparada, a fim de promover sua homogeneização e garantir que seu manejo fosse feito de forma adequada. Assim, inicialmente, o solo foi seco ao ar (umidade higroscópica) e destorroado, por meio de fragmentação manual. Em seguida, a amostra foi passada em uma peneira com abertura de malha de 2 mm, de forma a obter o material granular correspondente às frações de areia, silte e argila, e excluir eventuais frações granulométricas indesejadas, como o calhau e o cascalho (EMBRAPA, 2017).

Concluídas essas etapas, o solo estava preparado para ser posicionado nas tubulações. Conforme descrito anteriormente, o assentamento foi feito em cada tubo com duas camadas distintas. Cada uma dessas camadas teve uma massa de solo ocupando um certo volume que obedecesse a relação expressa pelo valor de $\rho_b = 1386 \text{ kg.m}^{-3}$, o que permitiu aproximar as condições de densidade e compactação dos experimentos com as do solo coletado em campo. O preenchimento e compactação do solo dentro dos tubos foi feito manualmente. Dessa forma, foram usados 29,2 kg de solo seco ao ar no experimento SPHP-DTS, e 28,9 kg de solo no experimento de abordagem DPHP-DTS.

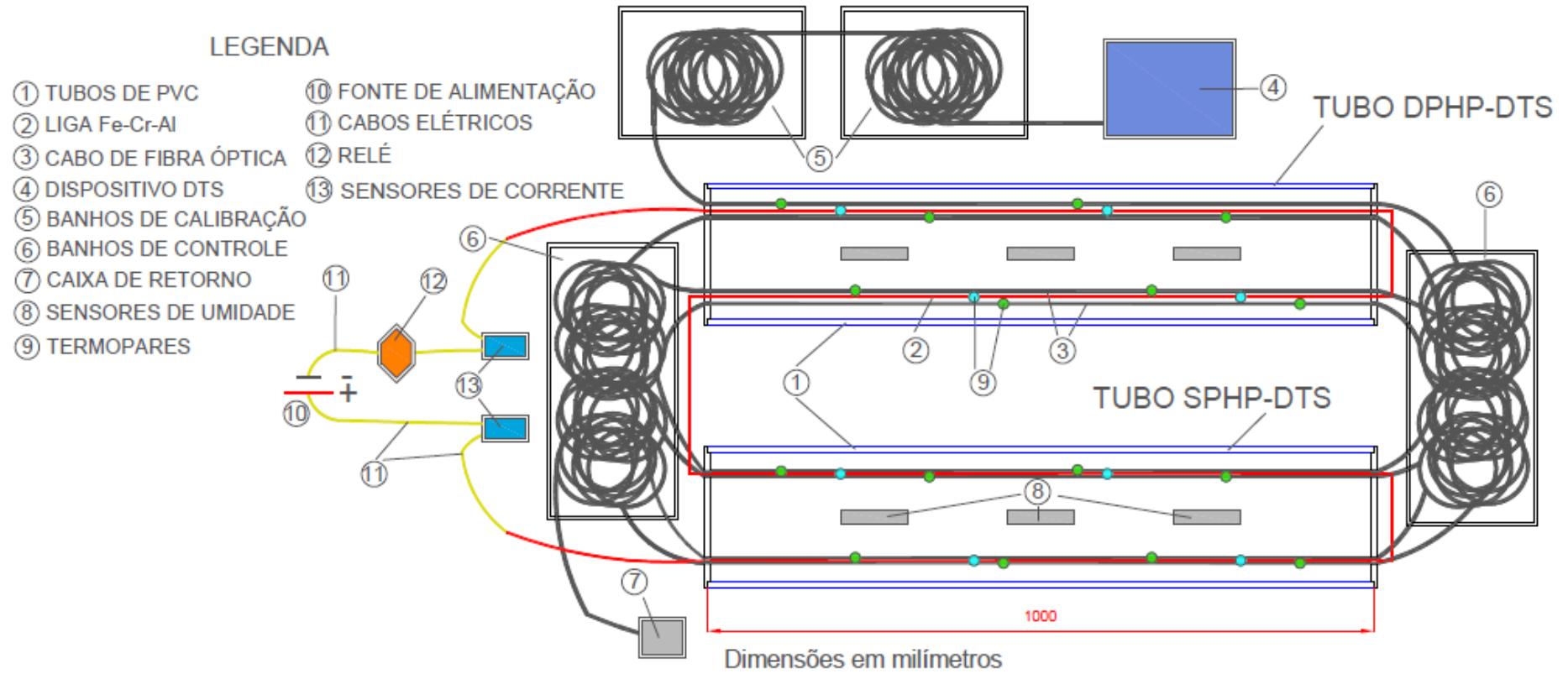
4.1.3 Detalhamento de materiais, equipamentos e sensores utilizados

Para gerar o aquecimento do solo, foi utilizada uma liga ferrítica Kanthal A1 (Sandvik AB, Estocolmo, Suécia). Esse material é constituído essencialmente de ferro (69,5 %), cromo (23,5 %) e alumínio (5,8 %), de onde surge sua abreviação de liga Fe-Cr-Al. Por apresentar entre 11 e 30 % de cromo, e não incluir níquel em sua composição, essa liga ganha a definição de ferrítica (LAMBERT, 2016). Segundo fabricante, a liga Fe-Cr-Al possui alta resistividade e ótima resistência à oxidação, além de poder ser utilizada em aplicações que atingem a marca de 1400 °C. O diâmetro do material empregado foi de 2,3 mm, escolhido por apresentar resistência elétrica de $0,35 \Omega \text{ m}^{-1}$, valor próximo ao do revestimento metálico ($0,37 \Omega \text{ m}^{-1}$) dos cabos de FO ativos usualmente empregados em aplicações similares (CIOCCA et al., 2012; GIORODRÍGUEZ et al., 2013).

Para realizar as medições distribuídas de temperatura monitoradas pelo DTS, foi utilizado um cabo de FO Fiber-Lan Indoor-Outdoor (Furukawa Electric Co. Ltd., Tóquio, Japão) com diâmetro de 4,8 mm e de seção transversal semelhante ao apresentado na Figura 3a. Esse cabo é composto por duas fibras ópticas, protegidas individualmente por um revestimento primário de acrílico e um secundário de policloreto de vinila (PVC). As fibras encontram-se envolvidas por elementos de tração dielétricos (fios de aramida) e um cordão de rasgamento. Todo esse conjunto é protegido por um revestimento externo de PVC. Por apresentar uma composição convencional, esse cabo é vantajoso sobre aquele com revestimento metálico, pois é mais facilmente encontrado no mercado nacional com as características requeridas pelo DTS (i.e., cabos de fibra óptica multimodo 50/125 μm).

A Figura 9 exibe uma configuração esquemática dos modelos físicos construídos para a execução deste trabalho. A ilustração representa o plano horizontal de posicionamento da liga Fe-Cr-Al, do cabo de FO e dos demais elementos constituintes dos experimentos.

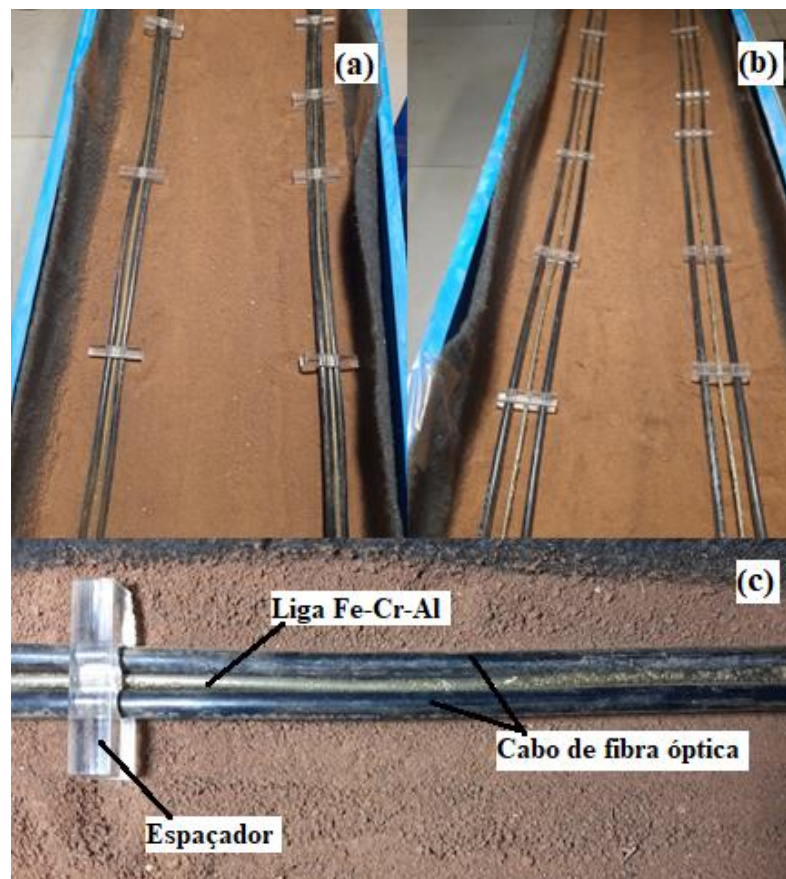
Figura 9 – Esquema geral dos componentes dos tubos experimentais



Fonte: autor (2023).

A Figura 9 mostra que, dentro do solo de cada experimento, dois trechos de 1 m cada da liga Fe-Cr-Al foram usados. Cada um desses segmentos foi responsável por aquecer dois trechos (1 m cada) de cabo sensor de temperatura, posicionados próximos ou em contato da liga. Os dois segmentos de material aquecedor foram mantidos separados por um espaço de solo mínimo de 127,5 mm, a fim de evitar a sobreposição do aquecimento gerado pelos diferentes trechos. Portanto, cada tubo recebeu 2 m de liga e 4 m de cabo de FO. No entanto, foram empregados ao todo 7,5 m de liga e 84 m de cabo. A metragem excedente de cada material foi importante para outras partes dos experimentos, conforme será apontado no restante deste tópico. A Figura 10 exhibe o posicionamento da liga Fe-Cr-Al e do cabo de FO dentro de cada experimento.

Figura 10 – Posicionamento da liga Fe-Cr-Al e do cabo de fibra óptica nos experimentos de abordagem (a) SPHP-DTS e (b) DPHP-DTS, com detalhe dos elementos em (c)



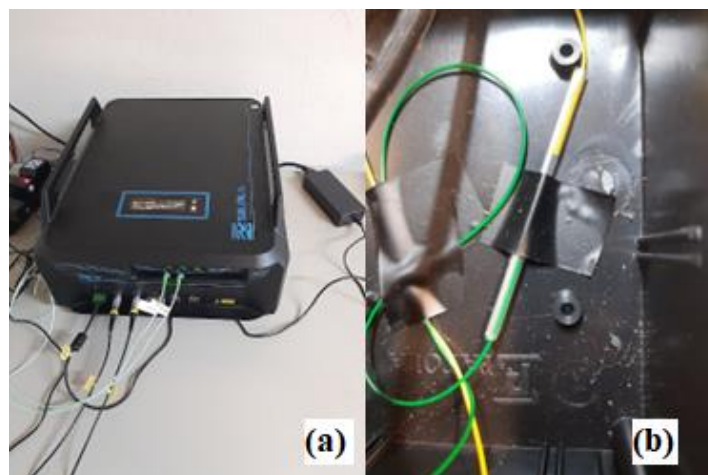
Fonte: autor (2023).

O dispositivo DTS (Figura 11a) utilizado foi um Silixa XT-DTS (Silixa Ltd., Hertfordshire, Reino Unido), com resolução espacial de 0,65 m e resolução de temperatura de

0,01 °C. Para a calibração das medidas fornecidas pelo DTS, duas seções de cabo de FO com 10 m cada foram mantidas dentro de caixas térmicas com água a diferentes temperaturas. Uma caixa continha água e gelo a aproximadamente 0 °C (banho de calibração frio), enquanto outra caixa continha água em uma temperatura de cerca de 40 °C (banho de calibração quente), que foi mantida por dois aquecedores de aquário. A calibração das medições de temperatura do cabo de FO é feita por sensores de temperatura do tipo Pt100 (termoresistor). Cada banho recebeu um desses sensores, que foram diretamente conectados ao dispositivo. Além disso, durante as medições, uma pedra porosa conectada a uma bomba de aquário permaneceu dentro de cada caixa, a fim de garantir a circulação de água e evitar a estratificação da temperatura.

A Figura 9 também exibe a presença de dois banhos de controle (frios) nas extremidades dos tubos de PVC. Ao todo, empregaram-se 8 trechos de cabo óptico de 6 m cada nos banhos de controle. Esses banhos foram utilizados para criar seções de controle de temperatura em pontos estratégicos do cabo (i.e., em seções em que o cabo saía do solo), o que também facilitou a identificação dos trechos do cabo de FO que se encontravam dentro do solo. Ademais, no final do trajeto percorrido pelo cabo a partir do DTS, as duas fibras ópticas que o compõe foram fundidas na caixa de retorno (encontro da fibra verde com amarela, Figura 11b). Da mesma forma, na extremidade oposta do cabo, foi realizada a fusão de um conector a cada fibra óptica, permitindo a conexão individual das fibras nos canais do DTS. Assim, um único caminho óptico foi criado, permitindo uma configuração do tipo *double-ended* na unidade DTS.

Figura 11 – (a) Dispositivo DTS e (b) fusão das fibras ópticas na caixa de retorno



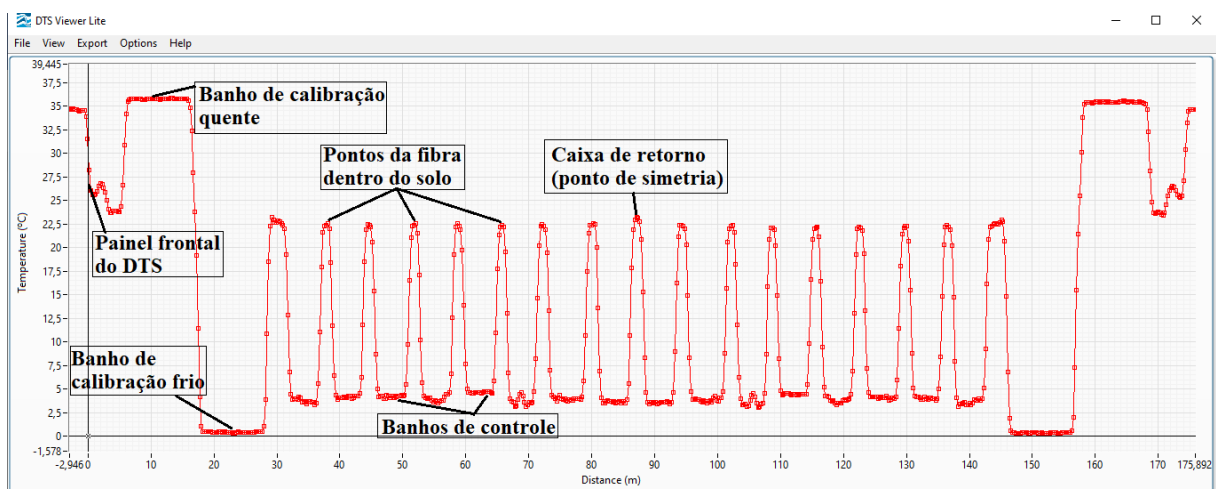
Fonte: autor (2023).

A configuração *double-ended* admite que os pulsos de laser sejam injetados alternadamente entre os dois canais do DTS, permitindo que efeitos de atenuação diferencial de sinal causados por dobras, emendas e conectores sejam corrigidos (GIESEN et al., 2012). Isso significa que um pulso de laser emitido pelo primeiro canal do DTS percorre todo o trajeto através de uma única fibra óptica, passando pelos diferentes banhos e pelo solo de ambos os experimentos, até chegar na caixa de retorno; nela, a primeira fibra encontra a segunda fibra fundida, e o pulso de laser passa a fazer o caminho inverso simetricamente, partindo da caixa de retorno em direção ao segundo canal do DTS. Em seguida, o mesmo processo ocorre, mas com o pulso de laser sendo emitido no segundo canal do equipamento.

A partir disso, cada canal foi configurado com um tempo de aquisição de 10 s, de maneira que um ciclo (intervalo) de medição fosse completado a cada 20 s. Nenhum tempo de espera foi adicionado entre a execução de um ciclo de medição e outro; portanto, o intervalo de amostragem temporal foi de 20 s. A Figura 12 exibe como os dados de temperatura gerados pelo DTS podem ser visualizados espacialmente. Nessa figura, é possível identificar o posicionamento do cabo de FO nas diferentes componentes do experimento.

Ademais, o DTS foi ajustado para coletar uma medida de temperatura a cada 0,254 m de caminho óptico. Dessa maneira, e considerando o comprimento útil de 0,99 m dos experimentos, cada metro de fibra óptica posicionado dentro do solo assegurou a obtenção de 3 medidas de temperatura. Com isso, cada experimento gerou um total de 24 pontos de medição distribuída de temperatura (3 pontos por metro fibra, 2 fibras, 4 metros de cabo de FO).

Figura 12 – Medições distribuídas de temperatura na configuração experimental construída

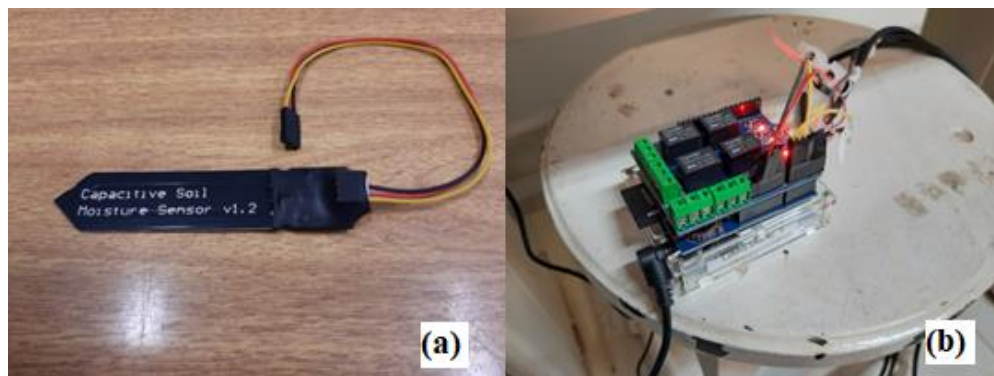


Fonte: autor (2023).

Para monitorar a umidade do solo, foram usados os sensores capacitivos SKU:SEN0193, compatíveis com a plataforma Arduino. Cada experimento recebeu três sensores, uniformemente espaçados no mesmo plano horizontal do posicionamento da liga Fe-Cr-Al e do cabo de FO. Após os sensores serem adquiridos, seus componentes eletrônicos foram impermeabilizados com esmalte, e, posteriormente, foram protegidos por um material termo retrátil (Figura 13a).

Antes de serem posicionados nas tubulações de PVC DEFoFo, os sensores foram calibrados individualmente (ver tópico 4.1.4). Uma vez concluída a calibração, cada sensor foi configurado para executar 6 leituras instantâneas de θ (replicatas) a cada 5 minutos. A média dessas 6 leituras era calculada, de forma a obter uma única medida de θ por sensor, em intervalos de 5 minutos. Durante a execução das medições distribuídas de temperatura, os sensores permaneceram conectados a uma placa Arduino Uno, a um *datalogger shield* e um *relay shield* (Figura 13b). Uma tensão de 5,0 V foi responsável por alimentar os sensores. Com isso, foi possível garantir o armazenamento de dados e o adequado funcionamento dos sensores durante o ciclo de medições.

Figura 13 – Sensor de umidade SKU:SEN0193: (a) impermeabilização dos componentes eletrônicos e (b) placas Arduino para coleta e armazenamento de dados



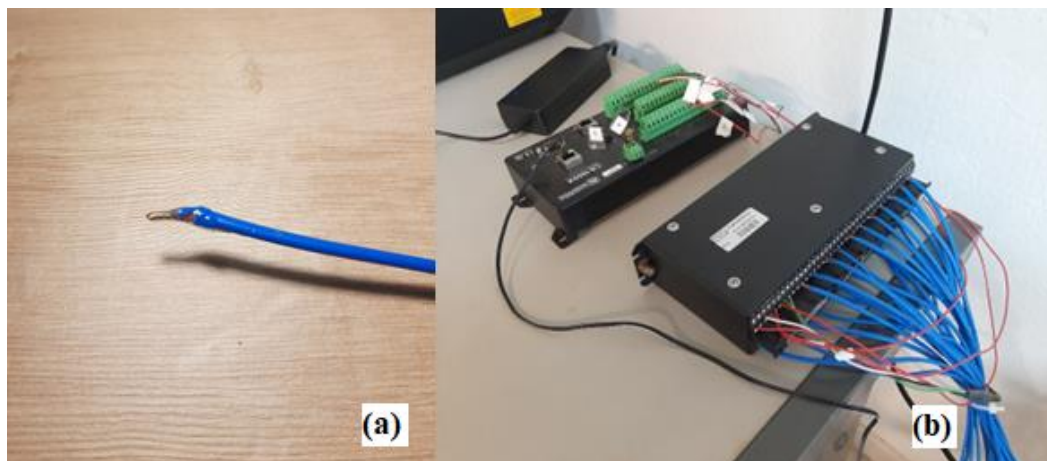
Fonte: autor (2023).

Além das medidas distribuídas do sistema FO-DTS, medições pontuais de temperatura foram executadas por termopares. Um termopar consiste em dois fios, cada um constituído de um metal ou liga metálica diferente, unidos em uma extremidade para formar a junção de medição. Na extremidade oposta, cada fio conecta-se aos terminais de um dispositivo de medição de tensão, formando a junção de referência (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2021). Em cada tubo experimental construído, 12 termopares foram utilizados, sendo 8 em contato com o

revestimento externo do cabo de FO (em verde na Figura 9) e 4 em contato com a liga Fe-Cr-Al (em azul na Figura 9). Com relação ao plano horizontal de solo, os termopares foram posicionados na parte superior da liga e do cabo. Os termopares usados são do tipo T, ou seja, um de seus componentes é o cobre, enquanto o outro é o constantan (liga de cobre e níquel).

Dessa forma, e considerando a distribuição apresentada na Figura 9, foi possível obter medições pontuais de temperatura a cada 0,11 m de cabo óptico e a cada 0,20 m de liga Fe-Cr-Al, aproximadamente. No total, 24 termopares (precisão de 0,01 °C) foram conectados a um multiplexador AM25T (Campbell Scientific Inc., Logan, EUA) que, por sua vez, foi conectado a um *datalogger* CR1000X (Campbell Scientific Inc., Logan, EUA). Essas conexões formaram a junção de referência (Figura 14b). A junção de medição de cada termopar, por sua vez, foi colada com cola epóxi, a fim de assegurar o contato entre os dois metais (Figura 14a).

Figura 14 – Termopares: (a) colagem da junção de medição e (b) multiplexador e *datalogger* para coleta e armazenamento de dados



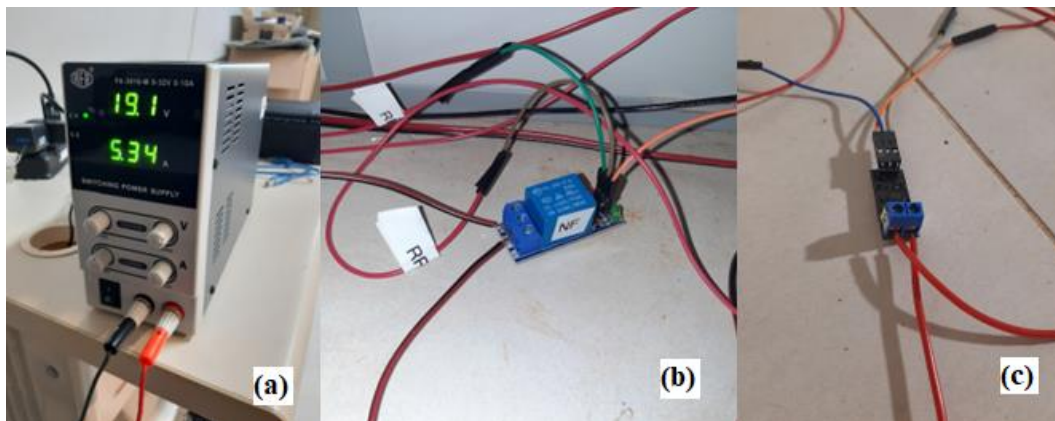
Fonte: autor (2023).

Assim, com as duas junções (referência e medição) em temperaturas diferentes, uma tensão proporcional a essa diferença é induzida nos fios, permitindo a obtenção de dados de temperatura (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2021). Cada termopar foi configurado para realizar uma medição a cada 5 s, e fornecer um valor médio a cada 20 s, sem tempo de espera entre medições consecutivas. Portanto, o mesmo intervalo de amostragem temporal foi utilizado nas medições pontuais e distribuídas de temperatura.

Para gerar o aquecimento da liga Fe-Cr-Al, a fonte de alimentação de bancada AFR FA-3010-M (Simitron Comercial Ltda., São Paulo, Brasil) foi utilizada (Figura 15a). A fonte

transforma a corrente alternada da rede elétrica (110 ou 220 V) em corrente contínua, permitindo a manipulação de dados de tensão U (V) (até 32 V, com precisão de 0,1 V) e de corrente elétrica i (A) (até 10 A, precisão de 0,01 A). Esse equipamento pode ser operado no modo de tensão constante, paralelamente à definição de um limite de corrente. Isso torna possível a definição de valores específicos de tensão aplicada, enquanto um limite de corrente permite o estabelecimento de um valor máximo dessa grandeza a ser fornecido. Adicionalmente, um relé compatível com a plataforma Arduino (Figura 15b) foi utilizado para controlar a duração do aquecimento, com precisão de 1 ms. Para o seu funcionamento, o relé foi alimentado por uma placa Arduino Uno a 5,0 V.

Figura 15 – Elementos para gerar e controlar o aquecimento da liga Fe-Cr-Al: (a) fonte de alimentação de bancada, (b) relé e (c) sensor de corrente elétrica



Fonte: autor (2023).

Para medir a corrente elétrica efetivamente entregue ao circuito de aquecimento, foram usados dois sensores de corrente ACS712, compatíveis com a plataforma Arduino (Figura 15c). Esses sensores são constituídos por um circuito de efeito Hall que quando percorrido por uma corrente elétrica, gera um campo magnético que é convertido em um valor de tensão proporcional a essa corrente (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2022). Os sensores ACS712 têm sido utilizados de forma bem-sucedida, por exemplo, em sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT) para o monitoramento da energia em circuitos elétricos (TSAI; TRUONG; HSIEH, 2022). Para este trabalho, foi empregado o sensor ACS712 com sensibilidade de 100 mV/A e intervalo de medição de corrente de ± 20 A.

Cada sensor foi posicionado próximo a um dos polos (positivo ou negativo) da fonte de alimentação de bancada, a fim de fazer o balanço entre a entrada e a saída de corrente do

circuito, conforme apresentado esquematicamente na Figura 9. Os sensores ACS712 foram calibrados com leituras de corrente provenientes da fonte de alimentação de bancada. Posteriormente, cada sensor foi configurado para executar uma leitura de corrente a cada 5 s. Durante a execução das medições distribuídas de temperatura, os sensores permaneceram conectados a uma placa Arduino Uno e a um *datalogger shield*, sendo alimentados por uma tensão de 5,0 V. A calibração e a interpretação das leituras dos sensores ACS712 será tratada no tópico 4.1.5.

O uso da fonte de alimentação e do relé permitiram avaliar a resposta térmica do solo em distintos cenários de aquecimento, isto é, pulsos de calor configurados com diferentes valores de intensidade de potência e de duração do aquecimento (ver tópico 4.1.5). Conforme a Figura 9 apresenta, cabos elétricos foram soldados às extremidades da liga Fe-Cr-Al, permitindo que as conexões da fonte, do relé e dos sensores de corrente ao circuito elétrico formado pudessem ser feitas adequadamente.

4.1.4 Calibração dos sensores de umidade

Os sensores de umidade SKU:SEN0193 são sensores capacitivos de baixo custo, que podem ser operados usando microcontroladores (e.g., Arduino). Em sua superfície, o sensor é composto por duas placas (eletrodos) que ficam em contato com um material dielétrico, formando um capacitor do tipo coplanar (HRISKO, 2020). Nesse caso, o dielétrico corresponde ao meio poroso multifásico, formado pelas fases sólida (partículas minerais), líquida (água) e gasosa (ar).

Um certo solo pode apresentar valores de permissividade dielétrica, ϵ (adimensional), variando de 2 a 6 quando seco. Já o ar apresenta ϵ próximo de 1, enquanto a água possui ϵ em torno de 80. Essa maior permissividade permite que o fluxo de cargas elétricas seja mais livre, de forma que, quando as placas do sensor são eletrizadas, ocorra uma redistribuição de cargas no dielétrico. As oscilações nesse campo elétrico, portanto, são função da quantidade de água presente no solo (HRISKO, 2020; PLACIDI et al., 2020). Durante a calibração e operação dos sensores nos tubos experimentais, suas leituras analógicas foram convertidas em sinais elétricos por meio da expressão (PEREIRA; SANDRI; SILVA JÚNIOR, 2022):

$$U_{out} = (sensorValue) \left(\frac{U_{in}}{1023} \right) \quad (6)$$

Em que U_{out} é a tensão de saída do sensor (V), $sensorValue$ é o sinal analógico do sensor, U_{in} é a tensão de alimentação do sensor (igual a 5,0 V), e 1023 foi o valor atribuído ao fator de conversão analógico-digital.

A calibração dos sensores foi feita usando amostras de solo com valores de grau de saturação (S , %) e de θ conhecidos. Previamente preparadas conforme o tópico 4.1.2, onze amostras de solo seco ao ar de 0,60 kg cada foram organizadas de forma a apresentarem S variando de 0 até 100 %, com incrementos em intervalos de 10 %. Inicialmente, essas amostras foram reservadas dentro de sacos plásticos individuais.

Para definir a massa de água a ser adicionada em cada amostra, primeiramente o volume de partículas sólidas, V_s (m^3), foi calculado com a Equação 7 (LIBARDI, 2018), partindo-se do valor de $m_s = 0,60$ kg. Em seguida, o volume total de solo V_t foi obtido com o a Equação 8 (EMBRAPA, 2017), permitindo o cálculo do volume de vazios V_v (m^3) com a Equação 9 (LIBARDI, 2018). Por fim, o volume e a massa de água (V_w e m_w , respectivamente) relativos a cada valor de S foram computados com a Equação 10 (LIBARDI, 2018). Adicionalmente, foi possível também expressar S em termos de valores de θ (Equação 2), que foram de 0,00 a 0,50 $m^3.m^{-3}$, em intervalos de 0,05 $m^3.m^{-3}$.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (7)$$

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_t} \quad (8)$$

$$V_t = V_s + V_v \quad (9)$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (10)$$

A partir desses cálculos, obtiveram-se os valores $V_s = 217,48$ cm^3 , $V_t = 432,79$ cm^3 e $V_v = 215,31$ cm^3 . Com tais valores, foi possível adicionar o V_w correspondente a cada valor de θ dentro dos sacos plásticos contendo solo, que variou de 0 mL (para $\theta = 0,00$ $m^3.m^{-3}$) a 215,31 mL ($\theta = 0,50$ $m^3.m^{-3}$). As amostras foram homogeneizadas para assegurar uma mistura adequada entre solo e água. Em seguida, cada saco contendo solo foi colocado dentro de um recipiente plástico, onde as amostras foram compactadas manualmente, de forma a ocuparem um volume correspondente ao V_t .

Posteriormente, cada sensor foi cravado dentro de cada uma das onze amostras de solo. Durante essa etapa, as leituras de U_{out} foram monitoradas em tempo real em um notebook

(Figura 16). Assim, quando a leitura de cada sensor se tornasse estável, o valor de U_{out} era definido como relativo à condição de θ da amostra de solo em questão, possibilitando a efetivação da construção de curvas de calibração individuais dos seis sensores SKU:SEN0193.

Figura 16 – Calibração dos sensores de umidade



Fonte: autor (2023).

Para definir uma curva de calibração que se ajustasse adequadamente aos pontos amostrais de θ em função de U_{out} , quatro tipos de modelos foram testados: exponencial, linear, polinomial (2º grau) e modelo de potência. O ajuste de cada modelo aos pontos amostrais foi feito com a ferramenta *curve fitting* do software MatLab (The MathWorks, Inc., Natick, EUA), que emprega o método dos mínimos quadrados para encontrar um ajuste otimizado. A qualidade das estimativas de cada modelo foi avaliada usando métricas estatísticas (tópico 4.3).

4.1.5 Dimensionamento elétrico dos pulsos de calor e calibração dos sensores de corrente elétrica

Para a aplicação das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS neste trabalho, diferentes configurações de aquecimento foram utilizadas. Essas configurações distinguem-se uma das outras pela intensidade da potência aplicada na liga Fe-Cr-Al, que pode ser baixa ou alta, e pela duração do aquecimento, que pode ser curto ou longo. Assim, três combinações foram utilizadas: 5 W.m⁻¹ e 180 s (baixa potência e curta duração); 5 W.m⁻¹ e 600 s (baixa potência e longa duração); e 25 W.m⁻¹ e 180 s (alta potência e curta duração).

A partir dessas classificações, para efeitos de simplificação, os pulsos de calor foram abreviados para B180, B600 e A180, respectivamente. A escolha dessas estratégias de aquecimento foi inspirada em aplicações da metodologia AHFO (APPERL; BERNHARDT; SCHULZ, 2019; DONG et al., 2017; GIL-RODRÍGUEZ et al., 2013; GAMAGE et al., 2021; YAO et al., 2022). Ademais, o produto entre a potência e a duração do aquecimento permite obter a energia aplicada por metro de material aquecedor, q ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$), cujos valores foram $900 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}$ (B180), $3000 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}$ (B600) e $4500 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}$ (A180).

Para aplicar os valores supracitados de potência por metro na liga Fe-Cr-Al, foi executado um dimensionamento dos valores necessários de tensão elétrica, U_t (V), a serem aplicados no circuito elétrico completo, formado pela liga e demais conexões. Assim, em um primeiro momento, a fonte de alimentação foi conectada apenas às extremidades da liga Fe-Cr-Al, após o seu posicionamento dentro dos tubos experimentais, mas antes de seu soterramento.

Essa condição (pré-soterramento) da liga estabeleceu um cenário idealizado, em que se pressupôs que não houve perdas de corrente e/ou tensão pelo material. Para minimizar essas perdas, duas demãos de um verniz eletro isolante insolúvel em água foram aplicadas em toda a extensão da liga, antes de seu posicionamento dentro dos tubos. Os valores de U foram variados de 0 a 30 V, em incrementos de 1,0 V, e o valor correspondente de corrente elétrica i indicado na fonte foi anotado. Esse valor de i foi sempre abaixo do limite de 10 A. Para cada par de U e i obtidos, a potência aplicada na liga (P_t , W) foi calculada (Equação 11).

Posteriormente, com os cabos elétricos soldados às extremidades da liga e os sensores de corrente ACS712 conectados ao circuito, o mesmo procedimento foi realizado, incluindo, portanto, o circuito completo (7,5 m do material aquecedor acrescido das conexões elétricas). Assim, a potência total (P_t) foi obtida para cada par de U_t e i . Novamente, admitiu-se que não houve perdas de corrente e tensão. A Equação 11 apresenta a relação genérica entre a potência aplicada, P (W), e i e U .

$$P = iU \quad (11)$$

Os dados de corrente observados nessa última etapa foram utilizados para a calibração dos sensores ACS712. Nesse caso, a corrente elétrica dos sensores, i_{ACS712} (A), foi calculada:

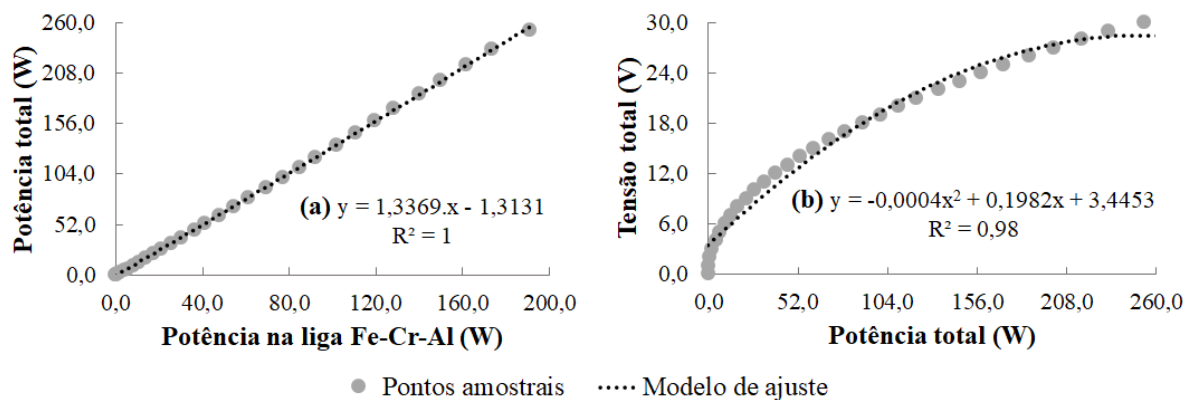
$$i_{ACS712} = \left(\frac{U_{out_{i \neq 0}} - U_{out_{i=0}}}{\text{sensibilidade do sensor}} \right) \quad (12)$$

Em que $U_{out_{i \neq 0}}$ é a tensão de saída do sensor quando $i \neq 0$ (V), $U_{out_{i=0}}$ é a tensão de saída do sensor quando $i = 0$ (V), e *sensibilidade do sensor* é a sensibilidade especificada pelo fabricante conforme o modelo do sensor usado (nesse caso, igual a 100 mV/A).

A Equação 6 apresentada no tópico 4.1.4, e que representa o formato genérico para cálculos de U_{out} , foi utilizada para calcular $U_{out_{i \neq 0}}$ e $U_{out_{i=0}}$. Assim, durante a calibração dos sensores de corrente, tal como na calibração dos sensores de umidade, as leituras de $U_{out_{i \neq 0}}$ foram monitoradas em tempo real. Quando a leitura de cada sensor se tornasse estável, o valor de i_{ACS712} era calculado como relativo à leitura de i da fonte, permitindo a construção das curvas de calibração de cada um dos dois sensores ACS712. Por fim, foi definido um modelo que se ajustasse adequadamente aos pontos amostrais de i da fonte em função de i_{ACS712} .

A partir do procedimento descrito nos parágrafos anteriores, foi possível estabelecer modelos de regressão entre P_t e P_l (Figura 17a) e, posteriormente, entre U_t e P_t (Figura 17b). Esse último levou ao cálculo dos valores de U_t a serem ajustados na fonte de bancada, a fim de gerarem os pulsos de calor com a configuração requerida. A Tabela 2 resume as informações relativas ao dimensionamento dos cenários de aquecimento

Figura 17 – Modelos usados para o dimensionamento da tensão aplicada na liga Fe-Cr-Al: (a) potência total em função da potência na liga e (b) tensão total em função potência total



Fonte: autor (2023).

Durante a execução dos pulsos de calor, $U_{out_{i \neq 0}}$ (Equação 12) foi calculado como a média das leituras instantâneas efetuadas e registradas a cada 5 s pelo microcontrolador Arduino. Também, $U_{out_{i=0}}$ foi definido pela média das leituras contidas nos 5 minutos que antecederam a aplicação de cada aquecimento. A partir disso, i_{ACS712} pôde ser calculado para

cada sensor, e, posteriormente, os valores reais de i foram obtidos a partir das curvas de calibração. Assim, uma média foi feita entre os dois valores de i encontrados para cada pulso de calor aplicado na liga Fe-Cr-Al. Posteriormente, os valores reais de P_t , P_l e q também puderem ser calculados para cada estratégia de aquecimento. Ressalta-se que o valor de U_t definido na fonte durante os pulsos de calor foi adotado para esses cálculos, o que implicou assumir que não houve perdas de tensão durante os pulsos.

Tabela 2 – Resumo das características dimensionadas dos pulsos de calor aplicados na liga Fe-Cr-Al

Pulso de calor	P_l/m^a (W.m ⁻¹)	P_l^b (W)	t_p^c (s)	q^d (J.m ⁻¹)	P_t^e (W)	U_t^f (V)	i^g (A)
B180	5	37,5	180	900	48,8	12,2	4,01
B600	5	37,5	600	3000	48,8	12,2	4,01
A180	25	187,5	180	4500	249,4	28,0	8,91

^a É a potência por metro na liga; ^b é a potência na liga; ^c é a duração do pulso de calor; ^d é a energia por metro na liga; ^e é a potência no circuito completo; ^f é a tensão no circuito completo, aplicada na fonte de alimentação; ^g é a corrente elétrica no circuito completo.

Fonte: autor (2023).

4.1.6 Sistematização das medições

Com os sensores de umidade calibrados e os cenários de aquecimento dimensionados, a montagem dos experimentos foi finalizada. A Figura 18 mostra o posicionamento dos termopares e dos sensores de umidade no plano horizontal de solo, antes da conclusão do assentamento de solo nos tubos. A configuração experimental completa é apresentada na Figura 19.

Com isso, as medições de temperatura pelo sistema FO-DTS foram iniciadas, e sua execução ocorreu em duas etapas distintas. Primeiramente, foram construídas curvas de correlação (calibração) entre θ e diferentes métodos de análise de temperatura (ver tópico 4.2). Essa etapa teve início com o umedecimento do solo em ambos os experimentos, até próximo da saturação. Isso permitiu que θ diminuísse ao longo do tempo sob a ação da drenagem livre (dominante a curto prazo) e da evaporação da água do solo pela superfície (dominante a longo prazo). Quando os valores de θ baixaram até próximo de $0,00 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, um novo umedecimento do solo foi feito nos dois tubos, dando início à segunda etapa das medições de temperatura. Essa etapa buscou validar as curvas de calibração obtidas no passo anterior.

Figura 18 – Posicionamento dos sensores de umidade e dos termopares no experimento de abordagem DPHP-DTS: (a) visão geral e (b) detalhe



Fonte: autor (2023).

Figura 19 – Fotografia da configuração experimental completa



Fonte: autor (2023).

Cada pulso de calor foi executado consecutivamente, em ordem crescente de energia aplicada na liga Fe-Cr-Al (i.e., B180, B600 e A180). Cada pulso foi separado um do outro por um intervalo de 1 h, a fim de evitar acumulação de calor no solo. O dispositivo DTS, o registrador *datalogger* e o microcontrolador Arduino iniciaram a coleta de dados com 20 minutos de antecedência à aplicação do primeiro pulso de calor. Os equipamentos prosseguiram com as medições durante o intervalo entre a aplicação de um pulso e outro, e continuaram as coletas durante 20 minutos após o término do último pulso.

Os dados de temperatura adquiridos durante cada pulso de calor foram associados a um valor de θ , correspondente a uma condição de umidade antecedente de cada aquecimento. A obtenção desse valor se deu, primeiramente, pelo cálculo de uma média entre três medidas de θ fornecidas por cada sensor, imediatamente antes do início de cada aquecimento. Com isso, para cada estratégia de aquecimento, foram obtidos três valores de θ , cada um relativo a um sensor. Uma média entre esses três valores foi calculada, obtendo-se, por fim, um valor de θ para cada experimento, relativo à condição de umidade antecedente à aplicação de cada pulso de calor.

Posteriormente à execução das etapas de calibração e validação, três amostras de solo indeformadas foram coletadas na superfície do solo de cada tubo, a fim de determinar a densidade aparente seca real de cada experimento, ρ'_b (kg.m⁻³). O procedimento das extrações indeformadas foi feito de acordo com o método do cilindro volumétrico do Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

Assim, as amostras foram extraídas uniformemente da superfície do solo, usando cilindros com volume médio de, aproximadamente, 100 cm³. Para cada amostra, ρ'_b foi calculado por meio da Equação 13 (EMBRAPA, 2017). A partir disso, o valor de ρ'_b relativo a cada experimento foi definido pela média das três amostras coletadas em cada tubo.

$$\rho'_b = \frac{m'_s}{V'_t} \quad (13)$$

Em que m'_s é a massa da amostra de solo seco a 105 °C (kg), e V'_t é o volume total de solo contido no cilindro volumétrico (m³).

4.2 Interpretação dos dados de temperatura

Para analisar os dados de temperatura distribuída, foram empregados os métodos T_{cum} e ΔT_{max} . T_{cum} foi calculada apenas para o cenário em que $t_f = t_p$. Com isso, a Equação 4 pôde ser reescrita no formato:

$$T_{cum} = \Delta T_1 \Delta t_i \Big|_0^{\Delta t_i} + \Delta T_2 \Delta t_i \Big|_{\Delta t_i}^{2\Delta t_i} + \dots + \Delta T_j \Delta t_i \Big|_{(j-1)\Delta t_i}^{j\Delta t_i} \quad (14)$$

Em que Δt_i é o intervalo de integração (s), j é o número de intervalos de integração tal que $j \cdot \Delta t_i = t_f$, e ΔT_j (°C) é a diferença de temperatura entre o instante de tempo $j \cdot \Delta t_i$ (s) e o início do pulso de calor ($t = 0$).

Uma série de valores de Δt_i foram testados por Serna, Muñoz e Suárez (2017), que apontaram não haver diferenças significativas entre valores distintos de Δt_i . Assim, neste trabalho, o valor adotado foi de $\Delta t_i = 20$ s, de forma a coincidir com o intervalo de amostragem temporal do DTS. Essa estratégia é usualmente adotada em outras aplicações da metodologia AHFO (GAMAGE; BISWAS; STRACHAN, 2018).

O segundo método utilizado foi o ΔT_{max} (Equação 5). Para a aplicação deste trabalho, foi fixado o valor de $\Delta t = 40$ s. O intervalo de amostragem do DTS definido em 20 s levou ao uso de um número $N = 3$ de medidas de temperatura para computar ΔT_{max} . Assim, a Equação 5 pôde ser escrita na forma:

$$\Delta T_{max} = \frac{1}{3} \sum_{t_m - 40}^{t_m} \Delta T(t) \quad (15)$$

Dessa forma, foi possível estabelecer as curvas de calibração entre θ e T_{cum} e entre θ e ΔT_{max} . Assim como na calibração dos sensores de umidade, modelos do tipo exponencial, linear, polinomial (2° grau) e de potência foram avaliados. Novamente, o ajuste de cada modelo aos dados observados foi feito usando o método dos mínimos quadrados, embutido no *software* MatLab. A qualidade das estimativas foi investigada usando diferentes métricas estatísticas (tópico 4.3).

Ademais, com o intervalo de amostragem dos termopares definidos em 20 s, valores de ΔT_{max} foram calculados (Equação 15) para os dados de temperatura dos termopares posicionados em contato com a superfície do cabo de FO. Com isso, foi possível investigar as diferenças entre os dados obtidos de temperatura distribuída e pontual.

Para avaliar a uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al na direção axial, foi empregado o método do erro acumulado, E_{cum} (°C) (CAO et al., 2016), aqui referido como uniformidade axial (U_{axi} , °C). Para computar U_{axi} , foram usados os dados de temperatura dos termopares posicionados em contato com a superfície da liga Fe-Cr-Al. Assim, U_{axi} foi calculada por meio da expressão (CAO et al., 2016):

$$U_{axi} = \sum_{k=1}^l |\Delta T_k - \overline{\Delta T}| \quad (16)$$

Em que ΔT_k é a diferença de temperatura entre o instante de tempo k e o início do pulso de calor em $t = 0$ (°C), $\overline{\Delta T}$ é a média dos valores de ΔT_k (°C), e l é o número de medidas de temperatura ao longo da liga Fe-Cr-Al.

Conforme apresentado no tópico 4.1.3, quatro termopares foram mantidos em contato com a liga Fe-Cr-Al em cada experimento ($l = 4$), permitindo que U_{axi} fosse calculado para cada instante de tempo k , desde o início até o término do aquecimento da liga.

Um elemento em comum apresentado nas equações anteriores é a diferença de temperatura entre um certo instante de tempo e o início do aquecimento, expressa de diferentes formas (ΔT_j na Eq. 14, $\Delta T(t)$ na Eq. 15 e ΔT_k na Eq. 16). Apesar disso, o cálculo desse aumento de temperatura gerado pelo pulso de calor foi efetuado da mesma maneira para suas aplicações distintas. A seguir, um passo a passo genérico para a obtenção do aumento de temperatura ΔT será detalhado, tendo como referência os dados de temperatura do cabo de FO. A Figura 20 representa graficamente o procedimento de cálculo de ΔT .

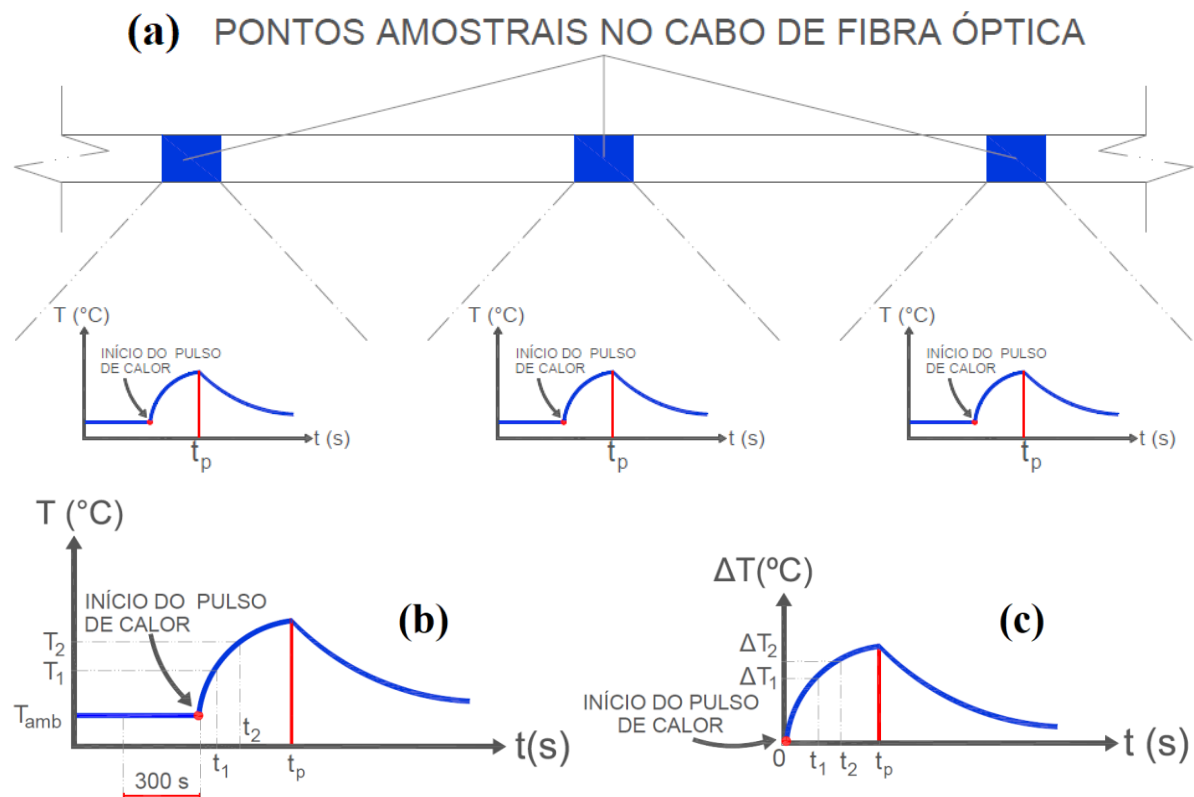
Para obter os valores de ΔT a serem utilizados para computar T_{cum} e ΔT_{max} em cada experimento, cálculos foram efetuados inicialmente para cada ponto amostral de medição distribuída de temperatura (Figura 20a). Nesse sentido, quatro procedimentos de cálculo foram executados. Primeiramente (etapa 1), uma média foi feita entre as medidas de temperatura dos 300 s anteriores à aplicação de um pulso de calor, definindo a temperatura ambiente (T_{amb} , °C) (Figura 20b).

Em seguida (etapa 2), T_{amb} foi subtraída de cada valor de temperatura posterior ao início do pulso, que passa a ter início em $t = 0$. Por exemplo, para o primeiro instante de aquecimento (t_1), há uma temperatura T_1 associada; da mesma forma, para o segundo instante (t_2), há T_2 (Figura 20b). Portanto, a subtração de T_{amb} de T_1 e T_2 permite obter ΔT_1 e ΔT_2 (Figura 20c). Esse passo foi executado até a obtenção de ΔT_j para o método T_{cum} e de $\Delta T(t_m)$ para ΔT_{max} .

Assim, a partir dos valores de ΔT , T_{cum} e ΔT_{max} puderam ser calculados para cada um dos 24 pontos amostrais, de cada experimento (etapa 3). Por fim, uma média espacial foi feita entre os valores de T_{cum} e ΔT_{max} (etapa 4).

A execução desse último procedimento, portanto, levou a obtenção de um único valor de T_{cum} e ΔT_{max} associados a um único valor de θ . Isso permitiu a construção das curvas de calibração entre θ e T_{cum} e entre θ e ΔT_{max} , para cada estratégia de aquecimento aplicada com as abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS. Além disso, os valores de ΔT das medições distribuídas permitiram avaliar a evolução temporal da resposta térmica do solo à geração dos diferentes pulsos de calor. Ademais, as quatro etapas descritas acima também foram executadas para obter valores de ΔT a partir das medições dos termopares, que foram usados para calcular ΔT_{max} (termopares em contato com o cabo óptico) e U_{axi} (termopares na liga Fe-Cr-Al). Nesses dois casos envolvendo os termopares, apenas os dados do primeiro umedecimento do solo (i.e., etapa de calibração) foram utilizados para as análises.

Figura 20 – Procedimentos de cálculo do aumento de temperatura gerado pelo pulso de calor



Fonte: autor (2023).

4.3 Análise estatística

Neste trabalho, três métricas estatísticas foram utilizadas: o coeficiente de determinação (R^2) (Equação 17), a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) (Equação 18) e a porcentagem de viés ($PBIAS$) (Equação 19).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})(Y_{est} - \bar{Y}_{est})}{[\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{est} - \bar{Y}_{est})^2]^{0,5}} \right\}^2 \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est})^2}{n}} \quad (18)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est}) 100\%}{\sum_{i=1}^n Y_{obs}} \quad (19)$$

Em que Y_{obs} é o dado observado, Y_{est} é o dado estimado, \bar{Y}_{obs} é a média dos dados observados, \bar{Y}_{est} é a média dos dados modelados, e n é o número de observações.

O R^2 , que varia de 0 a 1, é uma métrica estatística que representa a proporção da variância de uma variável dependente que pode ser explicada por uma variável independente em um modelo de regressão. Tipicamente, valores de R^2 maiores que 0,50 são considerados aceitáveis. Já o $RMSE$, que indica o erro nas unidades da variável de interesse, é igual a 0 quando o ajuste entre os dados é perfeito (MORIASI et al., 2007).

Por fim, a métrica $PBIAS$ mede a tendência média dos dados estimados em serem maiores ou menores do que os seus dados observados correspondentes. Os valores menores de $PBIAS$ indicam boa correspondência entre os dados, sendo 0 o valor ótimo dessa métrica. Além disso, valores positivos de $PBIAS$ indicam que o modelo tende a subestimar os dados observados, enquanto valores negativos informam que o modelo superestima os dados observados (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999).

Primeiramente, essas métricas estatísticas foram usadas para avaliar a qualidade de predição de θ pelos modelos de calibração de cada sensor de umidade. Em seguida, R^2 , $RMSE$ e $PBIAS$ foram aplicadas para analisar a qualidade das estimativas de θ pelos modelos definidos em sua correlação com T_{cum} e ΔT_{max} . Por fim, a eficácia dos modelos que relacionam θ a T_{cum} e ΔT_{max} também foi investigada na validação da metodologia proposta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Comportamento dos sensores de umidade

5.1.1 Calibração

Na etapa de calibração dos sensores de umidade SKU:SEN0193, os valores observados de θ foram ajustados às leituras de U_{out} de cada sensor. A Tabela 3 apresenta os coeficientes dos modelos matemáticos ajustados e os valores das métricas estatísticas para os diferentes modelos avaliados. Os sensores identificados como $S\theta 1$, $S\theta 2$ e $S\theta 3$ foram posicionados no experimento de abordagem DPHP-DTS, enquanto os sensores $S\theta 4$, $S\theta 5$ e $S\theta 6$ foram usados no experimento SPHP-DTS.

Ao observar os resultados, nota-se que os modelos matemáticos que tiveram melhor desempenho estatístico para todos os sensores foram os modelos exponencial ($R^2 = 0,94$ e $0,041 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,044 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) e de potência ($0,94 \leq R^2 \leq 0,96$ e $0,037 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,041 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), com pequena superioridade desse último ao apresentar maiores valores de R^2 e menores de $RMSE$. Ao considerar essas duas métricas, o modelo polinomial de 2º grau também apresentou bom desempenho ($0,89 \leq R^2 \leq 0,92$ e $0,051 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,062 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), ainda que inferior ao exponencial e de potência, enquanto o ajuste linear exibiu o pior desempenho dentre os quatro modelos ($0,79 \leq R^2 \leq 0,88$ e $0,061 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,079 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

Por outro lado, ao analisar a $PBIAS$, observa-se que os valores mais próximos de zero dessa métrica foram obtidos no ajuste do modelo linear ($-0,06 \% \leq PBIAS \leq 0,14 \%$) para todos os sensores. Ainda assim, os valores de $PBIAS$ para os modelos exponencial ($0,34 \% \leq PBIAS \leq 3,88 \%$), polinomial de 2º grau ($-0,38 \% \leq PBIAS \leq 0,29 \%$) e de potência ($-0,37 \% \leq PBIAS \leq 2,49 \%$) também se apresentaram dentro de um intervalo adequado. Dessa forma, o modelo de potência foi selecionado para a calibração de todos os sensores de umidade, conforme apresentado na Figura 21.

Ainda assim, é importante apontar que não há um consenso na literatura quanto ao uso de um tipo específico de modelo de calibração para sensores de umidade capacitivos do tipo SKU:SEN0193. A depender das condições aplicadas, o uso de diferentes modelos foi reportado. Placidi et al. (2020) investigaram o comportamento desses sensores em solo arenoso e obtiveram ajustes satisfatórios com modelos do tipo exponencial e polinomial de 2º grau, e

Nagahage, Nagahage e Fujino (2019) utilizaram um solo rico em matéria orgânica, e a curva de calibração foi um polinômio de 3º grau.

Tabela 3 – Coeficientes dos modelos ajustados e métricas estatísticas obtidas durante a calibração dos sensores de umidade

Sensor	Tipo do modelo	Modelo ajustado	R^2	RMSE (m ³ .m ⁻³)	PBIAS (%)
Sθ1	EXP ^a	$\theta = 12,37.exp(-1,658.U_{out})$	0,94	0,043	0,84
	LIN ^b	$\theta = -0,249.U_{out} + 0,890$	0,87	0,063	0,14
	POL2 ^c	$\theta = 0,144.U_{out}^2 - 1,052.U_{out} + 1,954$	0,92	0,053	0,15
	POT ^d	$\theta = 7,67.U_{out}^{-4,057}$	0,95	0,040	0,42
Sθ2	EXP	$\theta = 14,47.exp(-1,69.U_{out})$	0,94	0,041	0,79
	LIN	$\theta = -0,255.U_{out} + 0,917$	0,88	0,061	-0,05
	POL2	$\theta = 0,158.U_{out}^2 - 1,147.U_{out} + 2,115$	0,92	0,052	0,29
	POT	$\theta = 9,859.U_{out}^{-4,249}$	0,95	0,038	0,17
Sθ3	EXP	$\theta = 118,5.exp(-2,845.U_{out})$	0,94	0,044	3,88
	LIN	$\theta = -0,251.U_{out} + 0,858$	0,79	0,079	3.E-3
	POL2	$\theta = 0,282.U_{out}^2 - 1,771.U_{out} + 2,799$	0,89	0,062	0,28
	POT	$\theta = 25,66.U_{out}^{-6}$	0,95	0,039	2,49
Sθ4	EXP	$\theta = 4,864.exp(-1,454.U_{out})$	0,94	0,042	0,34
	LIN	$\theta = -0,219.U_{out} + 0,749$	0,87	0,063	-0,03
	POL2	$\theta = 0,124.U_{out}^2 - 0,852.U_{out} + 1,49$	0,92	0,051	-0,05
	POT	$\theta = 2,154.U_{out}^{-3,103}$	0,95	0,040	-0,37
Sθ5	EXP	$\theta = 15,07.exp(-1,772.U_{out})$	0,94	0,044	1,08
	LIN	$\theta = -0,250.U_{out} + 0,883$	0,86	0,066	-0,02
	POL2	$\theta = 0,180.U_{out}^2 - 1,245.U_{out} + 2,186$	0,91	0,055	-0,26
	POT	$\theta = 8,743.U_{out}^{-4,293}$	0,94	0,041	0,38
Sθ6	EXP	$\theta = 9,157.exp(-1,684.U_{out})$	0,94	0,041	1,21
	LIN	$\theta = -0,241.U_{out} + 0,821$	0,87	0,064	-0,06
	POL2	$\theta = 0,172.U_{out}^2 - 1,132.U_{out} + 1,904$	0,92	0,052	-0,38
	POT	$\theta = 4,181.U_{out}^{-3,776}$	0,96	0,037	0,50

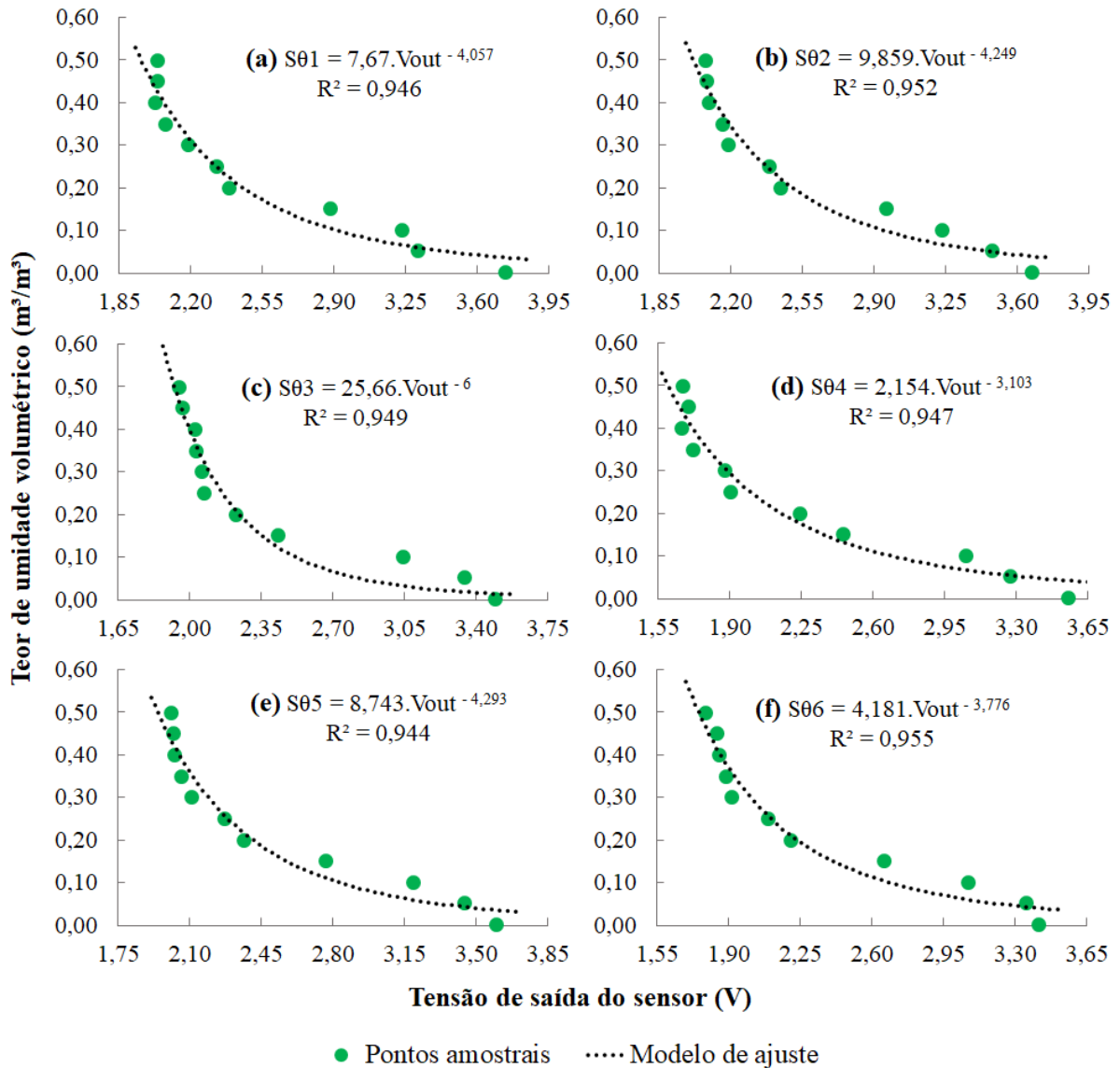
^a é o modelo exponencial; ^b é o modelo linear; ^c é o modelo polinomial de 2º grau; ^d é o modelo de potência.

Fonte: autor (2023).

Assim como neste trabalho, Radi et al. (2018) encontraram os melhores resultados ao ajustar os valores de θ às leituras dos sensores SKU:SEN0193 empregando um modelo de potência, ainda que utilizando um solo argilo-arenoso, diferente do solo franco-argilo-arenoso que gerou a calibração apresentada na Figura 21. Além disso, Pereira, Sandri e Silva Júnior

(2022) coletaram amostras de solo argiloso, franco-arenoso e muito argiloso, e ajustaram um modelo polinomial de 2º grau para todos os casos, enquanto ótimos ajustes foram encontrados por Hrisiko (2020) com o uso de modelos de calibração linear.

Figura 21 – Modelos ajustados aos dados observados de θ em função de U_{out} , durante a calibração dos sensores de umidade



Fonte: autor (2023).

Além das distinções de composição e de classe textural dos solos utilizados nessas pesquisas, existem também diferenças nos valores de ρ_b , no intervalo de θ aplicado e até na tensão de alimentação dos sensores (3,30 ou 5,00 V). Portanto, a partir dos resultados expostos neste trabalho e pela literatura, afirma-se que os sensores de umidade SKU:SEN0193 podem

apresentar comportamentos distintos de acordo com as suas condições de uso e aplicação. Conforme concluído por Pereira, Sandri e Silva Júnior (2022), a calibração desses sensores deve ser feita especificamente para cada tipo de solo utilizado, bem como de acordo com o valor considerado de ρ_b .

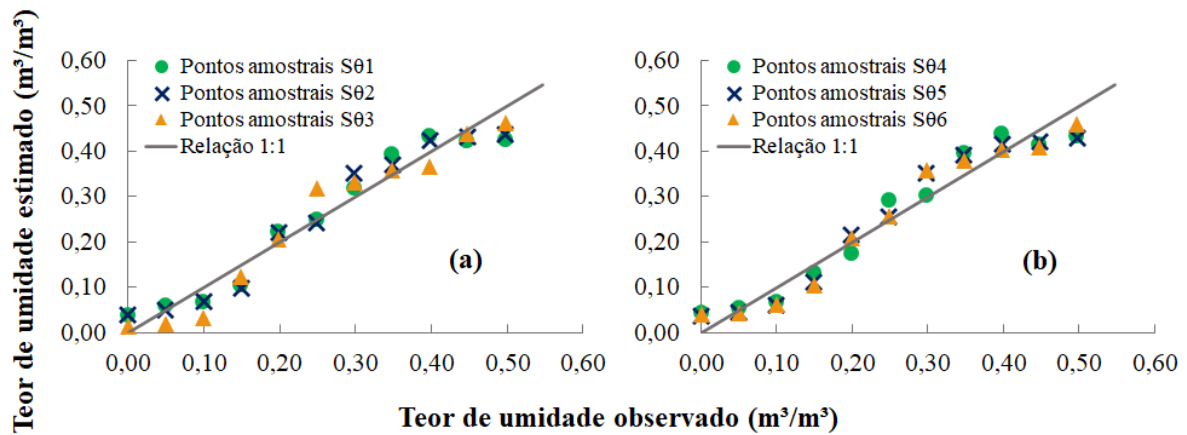
Ao observar a Figura 21, nota-se também que cada sensor apresentou diferentes respostas de saída para um mesmo valor de θ . Por exemplo, na calibração, os sensores S θ 1 e S θ 6 operaram nos intervalos de U_{out} de 2,04 a 3,74 V e 1,79 a 3,42 V, respectivamente. Esses resultados indicam a existência de uma variabilidade na resposta entre os sensores, em termos de intervalo e de magnitude das leituras de U_{out} . Isso reforça a validade de realizar a calibração dos sensores SKU:SEN0193 individualmente e de considerar modelos de calibração individuais, de acordo com os apontamentos de Nagahage, Nagahage e Fujino (2019) e Schwambach et al. (2023).

Ademais, a Figura 21 ainda permite apontar que a sensibilidade da resposta dos sensores diminui à medida que θ aumenta. Isso pode ser notado pela inclinação dos modelos de calibração, que é maior para menores valores de U_{out} (i.e., maior θ). Por outro lado, à medida que U_{out} aumenta e, conseqüentemente, θ diminui, a inclinação dos modelos passa a diminuir, indicando maior sensibilidade de resposta para solos mais secos.

A Figura 22 exibe a relação entre os valores observados e estimados de θ pelos modelos de calibração. A Figura permite notar que, mesmo que os valores observados de θ sigam aumentando para $\theta \geq 0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, o mesmo não ocorre para os valores estimados, em que θ permanece em torno de $0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Esses resultados sugerem baixa sensibilidade dos sensores SKU:SEN0193 para solos úmidos, especialmente para $\theta \geq 0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, dadas as condições de calibração que foram executadas neste trabalho.

Conforme será visto a seguir (tópico 5.1.2), esse comportamento refletiu-se nas medidas de θ nos tubos experimentais, nos primeiros momentos de medição após o umedecimento do solo. Apesar disso, o posicionamento dos pontos amostrais em torno da reta de relação 1:1 (Figura 22) representa graficamente o bom desempenho dos modelos de potência nas predições de θ , conforme as métricas estatísticas também indicaram (Tabela 3).

Figura 22 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a calibração dos sensores de umidade

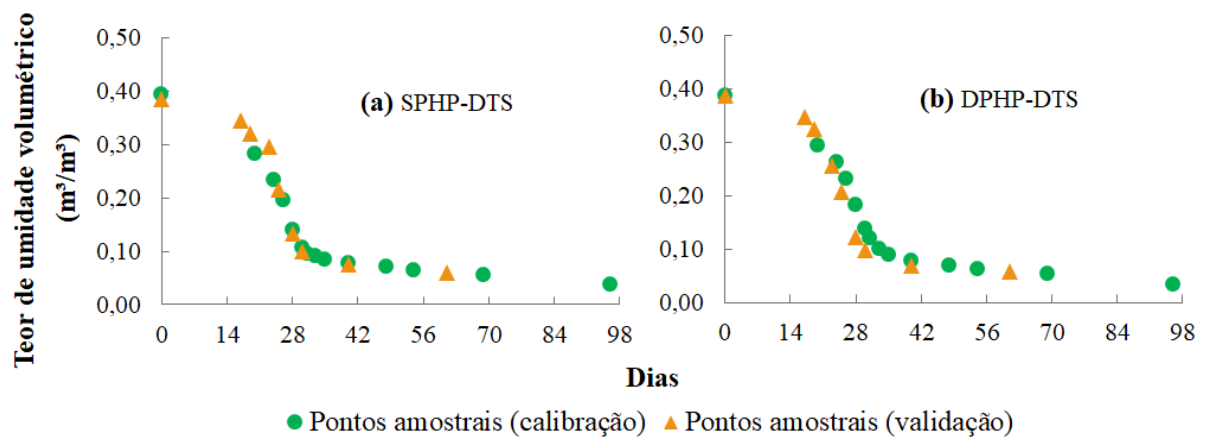


Fonte: autor (2023).

5.1.2 Variação de θ nos experimentos ao longo do tempo

A Figura 23 exibe os valores médios de θ estimados pelos sensores de umidade, em cada experimento construído.

Figura 23 – Variação do teor de umidade ao longo do tempo nas etapas de validação e calibração da metodologia proposta nos experimentos de abordagem (a) SPHP-DTS e (b) DPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Os dados para a concepção das curvas de calibração de θ em função da temperatura foram coletados entre 22 de abril e 27 de julho de 2022, intervalo de 97 dias com coleta de dados em 14 dias distintos. Já a etapa de validação da metodologia proposta foi feita durante 23 de agosto e 23 de outubro de 2022, correspondendo a um intervalo de 62 dias, com realização

de medições em 9 dias. Na Figura 23, o dia 0 marca o umedecimento do solo até que a drenagem livre fosse observada em ambos os tubos de PVC DEFoFo, tanto na etapa de calibração quanto na de validação.

No experimento de abordagem SPHP-DTS (Figura 23a), as estimativas dos sensores indicaram que θ variou de $0,39 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ a $0,04 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ na calibração, e de $0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ a $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ na validação. Já na abordagem DPHP-DTS (Figura 23b), θ variou de $0,39 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ a $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (calibração) e de $0,39 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ a $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (validação). É possível observar também as semelhanças entre os valores de θ obtidos na execução de uma mesma etapa (i.e., calibração ou validação) nas diferentes abordagens. Isso aponta para a similaridade construtiva que foi alcançada em ambos os experimentos, bem como para o desempenho parecido dos sensores SKU:SEN0193 utilizados neste trabalho.

No entanto, ressalta-se a discussão feita no tópico 5.1.1 acerca da calibração dos sensores, em que $\theta = 0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ foi reconhecido como um valor limite a partir do qual a resposta dos sensores mostrou-se insensível às variações de umidade. Esse comportamento pode ter mascarado o valor real de θ dos pontos amostrais do dia 0 na Figura 23, tanto na etapa de calibração quanto na de validação, em ambos os experimentos. Ainda assim, os demais pontos encontraram-se abaixo de $0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, pertencendo, portanto, a uma faixa de valores na qual os dados estimados e observados dos sensores tiveram melhores correlações.

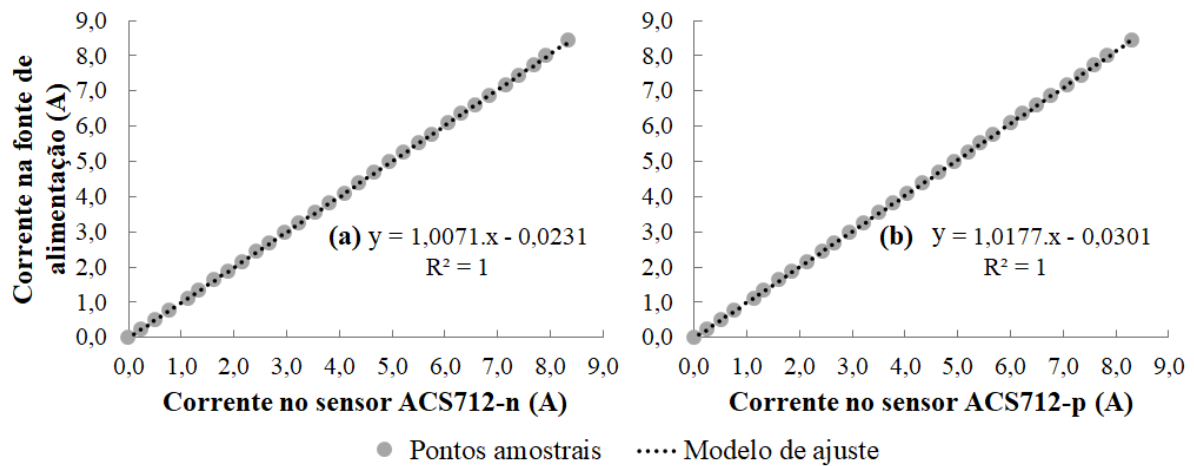
A coleta de amostras de solo indeformadas na superfície dos tubos após a conclusão da etapa de validação revelou que a densidade aparente seca real de cada experimento foi de, aproximadamente, $\rho'_b = 1372 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (SPHP-DTS) e $\rho'_b = 1386 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (DPHP-DTS). Essa última foi idêntica ao valor de ρ_b do solo coletado em campo, e que foi reproduzido durante a calibração dos sensores. Já o valor $\rho'_b = 1372 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ obtido no experimento SPHP-DTS foi ligeiramente inferior ao valor original de campo. Porém, considerando a mesma massa de solo seco das amostras usadas na calibração dos sensores ($m_s = 0,60 \text{ kg}$), essa diferença nos valores de densidade aparente e, conseqüentemente, de volume total de solo, não foi suficiente para alterar a altura de solo dentro dos recipientes. Por causa disso, a calibração original dos sensores foi mantida.

5.2 Comportamento elétrico real dos pulsos de calor

Diferentemente dos resultados obtidos durante a calibração dos sensores de umidade SKU:SEN0193, a observação visual do gráfico das leituras de i da fonte de alimentação em função das leituras de i_{ACS712} permitiu identificar nitidamente a existência de uma forte correlação linear. Por causa disso, demais modelos (e.g., exponencial, polinomial de 2º grau) foram descartados das análises. A Figura 24 apresenta os modelos de calibração definidos para cada sensor de corrente, sendo ACS712-n o sensor próximo ao polo negativo da fonte (Figura 24a) e ACS712-p o sensor próximo ao polo positivo da fonte de alimentação (Figura 24b).

Ao observar os valores dos coeficientes dos modelos ajustados, é possível notar que a relação entre os valores de i da fonte e de i_{ACS712} se aproxima de uma reta de proporção 1:1, o que ressalta a eficácia dos sensores ACS712 em realizar medições de corrente contínua. Apesar desse comportamento, a calibração dos sensores foi mantida para garantir a aproximação das leituras dos sensores daquelas da fonte de alimentação.

Figura 24 – Modelos ajustados aos dados observados de i em função de i_{ACS712} durante a calibração dos sensores de corrente elétrica próximos aos polos (a) negativo e (b) positivo da fonte



Fonte: autor (2023).

A Tabela 4 apresenta os valores reais das grandezas elétricas medidas direta ou indiretamente a partir da execução dos pulsos de calor na liga Fe-Cr-Al durante a etapa de concepção das curvas de calibração de θ em função da temperatura. Os resultados apresentados indicam que houve uma redução nos valores médios de i durante a execução dos diferentes aquecimentos em relação aos valores previamente dimensionados (Tabela 2). Para os pulsos de

baixa potência (B180 e B600), houve uma queda de corrente de, aproximadamente, $\Delta i = 0,63$ A (erro relativo de 15,7 %), enquanto, para o pulso de alta potência (A180), houve uma queda de $\Delta i = 1,27$ A (erro relativo de 14,2 %). Esses resultados mostram que a perda de corrente da liga Fe-Cr-Al na condição de soterramento aconteceu aproximadamente nas mesmas proporções, independentemente do valor absoluto de i aplicado.

Tabela 4 – Resumo das características reais dos pulsos de calor aplicados na liga Fe-Cr-Al

Pulso de calor	i^a (A)	U_t^b (V)	P_t^c (W)	P_l^d (W)	P_l/m^e (W.m ⁻¹)	t_p^f (s)	q^g (J.m ⁻¹)
B180	$3,39 \pm 0,10$	12,2	41,4	31,9	4,3	180	774
B600	$3,38 \pm 0,14$	12,2	41,2	31,8	4,2	600	2520
A180	$7,64 \pm 0,21$	28,0	213,9	161,0	21,5	180	3870

^a é o valor médio de corrente elétrica no circuito completo (\pm desvio padrão); ^b é a tensão no circuito completo, aplicada na fonte de alimentação; ^c é a potência no circuito completo; ^d é a potência na liga; ^e é a potência por metro na liga; ^f é a duração do pulso de calor; ^g é a energia por metro na liga.

Fonte: autor (2023).

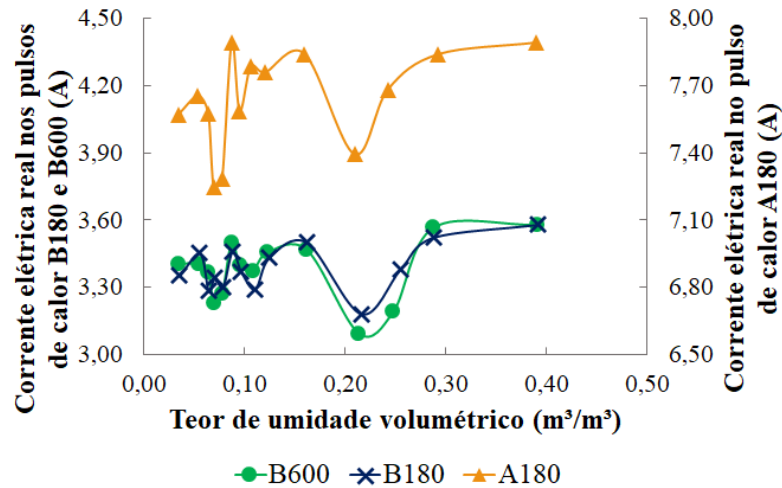
É possível observar também que, em função da redução dos valores de i , as outras propriedades elétricas do circuito se alteraram. Os valores originalmente dimensionados de P_l de 5 W.m^{-1} (baixa potência) e 25 W.m^{-1} (alta potência) foram recalculados como sendo aproximadamente iguais a $4,2 \text{ W.m}^{-1}$ e $21,5 \text{ W.m}^{-1}$, respectivamente. Consequentemente, os valores reais de q também foram reduzidos (Tabela 4). No entanto, uma vez que os valores de P_l foram reduzidos sistematicamente e nas mesmas proporções, a classificação qualitativa dos pulsos como sendo de baixa ou alta potência foi mantida. As abreviações B180, B600 e A180, portanto, continuaram sendo usadas no decorrer do texto.

Uma hipótese levantada que poderia justificar a perda de corrente da liga Fe-Cr-Al para o meio circundante foi a de que esse material seria mais suscetível a eventuais perdas quando o solo apresentasse maiores valores de θ . Entretanto, essa hipótese foi descartada, uma vez que as oscilações de corrente não apresentaram qualquer padrão identificável em função de θ (Figura 25). Nesse caso, θ foi calculado pela média dos valores encontrados em cada experimento (ver Figura 23) durante a execução de cada pulso de calor.

Nesse sentido, outra justificativa para essa redução nos valores dimensionados de i relaciona-se com o verniz usado para isolar eletricamente a liga Fe-Cr-Al. Conforme a Figura 24 apresenta, a relação observada entre os valores reais de i (fonte de alimentação) e os valores

de i_{ACS712} aproxima-se de uma reta 1:1. Esses dados foram obtidos com a liga Fe-Cr-Al na condição de pré-soterramento, isto é, em contato apenas com o ar, que funcionou como um isolante elétrico, minimizando as perdas de corrente. Por outro lado, com a liga soterrada, as perdas de corrente foram potencializadas pelo meio circundante ser o solo trifásico. Nesse aspecto, irregularidades na aplicação do verniz na superfície da liga aquecedora também podem ter contribuído com a perda de corrente. Futuros trabalhos devem testar diferentes formas de isolar eletricamente a liga Fe-Cr-Al.

Figura 25 – Oscilações nos valores de i em função de θ , para os diferentes pulsos de calor aplicados na liga Fe-Cr-Al



Fonte: autor (2023).

Ademais, a Figura 25 mostra também que as oscilações nos valores de i para as diferentes estratégias de aquecimento seguem uma distribuição semelhante em função de θ , indicando que o valor de i não está relacionado a essa aleatoriedade no comportamento da corrente. Portanto, as variações observadas em i também podem ser associadas ao ruído natural oriundo dos sensores ACS712, e até mesmo às oscilações provenientes da própria fonte de alimentação. Apesar disso, a amplitude de valores de i foi pequena para todas as estratégias de aquecimento aplicadas: de 3,18 a 3,58 A para a estratégia B180, de 3,10 a 3,58 A para a B600 e de 7,25 a 7,89 A para a A180. O baixo desvio padrão do valor médio calculado de i (Tabela 4) também mostra que, apesar das diferenças entre valores reais e dimensionados, a corrente pode ser considerada estável, para os fins da aplicação da metodologia AHFO deste trabalho.

5.3 Evolução temporal da resposta térmica do solo aos pulsos de calor

Particularmente neste tópico, a fim de avaliar a evolução da resposta térmica do solo à geração dos pulsos de calor durante todo o período de aquecimento e em parte do resfriamento, foram escolhidas três condições de θ o mais distintas possível entre si. Inicialmente, foram selecionadas as condições extremas de θ obtidas em cada experimento: 0,39 e 0,04 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para a abordagem SPHP-DTS (Figura 23a), e 0,39 e 0,03 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para a abordagem DPHP-DTS (Figura 23b). Em seguida, a terceira condição de θ foi definida pela sua proximidade com a média dos dois valores previamente selecionados. Dessa forma, foram selecionados os valores de 0,20 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (SPHP-DTS) e 0,18 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (DPHP-DTS).

Ao comparar o trio de valores de θ definido para cada abordagem, observa-se a proximidade numérica que há entre eles. Por causa disso, para efeito da discussão dos resultados aqui apresentados, as condições extremas de ambos os experimentos foram definidas como representativas de um solo com condições de umidade alta e baixa, enquanto a terceira condição foi considerada representativa de um solo com condição de umidade média. Assim, a Figura 26 apresenta a resposta térmica do solo à geração dos pulsos de calor de diferentes configurações para as abordagens SPHP-DTS (Figura 26a, c, e) e DPHP-DTS (Figura 26b, d, f). Os valores apresentados são relativos aos dados de temperatura distribuída.

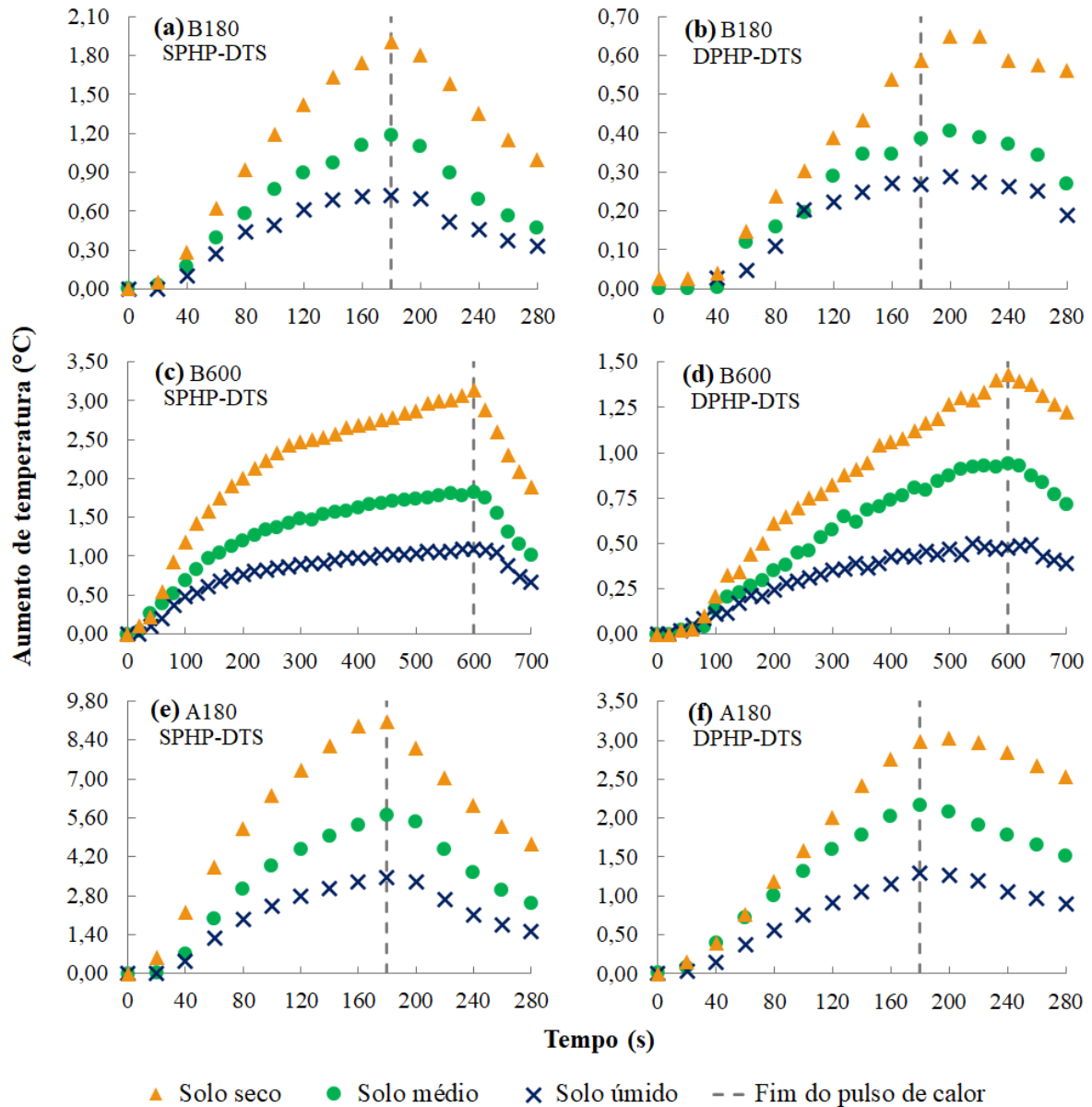
A Figura 26 mostra que, para todas as estratégias de aquecimento, nos instantes iniciais dos pulsos de calor ($t \leq 40$ s para a SPHP-DTS e $t \leq 60$ s para a DPHP-DTS, aproximadamente), o aumento de temperatura (ΔT) é muito semelhante para condições distintas de θ . Por outro lado, à medida que o aquecimento prossegue, o ΔT vai se tornando cada vez mais nítido para as diferentes condições de θ , e passa a ser um indicativo dessa última.

Esse comportamento é observado porque o início do aquecimento é controlado pelas propriedades de transferência de calor do material aquecedor (neste caso, a liga Fe-Cr-Al), sendo, portanto, independente de θ . Já as respostas térmicas posteriores passam a ser fortemente controladas pelas propriedades do solo, de forma que as divergências nos valores de ΔT para diferentes θ se tornam mais evidentes (STRIEGL; LOHEIDE II, 2012).

Nesse aspecto, especialmente para instantes de tempo mais tardios, a Figura 26 mostra que, em todos os casos, a condição de solo seco gerou os maiores valores de ΔT , enquanto o solo úmido levou aos menores ΔT . Isso ocorre porque a água funciona como uma ponte que une as partículas sólidas do solo, permitindo que o calor seja transportado para longe da fonte

aquecedora mais rapidamente, além de fornecer maior potencial de armazenamento de calor ao meio poroso, dificultando seu aquecimento (SOURBEER; LOHEIDE II, 2015).

Figura 26 – Evolução temporal da resposta térmica do solo aos pulsos de calor de diferentes configurações nos experimentos de abordagem SPHP-DTS e DPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Ao comparar a aplicação do mesmo pulso de calor em uma mesma condição de θ na abordagem SPHP-DTS com a DPHP-DTS, nota-se que a evolução da perturbação térmica gerada no solo possui comportamento mais contínuo na SPHP-DTS do que na DPHP-DTS.

Esse efeito pode ser observado de forma clara, por exemplo, nas Figuras 26c e 26d. Nessa última, em certos instantes de tempo (e.g., de 360 para 380 s no solo seco, de 320 para 340 s no solo médio e de 520 a 540 s no solo úmido), os pontos consecutivos de ΔT são levemente descontínuos. Isso pode ter sido causado pelas desigualdades de espaçamento entre a liga Fe-Cr-Al e o cabo de FO ao longo do comprimento da tubulação utilizada para o experimento da abordagem DPHP-DTS.

Além disso, na abordagem SPHP-DTS, o contato entre o material aquecedor e o cabo óptico sensor de temperatura garante que o calor liberado seja rapidamente detectado pelo sistema FO-DTS por meio da elevação da temperatura. Por outro lado, na abordagem DPHP-DTS, as medições de temperatura estão sujeitas à influência da propagação e dissipação do calor através do meio poroso, que ocorrem antes dele atingir o cabo óptico. Esse último aspecto também justifica a constatação de que há uma maior demora no início do aumento da temperatura na abordagem DPHP-DTS do que na SPHP-DTS, especialmente para os cenários de aquecimento de baixa potência, isto é, B180 (Fig. 26a e b) e B600 (Fig. 26c e d). Esse comportamento dos primeiros pontos de ΔT após o início do pulso de calor também pode ser observado em Apperl, Bernhardt e Schulz (2019), que aplicaram diferentes estratégias de aquecimento na abordagem DPHP-DTS.

Também é possível observar os efeitos do distanciamento da liga Fe-Cr-Al ao cabo de FO no comportamento de ΔT após o fim do pulso de calor. Na aplicação SPHP-DTS, ocorre o resfriamento do solo com o término do aquecimento da liga Fe-Cr-Al, de forma que os valores de ΔT diminuem rapidamente, especialmente para as condições de solo seco e médio. O rápido decaimento de ΔT após o fim do pulso de calor também é apresentado por Gamage, Biswas e Strachan (2018), que utilizaram um cabo de FO revestido tradicional para gerar o aquecimento, numa aplicação da abordagem SPHP-DTS. Já na DPHP-DTS, os valores de ΔT diminuem de forma mais lenta, havendo, em alguns casos, o aumento de ΔT mesmo após o aquecimento ter sido cessado (e.g., solo úmido na Fig. 26b e solo seco na Fig. 26f).

Esses resultados são semelhantes aos reportados por Shehata et al. (2020), que aplicaram a metodologia DPHP-DTS em laboratório, também utilizando um cabo óptico ativo (revestido com armadura metálica). Ademais, para ambas as abordagens e todas as estratégias de aquecimento, a Figura 26 ainda permite indicar que a condição de solo úmido apresentou o resfriamento mais lento, uma vez que a presença de água eleva os valores de C do solo.

5.4 Construção das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max}

5.4.1 Qualidade do ajuste de diferentes modelos matemáticos

A Tabela 5 apresenta os valores das métricas obtidas nos diferentes ajustes matemáticos dos pontos amostrais de T_{cum} e ΔT_{max} ao θ na abordagem SPHP-DTS.

Tabela 5 – Coeficientes dos modelos ajustados e métricas estatísticas obtidas durante a calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem SPHP-DTS

Método	Tipo do modelo	Modelo ajustado	R^2	RMSE (m ³ .m ⁻³)	PBIAS (%)
B180 T_{cum}	EXP ^a	$\theta = 2,748.\exp(-0,021.T_{cum})$	0,96	0,021	0,53
	LIN ^b	$\theta = - 0,003.T_{cum} + 0,562$	0,84	0,042	-0,75
	POL2 ^c	$\theta = 3,3.E-5.T_{cum}^2 - 0,013.T_{cum} + 1,263$	0,95	0,024	-0,82
	POT ^d	$\theta = 8,7.E+4.T_{cum}^{-2,703}$	0,97	0,017	-0,72
B180 ΔT_{max}	EXP	$\theta = 1,785.\exp(-2,092.\Delta T_{max})$	0,99	0,013	-1,64
	LIN	$\theta = -0,324.\Delta T_{max} + 0,563$	0,91	0,032	-1,00
	POL2	$\theta = 0,301.\Delta T_{max}^2 - 1,075.\Delta T_{max} + 1,006$	0,99	0,010	-1,31
	POT	$\theta = 0,203.\Delta T_{max}^{-2,109}$	0,96	0,023	-2,76
B600 T_{cum}	EXP	$\theta = 1,846.\exp(-0,003.T_{cum})$	0,98	0,014	-0,74
	LIN	$\theta = - 4,8.E-4.T_{cum} + 0,543$	0,87	0,038	-0,01
	POL2	$\theta = 7,4.E-7.T_{cum}^2 - 0,002.T_{cum} + 1,032$	0,99	0,009	0,17
	POT	$\theta = 1,86.E+5.T_{cum}^{-2,12}$	0,95	0,025	-2,25
B600 ΔT_{max}	EXP	$\theta = 1,484.\exp(-1,188.\Delta T_{max})$	0,98	0,017	-1,07
	LIN	$\theta = -0,182.\Delta T_{max} + 0,529$	0,89	0,035	0,01
	POL2	$\theta = 0,095.\Delta T_{max}^2 - 0,576.\Delta T_{max} + 0,914$	0,99	0,011	-0,01
	POT	$\theta = 0,487.\Delta T_{max}^{-1,882}$	0,93	0,028	-2,20
A180 T_{cum}	EXP	$\theta = 2,366.\exp(-0,004.T_{cum})$	0,99	0,013	1,27
	LIN	$\theta = - 5,4.E-4.T_{cum} + 0,54$	0,85	0,041	0,67
	POL2	$\theta = 1,2.E-6.T_{cum}^2 - 0,002.T_{cum} + 1,148$	0,99	0,011	0,93
	POT	$\theta = 1,4.E+6.T_{cum}^{-2,48}$	0,99	0,013	-0,36
A180 ΔT_{max}	EXP	$\theta = 1,712.\exp(-0,426.\Delta T_{max})$	0,97	0,017	-0,46
	LIN	$\theta = -0,067.\Delta T_{max} + 0,560$	0,90	0,034	0,61
	POL2	$\theta = 0,012.\Delta T_{max}^2 - 0,216.\Delta T_{max} + 0,988$	0,99	0,012	0,62
	POT	$\theta = 4,892.\Delta T_{max}^{-2,03}$	0,93	0,028	-1,60

^a é o modelo exponencial; ^b é o modelo linear; ^c é o modelo polinomial de 2º grau; ^d é o modelo de potência.

Fonte: autor (2023).

Os resultados da Tabela 5 apontam que, de forma geral, os modelos que tiveram melhor desempenho estatístico foram o polinomial de 2º grau ($0,95 \leq R^2 \leq 0,99$ e $0,009 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,024 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) e o exponencial ($0,96 \leq R^2 \leq 0,99$ e $0,013 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,021 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). A equação de 2º grau apresentou os maiores valores de R^2 e os menores de $RMSE$ para ambos T_{cum} e ΔT_{max} em todas as estratégias de aquecimento, com exceção da B180 - T_{cum} . Nessa combinação, o modelo de potência exibiu desempenho superior aos demais.

Ao analisar os ajustes de T_{cum} e ΔT_{max} nas estratégias de aquecimento restantes, nota-se que o modelo de potência manteve bom desempenho ($0,93 \leq R^2 \leq 0,99$ e $0,013 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,028 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), mas levemente inferior ao exponencial e polinomial de 2º grau. Dentre os quatro tipos de modelos avaliados, o linear foi o que apresentou o pior desempenho ($0,84 \leq R^2 \leq 0,91$ e $0,032 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,042 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), considerando essas duas métricas.

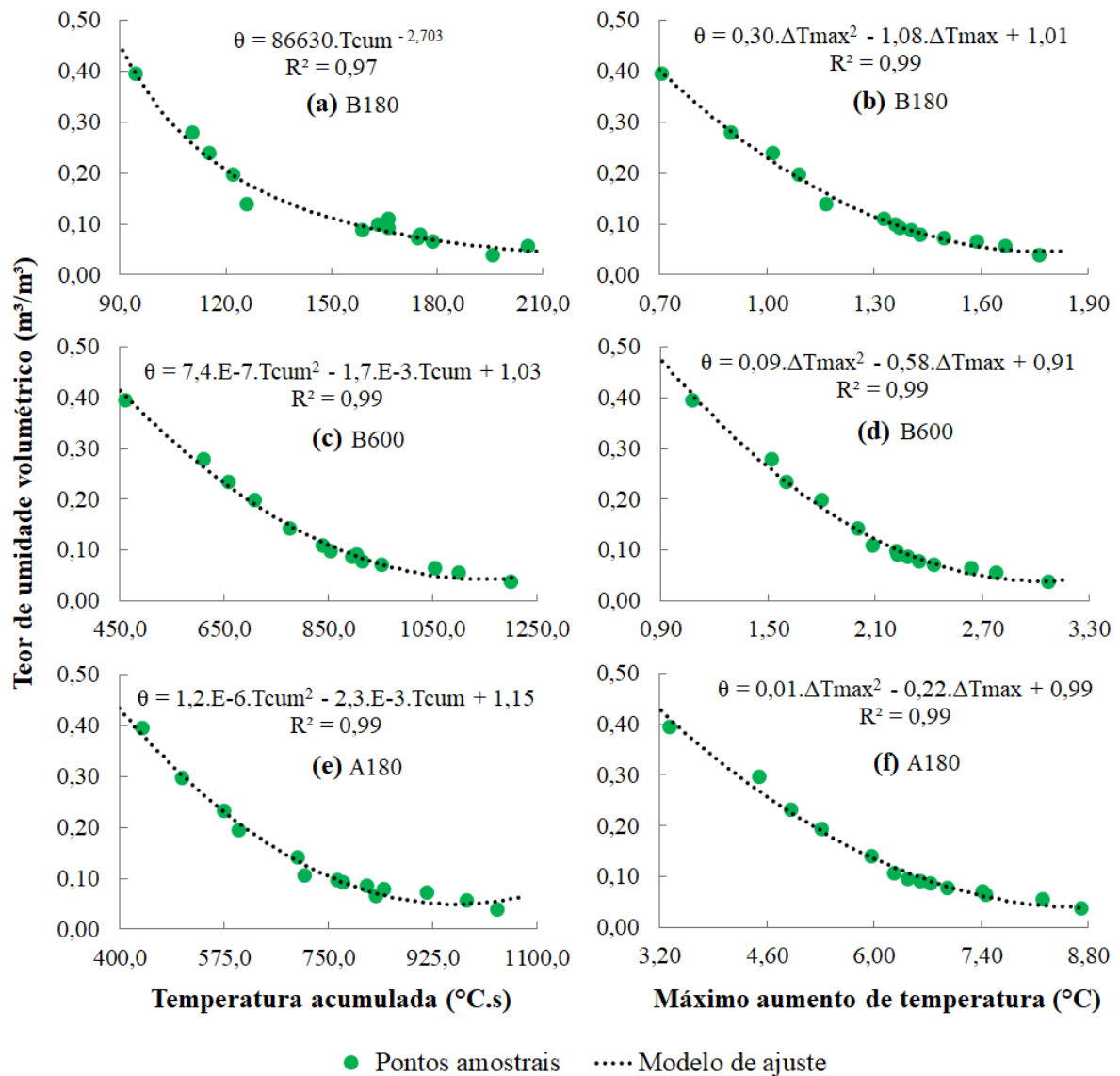
No entanto, ao analisar a $PBIAS$, observa-se que os valores mais próximos de zero dessa métrica foram obtidos no ajuste do modelo linear ($-1,00\% \leq PBIAS \leq 0,67\%$). Mesmo assim, os valores de $PBIAS$ para os modelos exponencial ($-1,64\% \leq PBIAS \leq 1,27\%$), polinomial de 2º grau ($-1,31\% \leq PBIAS \leq 0,93\%$) e de potência ($-2,76\% \leq PBIAS \leq -0,36\%$) também foram próximos de zero.

Dessa forma, o modelo de potência foi selecionado para a curva de ajuste da aplicação B180 - T_{cum} , enquanto o polinomial de 2º grau foi escolhido para as demais combinações da abordagem SPHP-DTS. A Figura 27 apresenta os pontos amostrais e o modelo de calibração de θ em função de T_{cum} e de ΔT_{max} .

Com relação à abordagem DPHP-DTS, de maneira geral, os modelos que tiveram melhor desempenho foram o exponencial ($0,78 \leq R^2 \leq 0,94$ e $0,029 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,054 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) e o polinomial de 2º grau ($0,78 \leq R^2 \leq 0,95$ e $0,025 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,053 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), com pequena superioridade desse último ao apresentar os maiores valores de R^2 e os menores de $RMSE$ para ambos T_{cum} e ΔT_{max} , em todas as estratégias de aquecimento. A Tabela 6 apresenta os valores das métricas estatísticas e dos coeficientes dos modelos avaliados na abordagem DPHP-DTS.

Ao avaliar a qualidade do ajuste dos modelos restantes em termos de R^2 e $RMSE$, é possível constatar que os desempenhos dos modelos de potência ($0,77 \leq R^2 \leq 0,91$ e $0,035 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,055 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) e linear ($0,76 \leq R^2 \leq 0,91$ e $0,034 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \leq RMSE \leq 0,055 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) foram similares entre si, mas ainda inferiores ao modelo polinomial de 2º grau.

Figura 27 – Modelos de calibração ajustados aos dados observados de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem SPHP-DTS



Fonte: Autor (2023).

Por outro lado, ao analisar a *PBIAS*, observa-se que os valores mais próximos de zero dessa métrica foram obtidos no ajuste do modelo linear ($-0,22\% \leq PBIAS \leq 0,83\%$). Mesmo assim, os valores dessa métrica para os modelos exponencial ($-2,55\% \leq PBIAS \leq 0,03\%$), polinomial de 2^o grau ($-0,29\% \leq PBIAS \leq 0,91\%$) e de potência ($-2,98\% \leq PBIAS \leq -0,26\%$) também se mantiveram próximos de zero. Em função desses resultados, a equação de 2^o grau foi escolhida para a curva de calibração de T_{cum} e ΔT_{max} , na aplicação de todas as estratégias de aquecimento, conforme apresentado na Figura 28.

Tabela 6 – Coeficientes dos modelos ajustados e métricas estatísticas obtidas durante a calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem DPHP-DTS

Sensor	Tipo do modelo	Modelo ajustado	R^2	RMSE (m ³ .m ⁻³)	PBIAS (%)
B180 T_{cum}	EXP ^a	$\theta = 4,759.\exp(-0,097.T_{cum})$	0,78	0,054	0,03
	LIN ^b	$\theta = -0,016.T_{cum} + 0,737$	0,76	0,055	0,35
	POL2 ^c	$\theta = 6,3.E-4.T_{cum}^2 - 0,061.T_{cum} + 1,529$	0,78	0,053	0,32
	POT ^d	$\theta = 1,8.E+4.T_{cum}^{-3,278}$	0,77	0,055	-0,26
B180 ΔT_{max}	EXP	$\theta = 3,496.\exp(-6,927.\Delta T_{max})$	0,94	0,029	-1,59
	LIN	$\theta = -1,106.\Delta T_{max} + 0,681$	0,88	0,040	-0,04
	POL2	$\theta = 2,959.\Delta T_{max}^2 - 3,926.\Delta T_{max} + 1,329$	0,95	0,025	-0,13
	POT	$\theta = 0,016.\Delta T_{max}^{-2,765}$	0,91	0,035	-2,34
B600 T_{cum}	EXP	$\theta = 1,991.\exp(-0,009.T_{cum})$	0,88	0,039	-2,05
	LIN	$\theta = -0,002.T_{cum} + 0,663$	0,89	0,037	0,42
	POL2	$\theta = 3,9.E-6.T_{cum}^2 - 0,004.T_{cum} + 1,019$	0,93	0,031	0,47
	POT	$\theta = 2,1.E+4.T_{cum}^{-2,078}$	0,81	0,049	-2,08
B600 ΔT_{max}	EXP	$\theta = 1,555.\exp(-2,465.\Delta T_{max})$	0,88	0,039	-1,85
	LIN	$\theta = -0,466.\Delta T_{max} + 0,614$	0,89	0,038	0,83
	POL2	$\theta = 0,333.\Delta T_{max}^2 - 1,112.\Delta T_{max} + 0,912$	0,93	0,031	0,91
	POT	$\theta = 0,132.\Delta T_{max}^{-1,823}$	0,81	0,049	-2,36
A180 T_{cum}	EXP	$\theta = 7,673.\exp(-0,023.T_{cum})$	0,89	0,037	-0,40
	LIN	$\theta = -0,003.T_{cum} + 0,758$	0,78	0,051	-0,22
	POL2	$\theta = 3,9.E-5.T_{cum}^2 - 0,017.T_{cum} + 1,94$	0,89	0,037	0,36
	POT	$\theta = 1,4.E+7.T_{cum}^{-3,59}$	0,88	0,038	-1,18
A180 ΔT_{max}	EXP	$\theta = 2,058.\exp(-1,246.\Delta T_{max})$	0,90	0,035	-2,55
	LIN	$\theta = -0,233.\Delta T_{max} + 0,662$	0,91	0,034	-0,11
	POL2	$\theta = 0,083.\Delta T_{max}^2 - 0,586.\Delta T_{max} + 1,026$	0,95	0,027	-0,29
	POT	$\theta = 0,705.\Delta T_{max}^{-2,127}$	0,84	0,045	-2,98

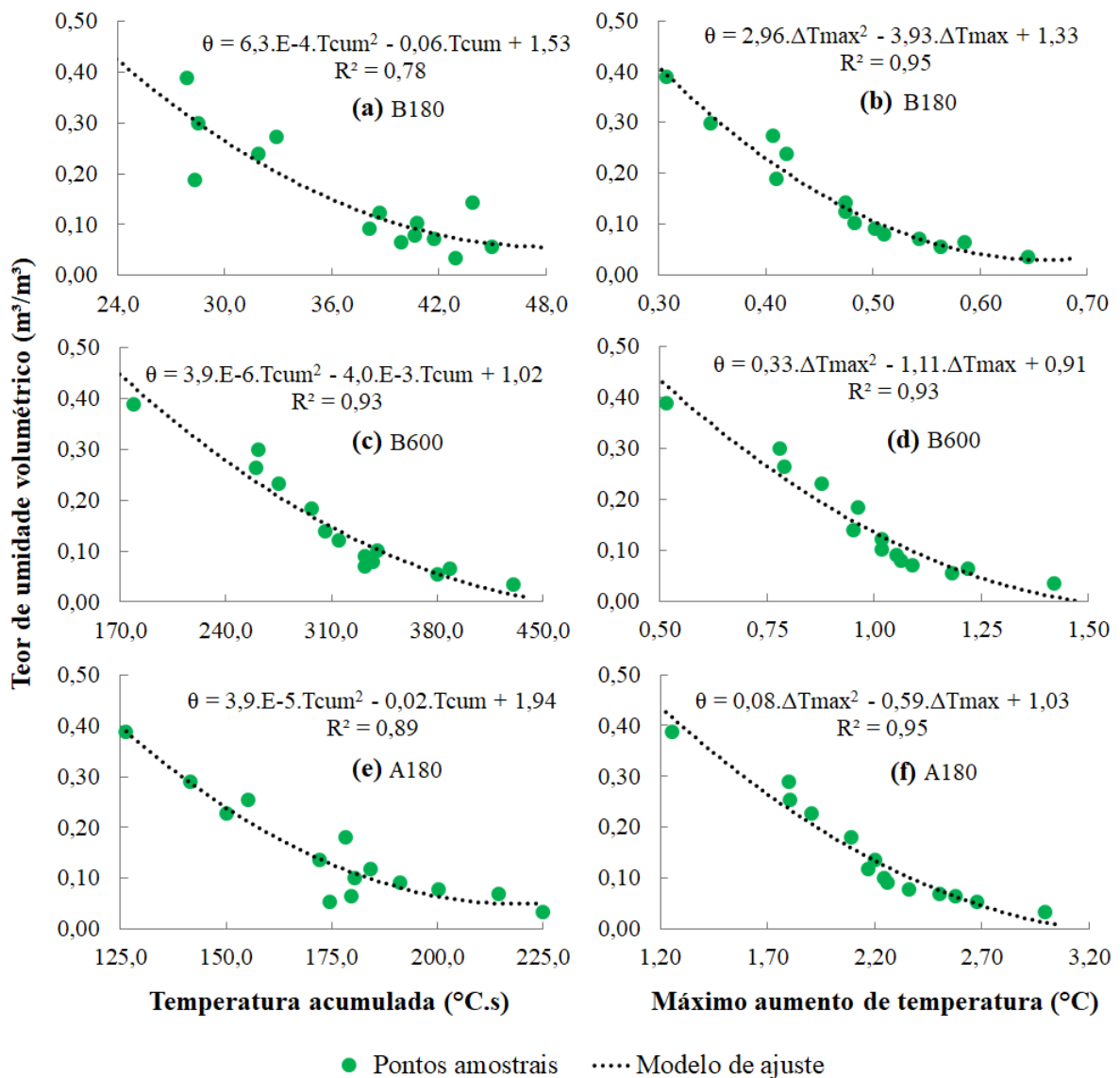
^a é o modelo exponencial; ^b é o modelo linear; ^c é o modelo polinomial de 2º grau; ^d é o modelo de potência.

Fonte: autor (2023).

Portanto, com exceção da B180 - T_{cum} (SPHP-DTS), os dados estimados de θ a partir do modelo de 2º grau apresentaram o melhor ajuste do modelo de regressão, a menor raiz do erro quadrático médio e um viés muito próximo de zero em relação aos dados observados pelos sensores de umidade, para ambas SPHP-DTS e DPHP-DTS. Nesse sentido, a literatura reporta o uso de diferentes modelos na construção de curvas que relacionam θ com T_{cum} ou ΔT_{max} . Ao utilizarem cabos de FO revestidos com armadura metálica, Gamage, Biswas e Strachan (2018) e Zubelzu et al. (2019) aplicaram funções exponenciais para relacionar θ com T_{cum} .

Esse mesmo método foi aplicado por Lagos et al. (2020), que correlacionaram suas medições de temperatura ao θ por meio de um modelo de potência. Além disso, a relação de θ com ΔT_{max} foi adequadamente descrita com um modelo bi exponencial por Striegl e Loheide II (2012) em uma aplicação da abordagem SPHP-DTS.

Figura 28 – Modelos de calibração ajustados aos dados observados de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem DPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Conforme apresentado na revisão bibliográfica (tópico 3.4.2), as pesquisas que envolvem a abordagem DPHP-DTS utilizam modelos consolidados do método HP para

investigar a relação das propriedades térmicas do solo com θ . No entanto, a realização de uma calibração específica em aplicações de ambas as abordagens permanece válida, especialmente porque isso permite que os modelos englobem indiretamente aspectos próprios de cada situação, como as propriedades do sistema FO-DTS empregado, a textura do solo, suas propriedades térmicas (e.g., C e λ) e físicas (e.g., ρ_b e e), dentre outros (BENÍTEZ-BUELGA et al., 2014; YAO et al., 2022).

5.4.2 Comportamento dos pontos amostrais e dos modelos de calibração

Ao observar os pontos amostrais das Figura 27 e 28, percebe-se que, apesar dos valores absolutos de T_{cum} e ΔT_{max} serem diferentes para os diferentes pulsos de calor aplicados em cada experimento, as curvas de calibração revelam comportamentos semelhantes desses pontos. É possível notar a existência de uma relação inversamente proporcional entre θ e os valores de T_{cum} e ΔT_{max} encontrados em cada cenário de aquecimento. Além disso, essas figuras exibem nitidamente que essa relação não é linear, o que também embasa os resultados apresentados no tópico 5.4.1, em que o ajuste do modelo linear aos pontos amostrais apresentou o pior desempenho nas métricas R^2 e $RMSE$.

Essa relação inversamente proporcional não linear entre θ e T_{cum} ou ΔT_{max} tem sido amplamente reportada na literatura, tanto para a abordagem SPHP-DTS (GAMAGE et al., 2021; GIL-RODRÍGUEZ et al., 2013; SOURBEER; LOHEIDE II, 2015) quanto para a DPHP-DTS (SHEHATA et al., 2020; SHEHATA; HEITMAN; SAYDE, 2022). Além disso, ao analisar o modelo ajustado para cada caso, nota-se que a inclinação da curva de calibração é ligeiramente maior para maiores valores de θ , sugerindo que a sensibilidade de ambos T_{cum} e ΔT_{max} diminui à medida que θ aumenta, o que também foi encontrado por outras pesquisas (GAMAGE; BISWAS; STRACHAN, 2019; SAYDE et al., 2014).

Esse comportamento ocorre porque, quando a água está em quantidade suficiente no solo para funcionar como uma ponte que une as partículas sólidas, os valores de λ do meio poroso passam a variar pouco em função de θ . Assim, mesmo que o volume de água do solo aumente, a resposta térmica do solo a esse aumento de θ passa a ser menos expressiva, o que se reflete na redução da sensibilidade observada nos métodos T_{cum} e ΔT_{max} para solos úmidos.

Ao analisar os valores de T_{cum} e ΔT_{max} computados em cada abordagem, nota-se que, tanto na SPHP-DTS (Figura 27) quanto na DPHP-DTS (Figura 28), a magnitude de T_{cum} e ΔT_{max} foi menor para a aplicação do pulso de calor de baixa potência e curta duração (B180).

Isso é mais facilmente observado nos valores extremos (i.e., mínimos e máximos do eixo das abscissas) de cada método de análise de temperatura, de cada uma das estratégias de aquecimento aplicadas. O aumento da duração do aquecimento (B600) e da intensidade da potência aplicada (A180) a partir da estratégia B180 elevou a magnitude de T_{cum} e ΔT_{max} . Nesse último método, o aumento dos valores extremos foi mais expressivo na estratégia A180 do que na B600, em ambas as abordagens.

Por outro lado, os valores de T_{cum} foram semelhantes nos pulsos de calor de longa duração e de alta potência, especialmente para o experimento SPHP-DTS (Figura 27c e 27e). Em uma aplicação em campo dessa mesma abordagem utilizando cabos de FO revestidos, Dong et al. (2017) encontraram resultados semelhantes. Neste trabalho, a utilização das estratégias B180, B600 e A180 correspondeu à aplicação de 774 J.m^{-1} , 2520 J.m^{-1} e 3870 J.m^{-1} de energia, respectivamente (Tabela 4). A maior proximidade desses dois últimos valores relaciona-se com a similaridade encontrada em T_{cum} para os pulsos de calor em questão, uma vez que esse método é um indicativo da energia não dissipada pelo material aquecedor (DONG et al., 2017).

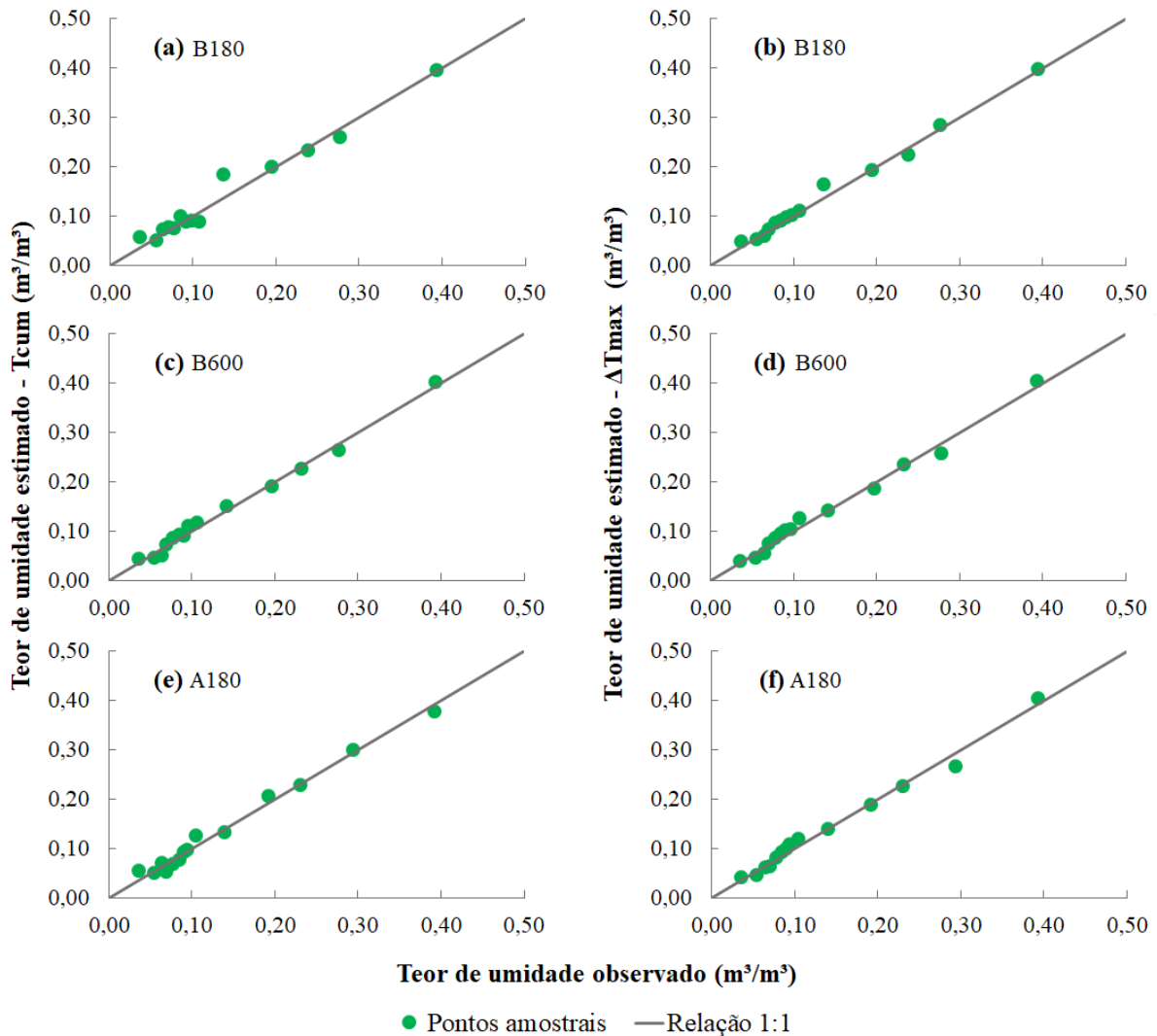
Ao visualizar a magnitude de T_{cum} e ΔT_{max} obtidos em cada abordagem (Figuras 27 e 28), nota-se ainda que, para uma mesma combinação de estratégia de aquecimento com método de análise de temperatura, o experimento SPHP-DTS sempre gerou valores extremos de T_{cum} e ΔT_{max} superiores aos do experimento DPHP-DTS. Apesar das diferenças construtivas e das pequenas distinções de θ de cada experimento, esse é um resultado esperado, uma vez que, na abordagem DPHP-DTS, há distanciamento entre a liga Fe-Cr-Al aquecedora e o cabo de FO sensor de temperatura, enquanto, na SPHP-DTS, os materiais estão em contato.

Ao avaliar a qualidade do ajuste dos modelos de calibração na abordagem SPHP-DTS, observa-se que os valores das métricas R^2 , $RMSE$ e $PBIAS$ foram satisfatórios para todos os cenários de aquecimento (Tabela 5). Para o método T_{cum} , obteve-se um coeficiente de determinação entre os dados observados e estimados de θ de $R^2 \geq 0,97$. Em termos de raiz do erro quadrático médio, os menores valores dessa métrica foram de $0,011 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (A180) e $0,009 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (B600). Para o método ΔT_{max} , todos os cenários de aquecimento apresentaram o mesmo valor de R^2 (0,99) e valores próximos de $RMSE$ (entre $0,010 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e $0,012 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$).

A partir dessas observações, pode-se afirmar que a aplicação tanto de T_{cum} quanto de ΔT_{max} na abordagem SPHP-DTS não resultou em diferenças expressivas em seus respectivos desempenhos estatísticos. Ademais, a qualidade das estimativas de θ pelos modelos de

calibração é indicada pela concentração dos pontos em torno da relação 1:1 na Figura 29, que também representa a baixa magnitude dos valores absolutos de *PBIAS*.

Figura 29 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem SPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Gamage et al. (2021) aplicaram diferentes estratégias para aquecer um solo franco-arenoso, incluindo as combinações 5 W.m^{-1} - 180s e 5 W.m^{-1} - 600 s, que também foram consideradas neste trabalho. Os resultados mostraram que o incremento na duração do pulso de calor de 5 W.m^{-1} elevou o R^2 de 0,69 para 0,91, na aplicação do método T_{cum} . O melhor ajuste do modelo de calibração ($R^2 = 0,96$) foi obtido no pulso de maior potência (20 W.m^{-1} - 180s). De forma similar, Dong et al. (2017) aplicaram os métodos T_{cum} e ΔT_{max} em três estratégias

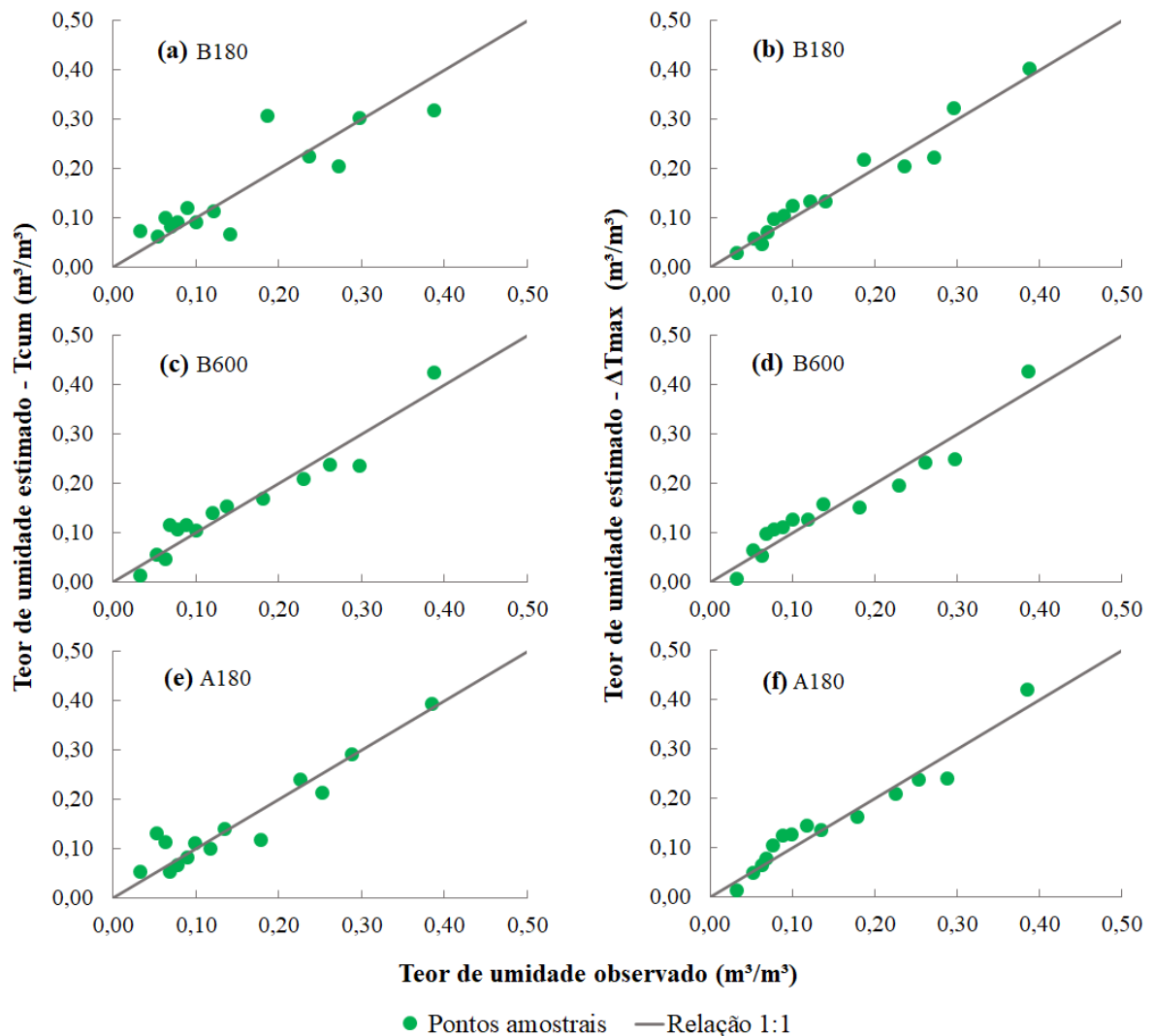
de aquecimento. Independentemente do método, a correlação dos dados de temperatura ao θ indicaram melhor ajuste no pulso de maior potência e curta duração ($R^2 \geq 0,95$), enquanto a pior foi no pulso de menor potência e curta duração ($R^2 = 0,66$).

A partir disso, a literatura reporta que, ainda na etapa de construção das curvas de calibração, as estratégias de aquecimento de baixa potência somente se equiparam as de alta potência quando sua duração for estendida, em termos de qualidade do ajuste de θ às medições de temperatura. No entanto, na aplicação da abordagem SPHP-DTS neste trabalho, os resultados mostraram que os ajustes de θ a T_{cum} e ΔT_{max} foram satisfatórios para todos os cenários, independentemente da potência aplicada e da duração do aquecimento. Isso pode ter sido ocasionado pelas diferenças de execução de cada pesquisa. Enquanto neste trabalho as medições distribuídas de temperatura e o monitoramento de θ foram efetivados em um único plano horizontal de solo, outras pesquisas foram aplicadas em escala de campo (DONG et al., 2017) ou em colunas de solo experimentais (GAMAGE et al., 2021).

Por se tratarem de execuções em maiores proporções, essas últimas apresentam maior complexidade construtiva do que os experimentos aqui concebidos, em tubulações de PVC DEFoFo. Aplicações em nível de perfis verticais de solo e de campo estão sujeitas a maior heterogeneidade do meio poroso, além de envolverem maiores volumes de solo. Além disso, pesquisas em campo que empregam o sistema FO-DTS estão sujeitas a diferentes condições climáticas (i.e., efeito do ciclo diário de temperatura), que podem mascarar informações de umidade do solo (DONG et al., 2017). Por esse motivo, o aquecimento do solo a partir de pulsos de calor curtos e de baixa potência revela-se menos efetivo na predição de θ nesses casos do que nos resultados aqui encontrados. No entanto, essa discussão será retomada no tópico 5.5, que trata da validação dos modelos de calibração concebidos.

Ao analisar os modelos definidos para a abordagem DPHP-DTS, são observadas diferenças mais expressivas nos valores de R^2 e $RMSE$ para T_{cum} , conforme a estratégia de aquecimento utilizada. Nesse método, o ajuste dos modelos aos pontos amostrais foi melhor para as estratégias A180 e B600 ($R^2 \geq 0,89$ e $RMSE \leq 0,037 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), com pequena superioridade dessa última. Os valores obtidos de $PBIAS$ foram muito próximos para as três aplicações do método T_{cum} (entre 0,32 e 0,47%). Apesar disso, o modelo da estratégia B180 exibiu o pior desempenho em termos de ajuste do modelo de regressão ($R^2 = 0,78$) e de erro associado às estimativas ($RMSE = 0,053 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), o que pode ser visualizado na Figura 30a, em que há maior dispersão dos pontos amostrais em torno da relação 1:1.

Figura 30 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem DPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Por outro lado, quando o método ΔT_{max} foi empregado, as estimativas de θ indicaram desempenho semelhante das três estratégias de aquecimento, com $R^2 \geq 0,93$ e $RMSE$ entre $0,025 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e $0,031 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Assim, pode-se afirmar que, de forma geral, o método ΔT_{max} levou às melhores estimativas de θ pelos modelos de calibração do experimento DPHP-DTS. Entre os dois métodos de análise de temperatura, as diferenças nas métricas R^2 e $RMSE$ foram maiores na B180. O cálculo de T_{cum} envolve a integração do aumento de temperatura que ocorre durante todo o pulso de calor. Porém, conforme discutido no tópico 5.3, os instantes iniciais do aquecimento são pouco relacionados ao θ . Por causa disso, e considerando o distanciamento entre a liga Fe-Cr-Al e o cabo de FO e a menor entrega de energia da estratégia

B180, a relação entre ΔT e θ é fortemente evidenciada nos instantes finais do aquecimento, tornando o método ΔT_{max} mais efetivo do que o T_{cum} , para o cenário de baixa potência e curta duração.

Aplicações da abordagem DPHP-DTS usualmente buscam utilizar pulsos de calor configurados com valores de potência mais elevados (i.e., SHEHATA et al., 2020; YAO et al., 2022). Essa estratégia garante que o incremento de temperatura gerado pelo cabo aquecedor tenha magnitude suficiente para ser detectado no cabo óptico sensor de temperatura, separado por uma distância de solo do emissor de calor. Além disso, a calibração de um modelo específico que relacione θ e diferentes métodos de temperatura não é reportada pela literatura na execução da abordagem DPHP-DTS (ver tópico 3.4.2). Pelo contrário, o uso de modelos analíticos e semianalíticos originários do método HP é avaliado, uma vez que permitem estimar propriedades térmicas do solo para diferentes condições de θ .

No entanto, é possível estabelecer um paralelo entre as aplicações desses modelos consolidados com as da calibração individual conduzida neste trabalho. Essa avaliação será feita no tópico 5.5, que trata da validação das curvas de calibração aqui apresentadas. Por fim, ao confrontar os resultados encontrados na abordagem SPHP-DTS com os da DPHP-DTS, as métricas estatísticas indicam um melhor desempenho dos modelos de calibração no experimento onde há contato entre a liga Fe-Cr-Al e o cabo óptico, em todas as seis combinações de cenário de aquecimento e método de temperatura. Porém, salvo as exceções discutidas anteriormente, ambas as abordagens permitiram estabelecer relações entre θ e os métodos T_{cum} e ΔT_{max} .

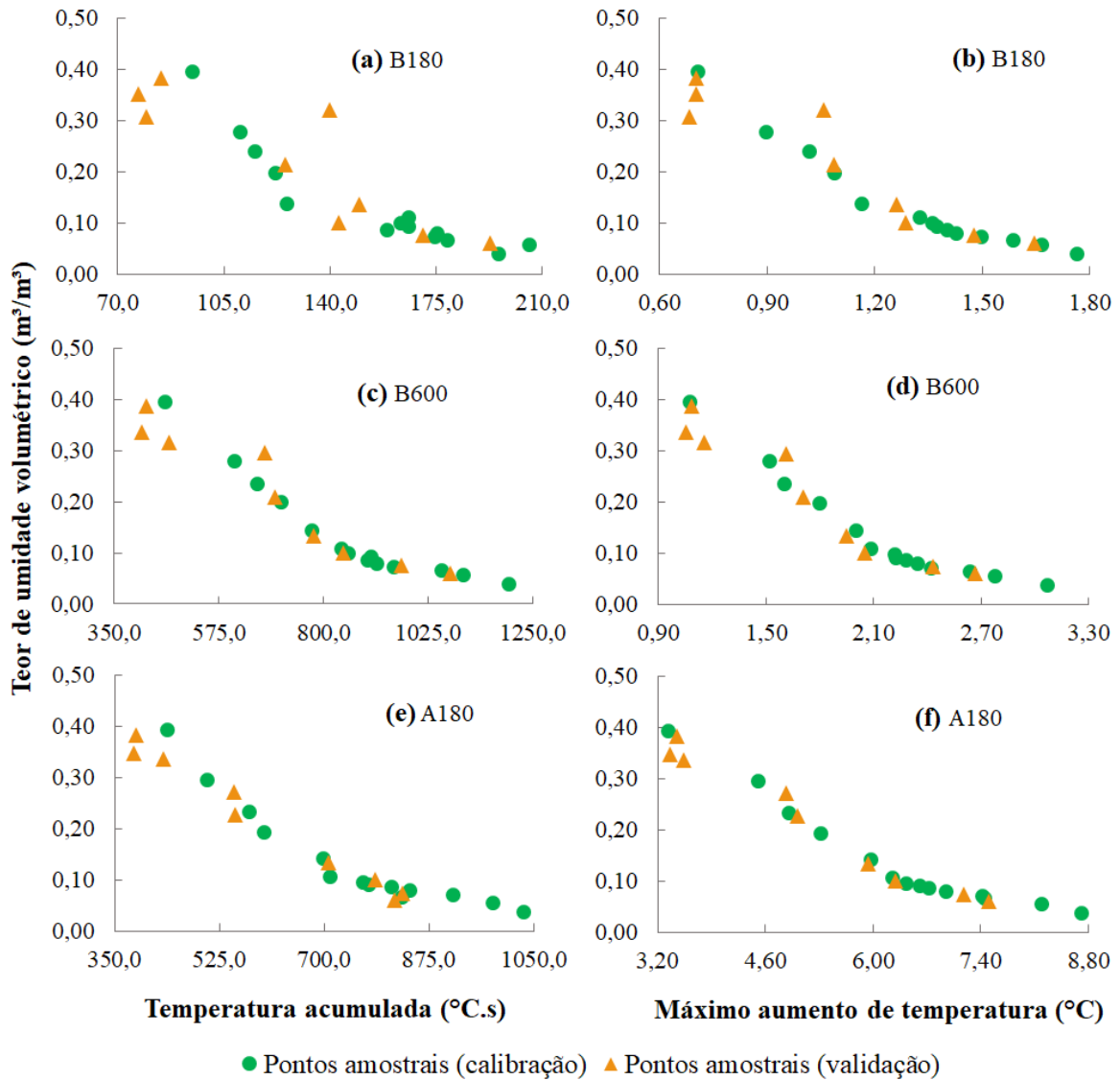
5.5 Validação das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max}

5.5.1 Comportamento dos pontos amostrais e dos modelos de calibração

Durante a etapa de validação das curvas de calibração previamente definidas, a relação inversamente proporcional entre T_{cum} e ΔT_{max} com θ se manteve. De forma geral, em ambas as abordagens, os novos valores de T_{cum} e ΔT_{max} ficaram contidos dentro ou muito próximos do intervalo de mínimos e máximos de cada método que havia sido computado na etapa de calibração, o que pode ser visualizado nas Figuras 31 e 32 para as abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS, respectivamente. Exceções foram encontradas, por exemplo, nas estratégias de aquecimento para o método T_{cum} nas duas abordagens (Figura 31a, c, e; Figura 32a, c, e), e também na B180 - ΔT_{max} na DPHP-DTS (Figura 32b). Em todos esses casos, pode-se notar

que pelo menos um valor (i.e., o valor mínimo) de T_{cum} ou ΔT_{max} obtido na validação foi inferior ao valor mínimo calculado na calibração.

Figura 31 – Relação entre os dados observados de θ e T_{cum} e ΔT_{max} obtidos nas etapas de calibração e validação na abordagem SPHP-DTS

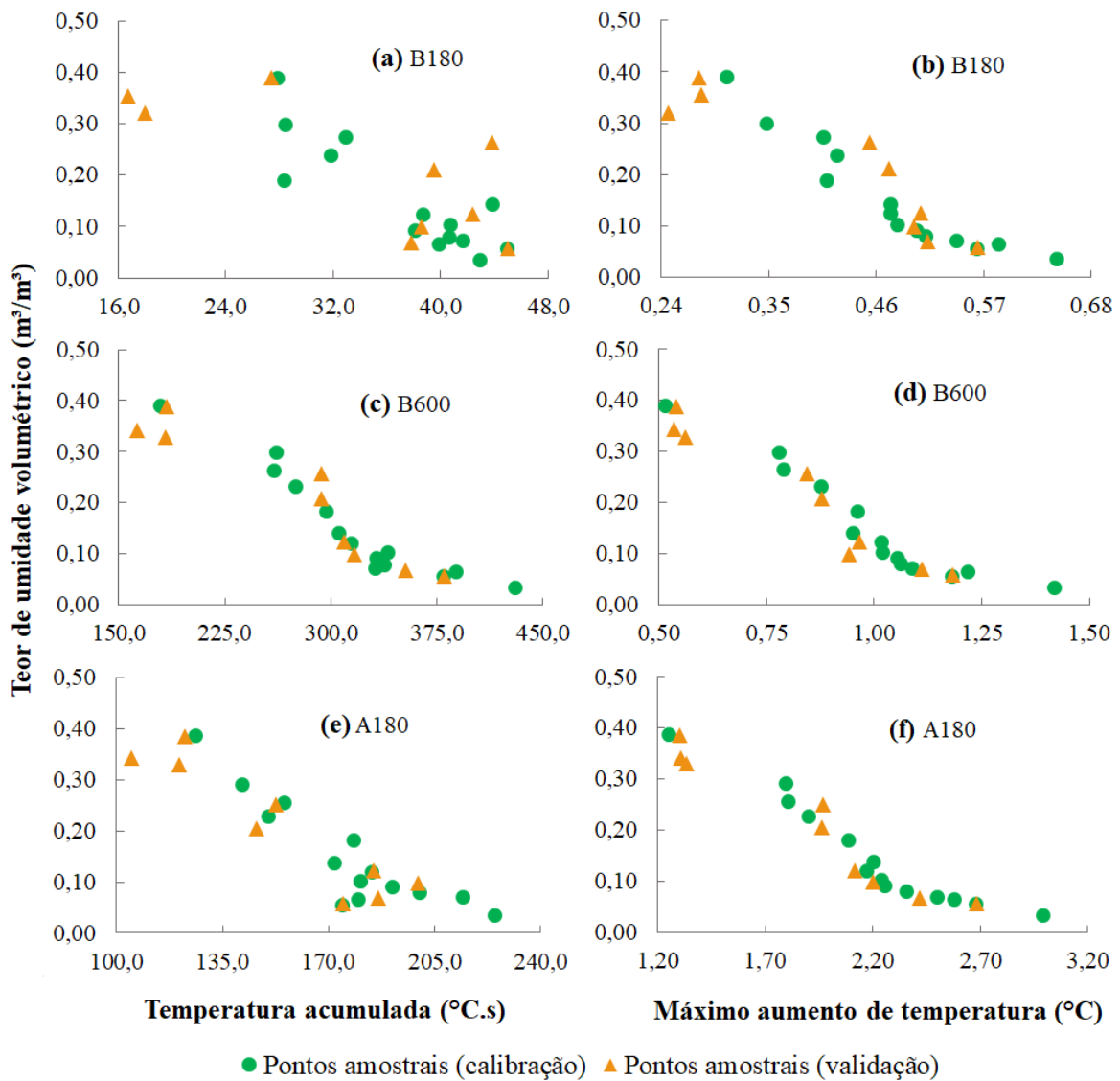


Fonte: autor (2023).

Discrepâncias no comportamento térmico do solo monitorado pela medição distribuída de temperatura nas etapas de calibração e validação foram visualizadas por motivos distintos. Dentre eles, pode-se reforçar as pequenas diferenças nos valores de θ obtidos pelos sensores de umidade em cada etapa, conforme apresentado na Figura 25 (tópico 5.1.2). Além disso, o novo umedecimento do solo executado na validação pode ter consolidado e/ou criado caminhos

preferenciais da água, modificando a distribuição dos minerais no solo e alterando propriedades físicas do meio poroso, como ρ_b e e . Apesar disso, os valores de T_{cum} e ΔT_{max} obtidos na validação, e que se encontraram tanto dentro quanto fora do intervalo de valores extremos previamente calculados na calibração, foram numericamente próximos aos dessa última etapa (Figuras 31 e 32). Ainda assim, a discussão acerca da capacidade de repetibilidade da metodologia utilizada será retomada nos próximos parágrafos, no contexto das estimativas de θ pelos modelos de calibração durante e etapa de validação.

Figura 32 – Relação entre os dados observados de θ e T_{cum} e ΔT_{max} obtidos nas etapas de calibração e validação na abordagem DPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Ao analisar os resultados encontrados durante a etapa de validação do método T_{cum} no experimento SPHP-DTS (Tabela 7), observa-se que o melhor desempenho, em termos de ajuste do modelo de regressão e de raiz do erro quadrático, foi obtido na aplicação da estratégia A180 ($R^2 = 0,97$ e $RMSE = 0,041 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Ainda assim, a estratégia B600 também apresentou desempenho satisfatório nas duas métricas citadas ($R^2 = 0,89$ e $RMSE = 0,053 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), e em $PBIAS$, que foi a mais próxima de zero para o método T_{cum} (- 8,83 %). Já o modelo de calibração da B180 teve um desempenho inferior aos demais, ao exibir $R^2 = 0,64$, $RMSE = 0,160 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e $PBIAS = -31,61\%$, indicando forte superestimativa de θ pelos modelos.

Tabela 7 – Métricas estatísticas obtidas durante a validação das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem SPHP-DTS

Método	R^2	$RMSE (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	$PBIAS (\%)$
B180 - T_{cum}	0,64	0,160	-31,61
B180 - ΔT_{max}	0,84	0,050	-1,82
B600 - T_{cum}	0,89	0,053	-8,83
B600 - ΔT_{max}	0,92	0,037	-6,22
A180 - T_{cum}	0,97	0,041	-10,68
A180 - ΔT_{max}	0,96	0,025	-3,41

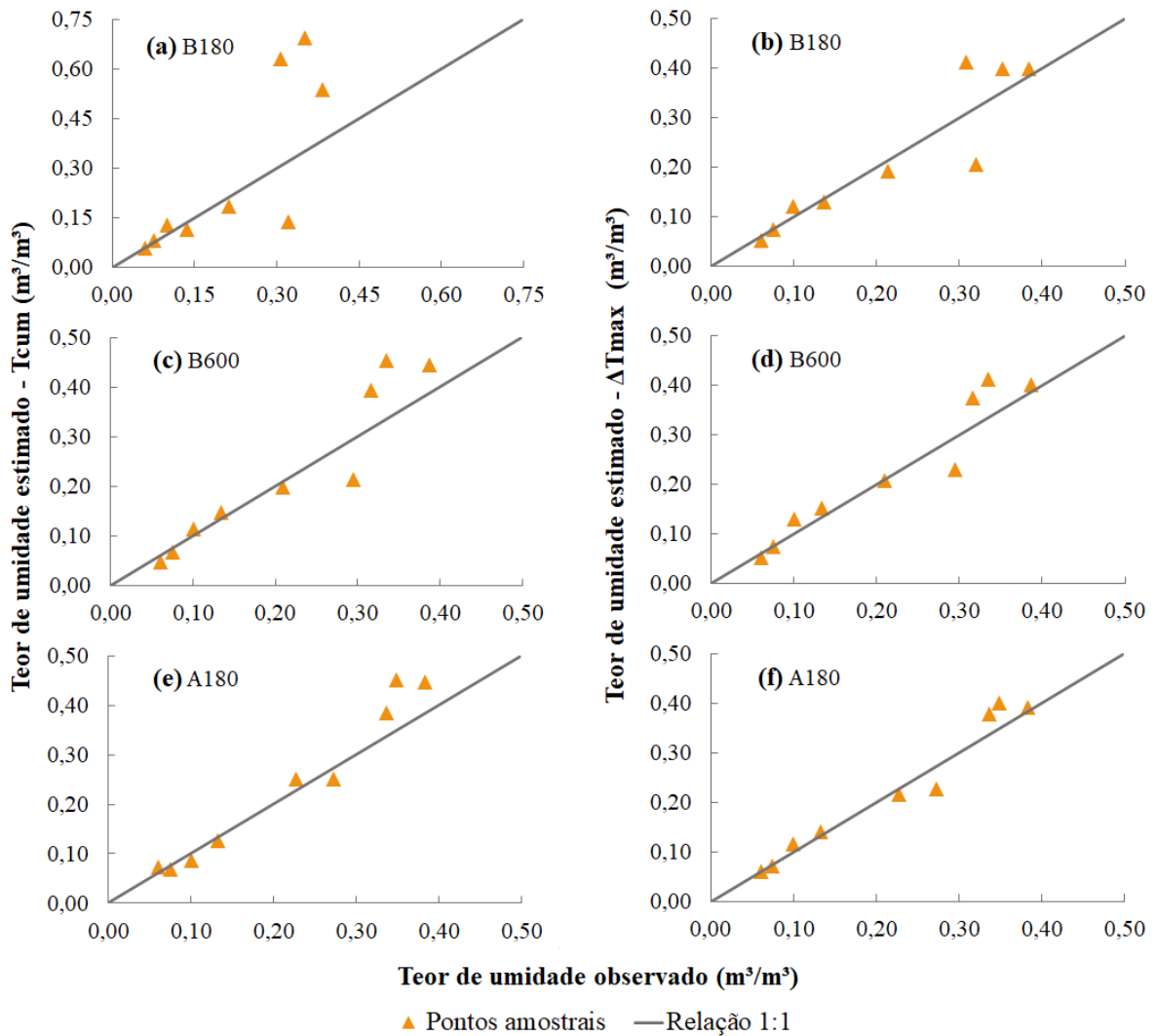
Fonte: autor (2023).

Com a aplicação do método ΔT_{max} , o mesmo comportamento foi observado, com a melhor performance estatística apresentada pela estratégia A180 ($R^2 = 0,96$; $RMSE = 0,025 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; e $PBIAS = -3,41 \%$), seguida da B600 ($R^2 = 0,92$; $RMSE = 0,037 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; e $PBIAS = -6,22 \%$). O pulso de calor de baixa potência e curta duração, por sua vez, levou ao pior, mas ainda adequado desempenho do modelo de calibração ($R^2 = 0,84$; $RMSE = 0,050 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; e $PBIAS = -1,82 \%$). A Figura 33 apresenta a relação entre os valores estimados e observados de θ , para a etapa de validação.

Ao comparar a aplicação dos diferentes métodos de análise de temperatura nas estratégias B600 e A180, a Tabela 7 mostra superioridade de ΔT_{max} sobre T_{cum} , especialmente em função dos seus menores valores de $RMSE$. Porém, os resultados permitem afirmar que a aplicação tanto de T_{cum} quanto de ΔT_{max} nas estratégias B600 e A180 levou a desempenhos satisfatórios dos modelos de calibração. Nesse aspecto, Dong et al. (2017) observaram que a utilização desses dois métodos em pulsos de maior potência ($9,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} - 300 \text{ s}$) e maior duração ($4,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} - 600 \text{ s}$) também não gerou diferenças nas predições de θ por cada um. O mesmo

também foi concluído pelos autores na aplicação de um aquecimento de baixa potência e menor duração (i.e., $4,6 \text{ W.m}^{-1} - 300 \text{ s}$). No entanto, com a execução da abordagem SPHP-DTS neste trabalho, diferenças mais expressivas em R^2 , $RMSE$ e $PBIAS$ foram encontradas ao aplicar o pulso B180, em que o método ΔT_{max} foi mais efetivo na estimativa de θ .

Figura 33 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a validação das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem SPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Ainda com relação à estratégia B180, a Figura 33 mostra que seu pior desempenho nas estimativas de θ se deve, principalmente, aos pontos amostrais com dados observados de θ acima de $0,30 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (i.e., $\theta \geq 0,30 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) (Figuras 33a e 33b). Esse mesmo comportamento pode ser observado, ainda que de forma mais suave, na aplicação de B600 e A180, em que a

dispersão dos pontos em torno da reta de relação 1:1 é maior para maiores valores de θ (Figuras 33c até 33f). Esses resultados indicam que, ao aplicar a abordagem SPHP-DTS, o erro nas estimativas de θ por modelos de calibração aumenta à medida que θ aumenta. Demais aplicações dessa abordagem também identificaram esse comportamento do método AHFO (GAMAGE; BISWAS; STRACHAN, 2018; LAGOS et al., 2020; SAYDE et al., 2014).

Apesar dos resultados apresentados, futuras pesquisas que utilizem a liga Fe-Cr-Al como material aquecedor devem buscar coletar dados amostrais mais numerosos durante a etapa de validação, especialmente para $\theta \geq 0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Com isso, será possível investigar o comportamento das previsões de θ de forma mais contínua em todo o domínio de valores.

Na etapa de validação da abordagem DPHP-DTS, as estimativas dos modelos de calibração do método T_{cum} nas estratégias B600 e A180 apresentaram graus de correlação com os dados observados próximos entre si (Tabela 8). Porém, a B600 claramente sobressaiu-se à A180 nas demais métricas, uma vez que essa última exibiu $RMSE = 0,081 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e $PBIAS = -23,28 \%$, enquanto a primeira exibiu $RMSE = 0,055 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e $PBIAS = -10,06 \%$.

Tabela 8 – Métricas estatísticas obtidas durante a validação das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem DPHP-DTS

Método	R^2	$RMSE \text{ (m}^3 \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$	$PBIAS \text{ (\%)}$
B180 - T_{cum}	0,54	0,155	-15,76
B180 - ΔT_{max}	0,79	0,086	-11,62
B600 - T_{cum}	0,86	0,055	-10,06
B600 - ΔT_{max}	0,92	0,039	-10,69
A180 - T_{cum}	0,85	0,081	-23,28
A180 - ΔT_{max}	0,93	0,036	-7,77

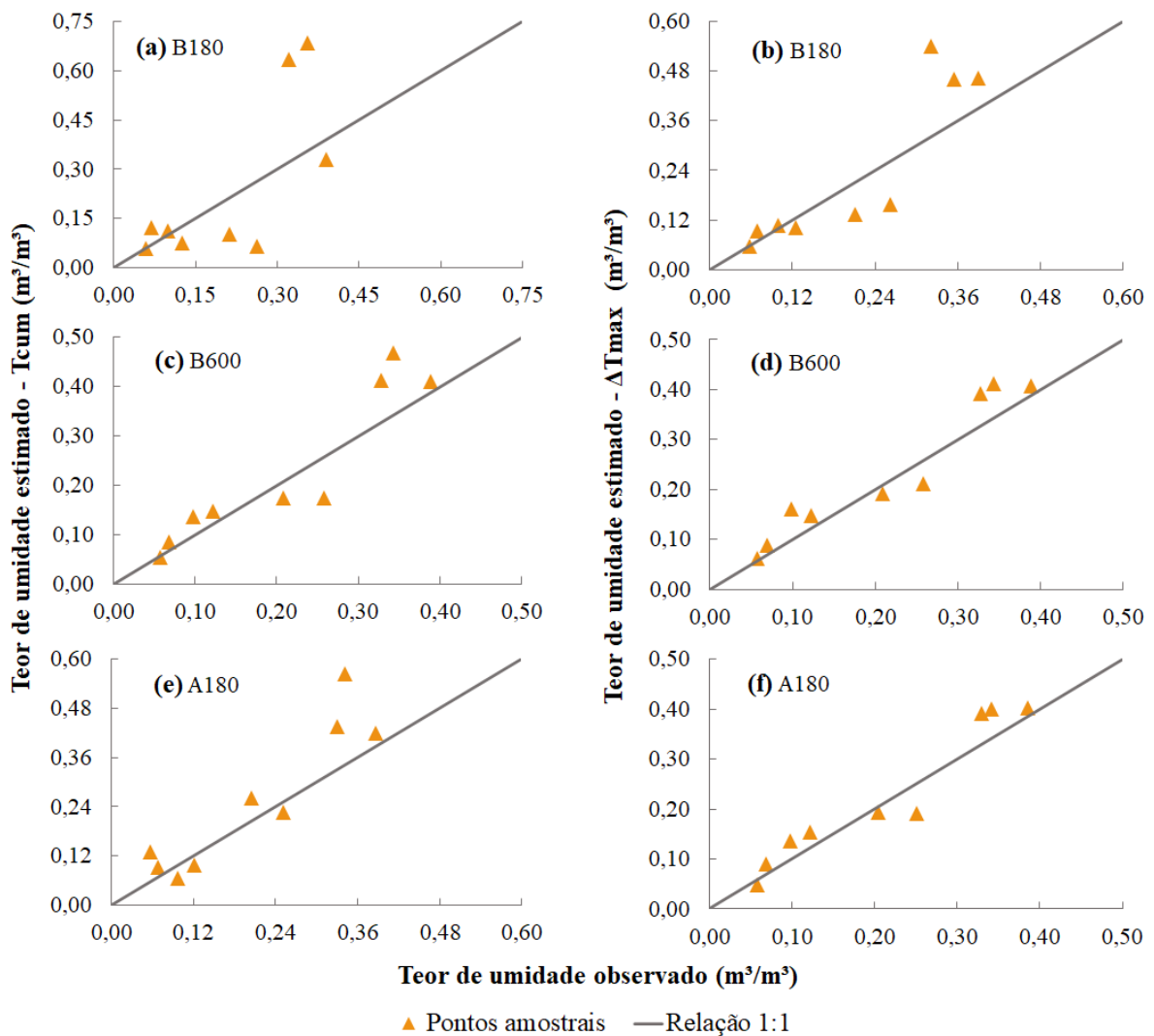
Fonte: autor (2023).

A Figura 34 exibe a relação entre as estimativas e observações de θ . Ademais, pode-se notar também que os pulsos de calor de curta duração apresentaram os valores de $PBIAS$ mais distantes de zero para o método T_{cum} ($PBIAS \leq -15,76 \%$), indicando maior superestimativa de θ nessas aplicações. Nesse aspecto, o pulso de alta potência teve a menor $PBIAS$ (-23,28 %), uma vez que a dispersão dos pontos na combinação A180- T_{cum} ocorre principalmente acima da reta de relação 1:1 (Figura 34e), enquanto na B180- T_{cum} a dispersão é vista tanto acima quanto abaixo da reta 1:1 (Figura 34a). Em função disso, a $PBIAS$ é menor para essa última combinação (-15,76 %), mas que, por outro lado, apresentou R^2 igual a 0,54 e $RMSE$ de 0,155

$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, representando a baixa correlação entre dados observados e estimados de θ , e o alto erro associado às estimativas.

A validação dos modelos de calibração do método ΔT_{max} indicou melhor desempenho com o uso das estratégias B600 e A180, que apresentaram semelhanças nas três métricas estatísticas, principalmente para $R^2 (\geq 0,92)$ e $RMSE (\leq 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$. A estratégia B180 exibiu o desempenho menos eficaz dentre as três aplicações de ΔT_{max} ($R^2 = 0,79$; $RMSE = 0,086 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; e $PBIAS = -11,62 \%$). Portanto, o novo umedecimento do solo no experimento de abordagem DPHP-DTS mostrou que o método ΔT_{max} teve maior acurácia nas estimativas de θ do que o T_{cum} , independentemente da configuração de aquecimento utilizada.

Figura 34 – Relação entre os valores estimados e observados de θ , obtidos durante a validação das curvas de calibração de θ em função de T_{cum} e ΔT_{max} na abordagem DPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Apesar desses resultados, para ambas as aplicações da estratégia B180, as Figuras 34a e 34b mostram que seu pior desempenho nas previsões de θ ocorreram, principalmente, em função dos pontos amostrais com dados observados de θ acima de $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (i.e., $\theta \geq 0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Conforme discutido anteriormente, a quantidade de pontos amostrais utilizados para validar os modelos de calibração deste trabalho foi restrita. Futuras pesquisas devem aumentar o número de observações buscando validar os modelos de forma mais abrangente.

O aumento de observações também deve permitir melhor compreensão do uso de ΔT_{max} e T_{cum} na abordagem DPHP-DTS, principalmente considerando que a sua aplicação na literatura é essencialmente reportada por meio do uso de modelos consolidados do método HP para estimar θ a partir das propriedades térmicas do solo. Nesse aspecto, Benítez-Buelga et al. (2014) usaram um modelo analítico para calcular C , e, posteriormente, relacioná-lo com θ . Os resultados encontrados indicaram maiores erros nas estimativas à medida que θ diminui.

Shehata et al. (2020) seguiram o mesmo procedimento de cálculo, mas aplicaram o modelo semianalítico de Knight et al. (2012) para computar C . Nesse caso, a correlação entre estimativas e observações de θ foi satisfatória para um pulso de calor configurado com $30,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ de potência e 120 s de duração. Outros trabalhos também apontam a efetividade de diferentes modelos nas estimativas de propriedades térmicas do solo e suas correlações com θ (e.g., YAO et al., 2022), usando medições de um sistema FO-DTS.

Nesse contexto, algumas observações gerais podem ser feitas a respeito dos resultados obtidos em ambos os experimentos. A iniciar pela avaliação feita nos parágrafos anteriores acerca dos valores de R^2 , $RMSE$ e $PBIAS$ obtidos na etapa de validação, que indicam que a abordagem SPHP-DTS exibiu melhor desempenho estatístico do que a DPHP-DTS, em todas as estratégias de aquecimento e em ambos ΔT_{max} e T_{cum} , com exceção apenas da B180 - T_{cum} .

Conforme encontrado com a aplicação da abordagem DPHP-DTS neste trabalho, foi possível estabelecer e validar relações entre θ e os métodos ΔT_{max} e T_{cum} por meio da execução de uma calibração específica e individual para as condições do experimento em questão. Naturalmente, os resultados indicaram que o sucesso dessa aplicação depende do uso de estratégias de aquecimento adequadas, e da definição apropriada do método de análise de temperatura distribuída empregado. Porém, o fato de a abordagem SPHP-DTS gerar resultados mais efetivos do que a DPHP-DTS na maioria das aplicações é um indicativo de que a aplicação dessa última em futuros trabalhos deve ser direcionada, de fato, para o uso de modelos do método HP buscando estimar diretamente as propriedades térmicas do solo.

Como os resultados apresentados indicaram, a aplicação da combinação B180 - T_{cum} na etapa de validação gerou o pior desempenho das curvas de calibração em ambas as abordagens, sendo, portanto, a combinação menos indicada entre estratégia de aquecimento e método de análise de temperatura. Nesse aspecto, os dados apresentados nas Tabelas 7 e 8 ainda mostram que a estratégia de aquecimento B180 gerou as piores estimativas de θ , especialmente em função dos valores de R^2 e $RMSE$ obtidos, independentemente do método aplicado. De fato, pulsos curtos de baixa potência usualmente não são recomendados pela literatura, tanto na abordagem SPHP-DTS (GAMAGE et al., 2021) quanto nas aplicações típicas da DPHP-DTS (APPERL; BERNHARDT; SCHULZ, 2019).

Porém, ao estender a duração do pulso de baixa potência, isto é, ao partir da estratégia B180 para a B600, a performance dos modelos durante a etapa de validação melhorou consideravelmente. Nesse caso, a aplicação do pulso de calor B600 apresentou desempenho estatístico próximo ou até mesmo superior (e.g., B600 - T_{cum} na DPHP-DTS) ao do pulso de alta potência (A180). Esses resultados indicam que ambas as configurações geram resultados equivalentes em termos de estimativa de θ a partir dos modelos de calibração.

Na prática, o uso da estratégia B600 ao invés da A180 implicou numa redução da tensão total (dimensionada) requerida para gerar o aquecimento de 28,0 V para 12,2 V (Tabela 4), e em uma redução da energia aplicada à liga Fe-Cr-Al de 3870 J.m⁻¹ (A180) para 2520 J.m⁻¹ (B600). Nesse sentido, os resultados encontrados fornecem embasamento para situações em que a disponibilidade de energia pode ser um fator limitante, como é o caso de aplicações em campo.

Em termos da aplicação B180, conforme discutido no tópico 5.4.2, o cálculo de T_{cum} incorpora todo o intervalo de ocorrência do pulso de calor, incluindo-se, portanto, instantes de tempo pouco dependentes de θ (i.e., momentos iniciais do aquecimento) e instantes fortemente relacionados ao θ (i.e., momentos tardios do aquecimento). Além disso, a etapa de validação executada neste trabalho ainda conta com eventuais modificações da estrutura do solo, ocasionadas pelo seu novo umedecimento.

Assim, essas alterações não previstas nos modelos, associadas à baixa energia fornecida à liga Fe-Cr-Al, se sobrepuseram à relação entre θ e T_{cum} estabelecida na calibração. Consequentemente, a qualidade das estimativas obtidas com a combinação B180 - T_{cum} diminuiu. Por outro lado, ao envolver apenas o ΔT que ocorre nos instantes finais do pulso de

calor, a B180 - ΔT_{max} foi menos sensível a essas modificações, ainda que essa combinação tenha exibido estimativas mais ineficazes do que B600 - ΔT_{max} e A180 - ΔT_{max} .

Ainda assim, os resultados encontrados exibiram certa inabilidade, em maior ou menor grau, dos modelos de calibração em estimar θ após o novo umedecimento do solo. Essa constatação sugere que a relação entre θ e T_{cum} ou ΔT_{max} pode exibir um comportamento não estacionário, i.e., a resposta térmica do solo monitorada pelo sistema FO-DTS exibe um comportamento de histerese em relação ao θ observado pelos sensores. Por definição, a ocorrência de histerese térmica em solos é fruto de diferentes conteúdos de água presentes nos seus poros para um mesmo potencial mátrico, e é dependente do histórico de umedecimento e de drenagem do solo (FAROUKI, 1981).

Nesse aspecto, quando da aplicação do método AHFO para estimativas de θ , a histerese térmica pode ser associada às diferenças de preenchimento e drenagem dos poros do solo entre uma região próxima do cabo de FO e uma região afastada do cabo, uma vez que a presença do cabo óptico (e da liga Fe-Cr-Al, neste trabalho) afeta a distribuição dos poros no solo, tornando-a diferente da distribuição de outras porções de solo (SOURBEER; LOHEIDE II, 2015).

Sourbeer e Loheide II (2015) avaliaram as dificuldades relacionadas com estimativas de θ em longo prazo (> 3 anos), a partir da aplicação do método ΔT_{max} em escala de campo, usando pulsos de calor de $3,07 \text{ W.m}^{-1}$ de potência e diferentes durações ($t \geq 600 \text{ s}$), aplicados em um cabo de FO emissor de calor e sensor de temperatura (i.e., abordagem SPHP-DTS). Dentre os obstáculos identificados, pode-se destacar a heterogeneidade espacial e a ocorrência de contração e histerese térmica do solo. Essas adversidades foram relacionadas com a resistência de contato térmico entre o solo e cabo de FO, efeito que surge em função do contato imperfeito entre os diferentes sólidos, devido à rugosidade e às diferentes camadas superficiais dos sólidos (WISNIEWSKI; FURMAŃSKI, 2014).

Dessa forma, os resultados encontrados neste trabalho chamam a atenção para a ocorrência de histerese térmica em escala de laboratório, sob condições controladas, e não apenas em nível de campo, conforme apontado por Sourbeer e Loheide II (2015). Nesse aspecto, Wu, Lamontagne-Hallé e McKenzie (2021) reforçam a importância de se buscar um contato adequado entre o cabo de FO e o solo, o que pode ser alcançado pelo fornecimento de um prazo adequado para que a reestruturação do solo após o soterramento do cabo óptico ocorra.

Além disso, o estabelecimento de uma relação entre a resistência de contato e θ pode ser conduzido e, posteriormente, considerada em estimativas de θ a partir das medições AHFO. Ainda assim, a constatação de que essa relação não é exatamente estacionária, associada a outros fatores intrínsecos de cada aplicação (e.g., heterogeneidade espacial), ressalta que outras formas de prevenir os efeitos da histerese térmica devem ser investigadas (SOURBEER; LOHEIDE II, 2015).

Por fim, pode-se apontar que, assim como as curvas de calibração sugeriram (Figura 27 e 28) e da literatura também indicar que a sensibilidade de ΔT_{max} e T_{cum} é menor para maiores θ , esse comportamento também foi identificado na etapa de validação. Os resultados apresentados indicaram que, de forma geral, os erros nas estimativas de θ diminuem à medida que θ diminui, em ambas SPHP-DTS e DPHP-DTS (Figuras 31 e 32). Ademais, para todas as combinações de estratégia de aquecimento com método de análise de dados de temperatura, a métrica *PBIAS* foi negativa (Tabelas 7 e 8). Portanto, pode-se afirmar que, nas condições de aplicação das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS deste trabalho, os modelos de calibração superestimaram os valores de θ em relação aos sensores de umidade SKU:SEN0193, em maior ou menor nível.

Nesse aspecto, futuros trabalhos devem buscar alternativas ao uso direto apenas de T_{cum} e ΔT_{max} , uma vez que esses métodos se baseiam no cálculo de um único parâmetro (os próprios T_{cum} e ΔT_{max}), o que pode não ser suficiente para representar a complexidade de aplicações AHFO, também sugerido por Sourbeer e Loheide II (2015). Além disso, o uso de sensores de umidade comerciais de maior robustez deve assegurar medições mais precisas de θ , especialmente para condições de solo úmido ($\theta \geq 0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

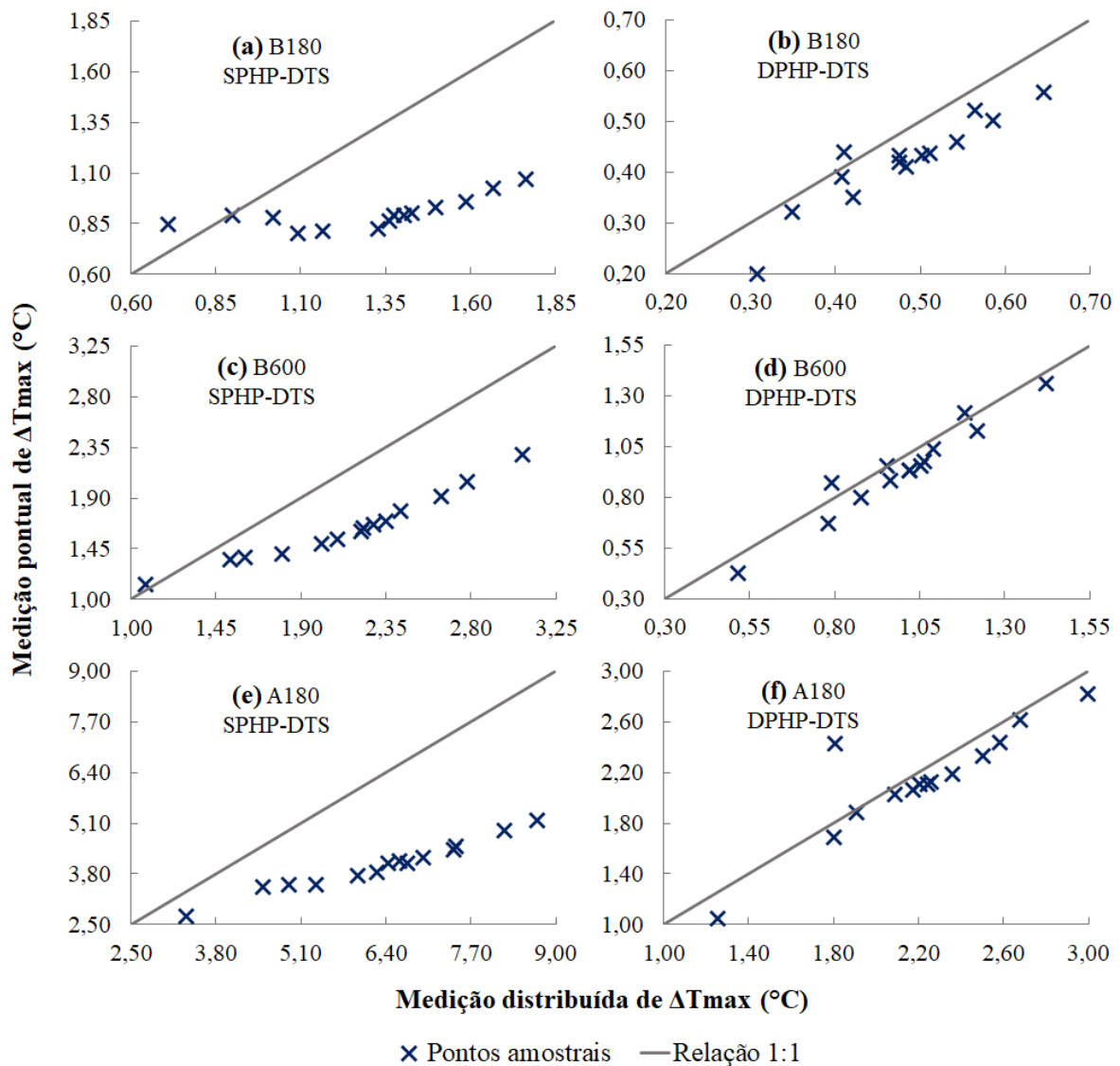
No entanto, a baixa eficácia dos sensores SKU:SEN0193 acima do limite de $\theta \geq 0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ foi reproduzida em todas as etapas deste trabalho. Portanto, caso erros nas observações de θ tenham ocorrido para $\theta \geq 0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, eles foram embutidos nas curvas de calibração e na validação de forma sistemática. Assim, pode-se afirmar que a discussão feita anteriormente acerca da precisão dos modelos de calibração de θ em função de ΔT_{max} e T_{cum} em ambas as abordagens se mantém válida. Ademais, ressalta-se novamente que a acurácia dos sensores em fornecer medidas de θ abaixo do valor de $0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ se manteve.

5.6 Comportamento térmico do cabo de fibra óptica e da liga Fe-Cr-Al

5.6.1 Comparação entre as medições distribuídas e pontuais de temperatura

A Figura 35 apresenta a relação entre as medições pontuais (termopares) e distribuídas de temperatura (sistema FO-DTS), analisada por meio do método de análise de dados ΔT_{max} . Com isso, é possível detalhar as diferenças entre as abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS aplicadas neste trabalho, particularmente no que tange a compreensão do comportamento térmico do cabo de FO.

Figura 35 – Relação entre as medições pontuais e distribuídas de temperatura para os pulsos de calor de diferentes configurações nos experimentos de abordagem SPHP-DTS e DPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Com referência ao plano horizontal de solo onde o cabo de FO foi disposto, os termopares foram posicionados em contato com a parte superior do cabo óptico, em ambos os experimentos. Nesse aspecto, o contato da liga Fe-Cr-Al com as laterais do cabo (abordagem SPHP-DTS) fez com que o revestimento externo de PVC desse último funcionasse como um isolante térmico, absorvendo parte do calor emitido pela liga e minimizando a sua transferência até os termopares. Por causa disso, as medições pontuais detectaram menores valores de ΔT_{max} do que as medições distribuídas, conforme é observado nas Figuras 35a, 35c e 35e, em que a maioria dos pontos amostrais se encontra abaixo da relação 1:1.

A subestimativa de ΔT_{max} pelos termopares foi mais expressiva nos pulsos de calor de curta duração, ao apresentarem *PBIAS* de 45,35 % (B180) e 57,85 % (A180). Os maiores valores de ΔT_{max} medidos tanto pelos termopares quanto pela fibra óptica no pulso de calor de maior potência (Figura 35e) levou à maior absorção de calor (i.e., energia) pelo revestimento de PVC do cabo. Esse comportamento tornou as discrepâncias entre medição pontual e distribuída maiores para essa estratégia de aquecimento, justificando a maior magnitude de *PBIAS* dessa aplicação. O comportamento da abordagem SPHP-DTS aplicada neste trabalho também se reflete na constatação de que, quanto maior foi o ΔT_{max} medido pelo sistema FO-DTS, maior foi sua diferença da medição dessa métrica pelos termopares, independentemente da configuração de aquecimento utilizada.

A estratégia B600 também exibiu uma *PBIAS* alta (31,38 %), mas que foi a menor dentre os três aquecimentos aplicados. A execução de uma baixa potência associada à maior duração do aquecimento (600 s) permitiu que houvesse maior equilíbrio térmico entre as diferentes partes do revestimento do cabo óptico, minimizando as diferenças de ΔT_{max} observadas entre medição pontual e distribuída.

Por outro lado, no experimento DPHP-DTS, tanto o cabo de FO quanto os termopares se encontravam em condições similares de distanciamento da liga Fe-Cr-Al. Valores calculados de *PBIAS* indicaram novamente uma subestimativa das medições pontuais de temperatura, conforme pode ser notado nas Figuras 35b, 35d e 35f. Nesse caso, o posicionamento dos termopares na parte superior do cabo óptico, tendo como referência o plano horizontal, resultou em menores valores de ΔT_{max} computados a partir dos mesmos. Porém, a magnitude de *PBIAS* foi expressivamente menor nessa abordagem, em todas as estratégias de aquecimento.

Essa métrica indicou maior similaridade entre medição pontual e distribuída nos pulsos de calor A180 (3,27 %) e B600 (6,16 %). O maior *PBIAS* foi de 13,59 %, para a estratégia

B180. Esses resultados mostram que a magnitude do viés foi inversamente proporcional à energia entregue para a liga Fe-Cr-Al, isto é, 3870 J.m⁻¹ para A180, 2520 J.m⁻¹ para B600, e 774 J.m⁻¹ para B180. Essa mesma hierarquia é notada nos valores extremos de ΔT_{max} computados pelas medições pontual e distribuída (Figura 35), indicando que a entrega de maior energia na liga permitiu que o aumento de temperatura, expresso em termos de ΔT_{max} , fosse detectado de forma mais uniforme na abordagem DPHP-DTS, o que se refletiu nas menores *PBIAS* entre as diferentes medições de temperatura.

Outros fatores também podem ter contribuído com as diferenças em ΔT_{max} obtidas a partir de cada método de medição. Dentre eles, ressalta-se o funcionamento particular de cada método; enquanto os termopares se baseiam na resposta elétrica ocasionada pela diferença de temperatura entre as junções de referência e de medição, o sistema FO-DTS realiza uma integração das medições distribuídas a partir das frequências de retrodifusão do pulso de laser, e fornece um valor de acordo com as especificações do dispositivo empregado.

No entanto, as discussões dos parágrafos anteriores mostram que as diferenças nos valores de ΔT_{max} foram ocasionadas, majoritariamente, pelos elementos construtivos particulares de cada experimento. Ainda assim, conforme foi apresentado nos tópicos 5.4 e 5.5, isso não impediu o estabelecimento de relações entre θ e diferentes métodos de análise de temperatura utilizados neste trabalho.

5.6.2 Uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al na direção axial

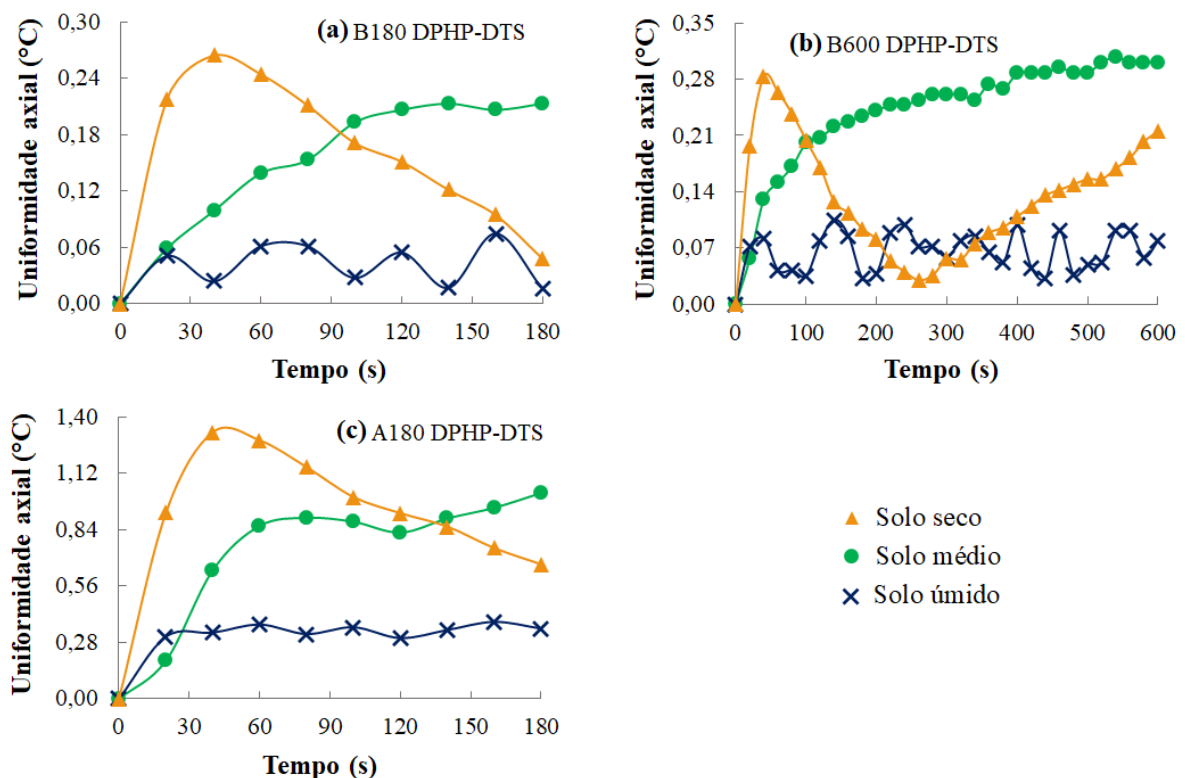
Para avaliar a uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al na direção axial, termopares foram posicionados em contato com a superfície desse material em cada tubo experimental. No entanto, após o umedecimento do solo no experimento de abordagem SPHP-DTS, dois dos quatro termopares em contato com a liga passaram a apresentar problemas de funcionamento. Por causa disso, apenas os dados da abordagem DPHP-DTS foram empregados para calcular valores de U_{axi} , onde os quatro termopares em contato com o aquecedor se mantiveram operando normalmente. Ainda assim, a abordagem DPHP-DTS permite investigar o comportamento térmico da liga Fe-Cr-Al quando circundada unicamente por solo, sem contar com os efeitos do contato entre a liga e o cabo de FO nos dados (tópico 5.6.1).

Dessa maneira, a Figura 36 apresenta os valores de U_{axi} calculados para as diferentes estratégias de aquecimento aplicadas no tubo DPHP-DTS. Assim como no tópico 5.3, três valores de θ foram tomados como representativos de três condições distintas de umidade do

solo: $0,39 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para um solo úmido; $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para um solo seco; e $0,18 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para um solo médio.

Ao analisar cada gráfico separadamente na Figura 36, observa-se que, de forma geral, os valores de U_{axi} são aproximadamente constantes para a condição de solo úmido, durante todo o aquecimento. Além disso, em termos de uniformidade média (\bar{U}_{axi}), menores valores foram obtidos nessa condição de θ do que nas demais (Tabela 9). Tais resultados foram encontrado porque um solo úmido apresenta maiores valores de C , o que dificulta o seu aquecimento. Dessa forma, mudanças de temperatura nessa condição são mais difíceis de ocorrer. Além disso, quando o solo se aproxima da condição de saturação, o meio que circunda o material aquecedor se torna mais homogêneo (i.e., vazios do solo preenchidos majoritariamente por água), resultando em um aquecimento mais uniforme da liga Fe-Cr-Al (menores valores de U_{axi}).

Figura 36 – Uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al na direção axial para os pulsos de calor de diferentes configurações no experimento de abordagem DPHP-DTS



Fonte: autor (2023).

Tabela 9 – Valores extremos e médios de uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al para diferentes estratégias de aquecimento e condições de umidade do solo

Estratégia de aquecimento	Condição de umidade	Mínimo U_{axi} (°C)	Máximo U_{axi} (°C)	\bar{U}_{axi} (°C)
B180	Úmido	0,02	0,07	0,04
	Médio	0,06	0,21	0,16
	Seco	0,05	0,26	0,17
B600	Úmido	0,03	0,10	0,07
	Médio	0,06	0,31	0,25
	Seco	0,03	0,28	0,13
A180	Úmido	0,30	0,38	0,34
	Médio	0,19	1,02	0,80
	Seco	0,67	1,32	0,99

Fonte: autor (2023).

Para a condição de solo seco, nota-se a ocorrência de um súbito aumento de U_{axi} no início do aquecimento (de 0 a 40 s) para todas as estratégias. Nos pulsos de curta duração, esse pico levou aos maiores valores máximos e médios de U_{axi} (Tabela 9) dentre as três condições de θ analisadas. No entanto, observa-se que a U_{axi} do solo seco passa a diminuir gradativamente à medida que o aquecimento continua. A aplicação do pulso de baixa potência e longa duração permite observar que esse decaimento ocorre até certo instante do aquecimento ($t = 260$ s). A partir daí, ocorre um aumento progressivo nos valores de U_{axi} .

Os picos iniciais ($t \leq 40$ s) de U_{axi} no solo seco podem ser explicados pelo rápido aumento da temperatura do ar, que preenche grande parte dos vazios do meio poroso ($\theta = 0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Já o decaimento que transcorre em U_{axi} é ocasionado pela elevação da temperatura das partículas sólidas e da pequena quantidade de água do solo, tornando o aquecimento gradativamente mais uniforme. Apesar do maior calor específico da água, seu volume ocupado no solo é muito menor do que o volume ocupado pelo ar na condição de solo seco. Por causa disso, o novo aumento de U_{axi} que ocorre no pulso de longa duração ($t > 260$ s) pode ter sido ocasionado pelo equilíbrio térmico alcançado entre a água e o ar. Nesse caso, com a minimização da influência térmica da água, a temperatura dos minerais (maior calor específico) e do ar (menor calor específico) continuam a subir desproporcionalmente, tornando o aquecimento menos uniforme.

Apesar desse comportamento do pulso B600 no solo seco, a aplicação do aquecimento longo permite notar que os valores de U_{axi} da condição de solo seco são iguais ou superados pelos valores da condição média de θ . Nessa última, o incremento da duração na aplicação de

baixa potência levou aos maiores valores de \bar{U}_{axi} (Tabela 9). Ademais, pode-se notar que os valores de U_{axi} também aumentam progressivamente no solo médio nos demais pulsos de calor (Figura 36).

Nessa condição de θ , os vazios do solo são preenchidos em partes por água e em partes por ar. Assim, se por um lado a água no solo sofre pouca variação de temperatura (maior C), por outro, o ar contido no meio poroso permite maiores oscilações de temperatura (menor C). Portanto, à medida que os pulsos transcorrem, o ar passa a sofrer incrementos de temperatura mais expressivos do que a água. Dessa maneira, obtêm-se um meio mais heterogêneo em termos de propriedades térmicas, o que torna o aquecimento da liga Fe-Cr-Al menos uniforme nessa condição de θ .

Ademais, em termos de uniformidade média (Tabela 9), \bar{U}_{axi} é similar entre as estratégias B180 e B600 para um mesmo θ , independentemente da condição dessa última. Já no pulso A180, são observados os valores mais altos de \bar{U}_{axi} dentre as três estratégias aplicadas, em todas as condições de θ . Além disso, a melhor uniformidade obtida para o pulso de alta potência ($\bar{U}_{axi} = 0,34$ °C, para solo úmido) ainda foi menos efetiva do que as demais aplicações de baixa potência ($\bar{U}_{axi} \leq 0,25$ °C). Nesse aspecto, os maiores valores extremos de U_{axi} foram de 0,67 °C (mínimo) e 1,32 °C (máximo) para o solo seco da estratégia A180. Esses resultados sugerem que, para as estratégias de aquecimento aplicadas neste trabalho, a uniformidade do aquecimento da liga Fe-Cr-Al é mais afetada pela intensidade da potência aplicada do que pela condição de θ do meio circundante.

Alguns modelos consolidados do método DPHP utilizam características térmicas da sonda aquecedora para efetuar cálculos de diferentes propriedades térmicas do solo (e.g., KNIGHT et al., 2012). Nesse sentido, os resultados apresentados no parágrafo anterior são particularmente interessantes ao vislumbrar aplicações da abordagem DPHP-DTS, associadamente aos modelos do método HP, usando a liga Fe-Cr-Al como material aquecedor.

Cao et al. (2016) avaliaram a uniformidade do aquecimento de dois tipos diferentes de cabos de FO em uma aplicação do método AHFO (cabos ativos). Um dos cabos possuía o revestimento tradicional dos cabos ativos (i.e., revestimento metálico), enquanto o outro era composto por fibras de carbono. Os resultados encontrados indicaram que o aquecimento dos filamentos metálicos levou a valores de U_{axi} entre 0,7 e 1,8 °C, enquanto o aquecimento das fibras de carbono levou a valores entre 2,8 e 3,8 °C, indicando menor uniformidade desse último. No entanto, essa investigação foi feita com os cabos ópticos expostos ao ar, antes do

soterramento. Nesse aspecto, futuras pesquisas empregando a liga Fe-Cr-Al como aquecedora em aplicações envolvendo a umidade do solo podem investigar a uniformidade do aquecimento desse material quando exposto apenas ao ar.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O teor de umidade volumétrico (θ , $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) é um parâmetro físico do solo de grande importância para diferentes processos ecológicos e climáticos que ocorrem no planeta, e.g., as trocas energéticas e gasosas entre a superfície terrestre e a atmosfera, o ciclo hidrológico, a interação solo-planta, dentre outros. Por causa disso, o monitoramento e a compreensão de θ em múltiplas escalas é fundamental para alcançar e gestão sustentável dos recursos naturais.

Neste trabalho, a aplicabilidade da integração entre a medição distribuída de temperatura em cabos de fibra óptica (sistema FO-DTS) e o aquecimento de uma liga ferrítica composta de ferro, cromo e alumínio (i.e., Fe-Cr-Al) para a investigação de θ foi avaliada. Para tal fim, dois experimentos foram construídos em laboratório, onde duas configurações foram testadas: com a liga Fe-Cr-Al e o cabo óptico em contato (abordagem SPHP-DTS); e com a liga e o cabo separados por uma distância de solo de 6,03 mm (abordagem DPHP-DTS).

Para a aplicação dessas abordagens, três configurações de aquecimento foram aplicadas na liga Fe-Cr-Al, distintas entre si pela intensidade da potência e pela duração do aquecimento: $4,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ e 180 s (baixa potência e curta duração, abrev. B180); $4,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ e 600 s (baixa potência e longa duração, B600); e $21,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ e 180 s (alta potência e curta duração, A180). A resposta térmica do solo ao aquecimento monitorada pelo sistema FO-DTS foi avaliada por meio de dois métodos: a temperatura acumulada (T_{cum} , $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}$) e o máximo aumento de temperatura (ΔT_{max} , $^{\circ}\text{C}$). Dessa maneira, curvas de correlação (calibração) entre θ e T_{cum} e entre θ e ΔT_{max} foram elaboradas e validadas, para cada experimento construído.

Os resultados encontrados durante a validação da metodologia empregada indicaram que, de forma geral, o pulso de calor B180 levou às piores estimativas de θ , independentemente do método de análise de temperatura usado e da abordagem avaliada. Portanto, o uso de aquecimentos de baixa potência e curta duração não é recomendado. No entanto, ao estender a duração do pulso de baixa potência (i.e., pulso B600), a performance das curvas de calibração melhorou consideravelmente na validação, de forma que essa configuração de aquecimento apresentou desempenho similar à de alta potência (i.e., A180) nas estimativas de θ . Esses resultados são particularmente interessantes para casos em que a disponibilidade energética para gerar o aquecimento possa ser um limitante na execução das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS (i.e., em escala de campo), uma vez que a B600 requer $2520 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ de energia aplicada à liga Fe-Cr-Al para ser executada, enquanto a A180 requer $3870 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$.

Ademais, ressalta-se que o método ΔT_{max} exibiu melhor desempenho do que o T_{cum} em ambas B600 e A180, sendo, portanto, o método mais recomendado para aplicações das abordagens SPHP-DTS e DPHP-DTS, dadas as condições de execução deste trabalho. Além disso, os resultados encontrados indicaram que, de maneira geral, os erros nas estimativas de θ aumentam à medida que θ aumenta. A ocorrência desses erros durante a validação da metodologia aplicada foi associada, especialmente, à observação de que a resposta térmica do solo monitorada pelo sistema FO-DTS exibiu um comportamento de histerese em relação ao θ observado pelos sensores pontuais.

Apesar disso, o uso da liga Fe-Cr-Al como material aquecedor paralelamente às medições de um sistema FO-DTS mostrou-se efetivo ao permitir a análise e investigação de θ , utilizando a temperatura como traçador. Nesse aspecto, a caracterização térmica desse material permitiu identificar que, para as estratégias de aquecimento utilizadas neste trabalho, a uniformidade do aquecimento da liga é mais afetada pela intensidade da potência aplicada do que pela condição de θ do meio poroso circundante.

Ademais, quando da execução de uma única das duas abordagens aqui avaliadas, recomenda-se a aplicação da SPHP-DTS, que exibiu melhor desempenho do que a DPHP-DTS na maioria das combinações entre estratégia de aquecimento e método de análise de dados de temperatura distribuída. Por fim, elencam-se as seguintes sugestões para pesquisas futuras, envolvendo a liga Fe-Cr-Al e a medição distribuída de temperatura:

- avaliar a efetividade de diferentes diâmetros da liga Fe-Cr-Al na geração do aquecimento do solo e seu monitoramento pelo sistema FO-DTS;
- investigar diferentes maneiras de isolar eletricamente a liga Fe-Cr-Al;
- aumentar a quantidade de pontos amostrais coletados para melhor compreender a relação entre θ e T_{cum} ou ΔT_{max} , especialmente em termos de repetibilidade de medições após diferentes ciclos de (re)umedecimento do solo;
- incorporar outros parâmetros além de T_{cum} e ΔT_{max} na investigação de θ por meio do método do aquecimento ativo, para ambas SPHP-DTS e DPHP-DTS;
- ampliar a aplicação da metodologia proposta neste trabalho com a tecnologia de medição distribuída de temperatura, de forma a englobar múltiplas escalas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, N. H. H.; KUAN, N. W.; IBRAHIM, A.; ISMAIL, B. N.; MAJID, M. R. A.; RAMLI, R.; MANSOR, N. S. Determination of soil water content using time domain reflectometer (TDR) for clayey soil. **AIP Conference Proceedings** 2020, p. 020016.1-020016.6, 2018. American Institute of Physics (AIP). <http://dx.doi.org/10.1063/1.5062642>.

ABU-HAMDEH, N. H. Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 1, p. 97-102, set. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1537-5110\(03\)00112-0](http://dx.doi.org/10.1016/s1537-5110(03)00112-0).

ALLEGRO MICROSYSTEMS (USA). **Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**. Manchester, New Hampshire: Allegro Microsystems, 2022. 15 p.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate C. map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AMERICA FUJIKURA LTD. (Duncan, US). **Armored Stainless Steel Tubes**. 2011. Disponível em: https://www.aflglobal.com/Products/Fiber-Optic-Cable/Harsh-Environment/Sensing/Armored_Stainless_Steel_Tubes.aspx. Acesso em: 09 abr. 2021.

AMERICA FUJIKURA LTD. (Duncan, US). **Indoor/Outdoor Riser Tight Buffered Cable**. 2002. Disponível em: https://www.aflglobal.com/Products/Fiber-Optic-Cable/Structured-Cabling/Indoor-Outdoor/Indoor_Outdoor_Riser_Tight_Buffered_Cable.aspx. Acesso em: 09 abr. 2021.

APPERL, B.; BERNHARDT, M.; SCHULZ, K. Towards Improved Field Application of Using Distributed Temperature Sensing for Soil Moisture Estimation: a laboratory experiment. **Sensors**, v. 20, n. 1, p. 1-16, 19 dez. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s20010029>.

BENÍTEZ-BUELGA, J.; RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; CALVO, R. S.; GIL-RODRÍGUEZ, M.; SAYDE, C.; SELKER, J. S. Calibration of soil moisture sensing with subsurface heated fiber optics using numerical simulation. **Water Resources Research**, v. 52, n. 4, p. 2985-2995, abr. 2016. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2015wr017897>.

BENÍTEZ-BUELGA, J.; SAYDE, C.; RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; SELKER, J. S. Heated Fiber Optic Distributed Temperature Sensing: a dual-probe heat-pulse approach. **Vadose Zone Journal**, v. 13, n. 11, p. 1-10, nov. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2014.02.0014>.

BEZDICEK, D. F.; PAPENDICK, R. I.; LAL, R. Introduction: importance of soil quality to health and sustainable land management. **SSSA Special Publications**, p. 1-8, 1996. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub49.introduction>.

BOLOGNINI, G.; HARTOG, A. Raman-based fibre sensors: trends and applications. **Optical Fiber Technology**, v. 19, n. 6, p. 678-688, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yofte.2013.08.003>.

BRADY, N. C.; WEIL, R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013. 716 p.

BRISTOW, K. L. Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89, n. 2, p. 75-84, fev. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1923\(97\)00065-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1923(97)00065-8).

BRISTOW, K. L.; WHITE, R. D.; KLUITENBERG, G. J. Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating. **Soil Research**, v. 32, n. 3, p. 447-464, 1994. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/sr9940447>.

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**, v. 55, n. 1, p. 291-293, jan. 1991. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500010052x>.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CR1000X Measurement and Control Datalogger**. USA: Campbell Scientific, 2021. 242 p.

CAO, D.; SHI, B.; ZHU, H.; ZHU, K.; WEI, G.; GU, K. Performance evaluation of two types of heated cables for distributed temperature sensing-based measurement of soil moisture content. **Journal of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 212-217, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.09.005>.

CARSLAW, H.S.; JAEGER, J. C. **Conduction of Heat in Solids**. 2. ed. Oxford, GB: Oxford University Press, 1959. 510 p.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759 p.

CHARTZOULAKIS, K.; BERTAKI, M. Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 88-98, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.011>.

CIOCCA, F.; LUNATI, I.; GIESEN, N. van de; PARLANGE, M. B. Heated Optical Fiber for Distributed Soil-Moisture Measurements: a lysimeter experiment. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 4, p. 1-10, nov. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2011.0199>.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015. 336 p.

DEOL, P. K.; HEITMAN, J. L.; AMOOZEGAR, A.; REN, T.; HORTON, R. Inception and Magnitude of Subsurface Evaporation for a Bare Soil with Natural Surface Boundary Conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 5, p. 1544-1551, 29 ago. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2013.12.0520>.

DIAS, P. C.; ROQUE, W.; FERREIRA, E. C.; DIAS, J. A. S. A high sensitivity single-probe heat pulse soil moisture sensor based on a single npn junction transistor. **Computers and**

Electronics in Agriculture, v. 96, p. 139-147, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.05.003>.

DONG, J.; AGLIATA, R.; STEELE-DUNNE, S.; HOES, O.; BOGAARD, T.; GRECO, R.; GIESEN, N. van de. The Impacts of Heating Strategy on Soil Moisture Estimation Using Actively Heated Fiber Optics. **Sensors**, v. 17, n. 9, p. 2102, 13 set. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s17092102>.

DONG, X.; VURAN, M. C.; IRMAK, S. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems. **Ad Hoc Networks**, v. 11, n. 7, p. 1975-1987, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.06.012>.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2017. 574 p.

FAROUKI, O. T. **Thermal properties of soils**. Hanover, USA: United States Army Corps of Engineers, 1981. 136 p.

FORSTER, M. The Dual Method Approach (DMA) Resolves Measurement Range Limitations of Heat Pulse Velocity Sap Flow Sensors. **Forests**, v. 10, n. 1, p. 46, 10 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/f10010046>.

GAMAGE, D. N. V.; BISWAS, A.; STRACHAN, I. B. Actively heated fiber optics method to monitor three-dimensional wetting patterns under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 243-251, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.019>.

GAMAGE, D. N. V.; VASAVA, H. B.; STRACHAN, I. B.; ADAMCHUK, V. I.; BISWAS, A. Comparison of Heating Strategies on Soil Water Measurement Using Actively Heated Fiber Optics on Contrasting Textured Soils. **Sensors**, v. 21, n. 3, p. 962, 1 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s21030962>.

GAMAGE, D. V.; BISWAS, A.; STRACHAN, I. Field Water Balance Closure with Actively Heated Fiber-Optics and Point-Based Soil Water Sensors. **Water**, v. 11, n. 1, p. 135, 13 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11010135>.

GIESEN, N. van de; STEELE-DUNNE, S. C.; JANSEN, J.; HOES, O.; HAUSNER, M. B.; TYLER, S.; SELKER, J. Double-Ended Calibration of Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. **Sensors**, v. 12, n. 5, p. 5471-5485, 27 abr. 2012. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s120505471>.

GIL-RODRÍGUEZ, M.; RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; BENÍTEZ-BUELGA, J.; SÁNCHEZ-CALVO, R. Application of active heat pulse method with fiber optic temperature sensing for estimation of wetting bulbs and water distribution in drip emitters. **Agricultural Water Management**, v. 120, p. 72-78, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.012>.

GRATTAN, K.T.V.; SUN, T. Fiber optic sensor technology: an overview. **Sensors And Actuators A: Physical**, v. 82, n. 1-3, p. 40-61, maio 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-4247\(99\)00368-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-4247(99)00368-4).

GREEN, S.; CLOTHIER, B.; JARDINE, B. Theory and Practical Application of Heat Pulse to Measure Sap Flow. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 6, p. 1371-1379, nov. 2003. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2003.1371>.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal Of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, abr. 1999. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135)).

HAUSNER, M. B.; SUÁREZ, F.; GLANDER, K. E.; GIESEN, N. van de; SELKER, J. S.; TYLER, S. W. Calibrating Single-Ended Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. **Sensors**, v. 11, n. 11, p. 10859-10879, 21 nov. 2011. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s111110859>.

HE, H.; DYCK, M. F.; HORTON, R.; LI, M.; JIN, H.; SI, B. Distributed Temperature Sensing for Soil Physical Measurements and Its Similarity to Heat Pulse Method. **Advances in Agronomy**, p. 173-230, 2018a. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.003>.

HE, H.; DYCK, M. F.; HORTON, R.; REN, T.; BRISTOW, K. L.; LV, J.; SI, B. Development and Application of the Heat Pulse Method for Soil Physical Measurements. **Reviews of Geophysics**, v. 56, n. 4, p. 567-620, 18 out. 2018b. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2017rg000584>.

HRISKO, J. Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing. p. 1-11, 5 jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.36214.83522>.

KARGAS, G.; SOULIS, K. X. Performance Analysis and Calibration of a New Low-Cost Capacitance Soil Moisture Sensor. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, v. 138, n. 7, p. 632-641, jul. 2012. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000449](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000449).

KLUITENBERG, G. J. Heat Capacity and Specific Heat. In: DANE, J. H.; TOPP, G. G. (ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison, US: Soil Science Society Of America, Inc., 2002. Cap. 5.2. p. 1201-1208.

KNIGHT, J. H.; KLUITENBERG, G. J.; KAMAI, T.; HOPMANS, J. W. Semianalytical Solution for Dual-Probe Heat-Pulse Applications that Accounts for Probe Radius and Heat Capacity. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 2, p. 1-16, maio 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2011.0112>.

KNIGHT, J. H.; KLUITENBERG, G. J. SIMPLIFIED COMPUTATIONAL APPROACH FOR DUAL-PROBE HEAT-PULSE METHOD. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 2, p. 447-449, mar. 2004. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.4470>.

KODIKARA, J.; RAJEEV, P.; CHAN, D.; GALLAGE, C. Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, n. 3, p. 332-345, mar. 2014. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2012-0113>.

LAGOS, M.; SERNA, J. L.; MUÑOZ, J. F.; SUÁREZ, F. Challenges in determining soil moisture and evaporation fluxes using distributed temperature sensing methods. **Journal of Environmental Management**, v. 261, p. 1-11, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110232>.

LAMBERT, P. Sustainability of metals and alloys in construction. **Sustainability Of Construction Materials**, p. 105-128, 2016. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-100370-1.00006-8>.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 3. ed. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2018. 346 p.

LI, M.; SI, B. C.; HU, W.; DYCK, M. Single-Probe Heat Pulse Method for Soil Water Content Determination: comparison of methods. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 7, p. 1-13, 24 jun. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2016.01.0004>.

LU, X.; SUN, Y.; CHEN, G.; QIN, Y.; BAI, Y.; LI, X.; MOU, X. Influences of thermal dispersion on soil water flux estimates using heat pulse technique in saturated soils. **Catena**, v. 167, p. 228-235, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.041>.

MACHADO, S. L. **Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados**. 1998. 360 f. Tese (Doutorado) – Doutorado em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. Geotechnical characteristics of an unsaturated soil deposit at São Carlos, Brazil. In: TAN, T. S.; PHOON, K. K.; HIGHT, D. W.; LEROUEIL, S. **Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils**. Lisse, The Netherlands: Sweets & Zeitlinger B.V., 2003. p. 1305-1321.

MEDINA, R.; PHAM, C.; PLUMLEE, M. H.; HUTCHINSON, A.; BECKER, M. W.; O'CONNELL, P. J. Distributed Temperature Sensing to Measure Infiltration Rates Across a Groundwater Recharge Basin. **Groundwater**, v. 58, n. 6, p. 913-923, 8 maio 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.13007>.

MOHANTY, B. P.; COSH, M. H.; LAKSHMI, V.; MONTZKA, C. Soil Moisture Remote Sensing: state-of-the-science. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 1, p. 1-9, jan. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2016.10.0105>.

MORAIS, T. da S. O.; TSUHA, C. de H. C.; BANDEIRA NETO, L. A.; SINGH, R. M. Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil. **Energy And Buildings**, v. 216, p. 109971, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109971>.

MORAIS, T. da S. O.; TSUHA, C. de H. C.; VILAR, O. M. Thermal properties of a tropical unsaturated soil. In: 3rd PAN-AMERICAN CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3., 2021, Rio de Janeiro. **MATEC Web of Conferences**. Online: Edp Sciences, 2021. p. 1-8.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions Of The ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>.

MORI, Y.; HOPMANS, J. W.; MORTENSEN, A. P.; KLUITENBERG, G. J. Estimation of Vadose Zone Water Flux from Multi-Functional Heat Pulse Probe Measurements. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 3, p. 599-606, maio 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0174>.

NAGAHAGE, E. A. A. D.; NAGAHAGE, I. S; P.; FUJINO, T. Calibration and Validation of a Low-Cost Capacitive Moisture Sensor to Integrate the Automated Soil Moisture Monitoring System. **Agriculture**, v. 9, n. 7, p. 141, 4 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture9070141>.

OCHSNER, T. E.; HORTON, R.; REN, T. A New Perspective on Soil Thermal Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 6, p. 1641-1647, nov. 2001. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2001.1641>.

PANCIERA, R.; WALKER, J. P.; JACKSON, T. J.; GRAY, D. A.; TANASE, M. A.; RYU, D.; MONERRIS, A.; YARDLEY, H.; RUDIGER, C.; WU, X. The Soil Moisture Active Passive Experiments (SMAPEX): toward soil moisture retrieval from the SMAP mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 490-507, jan. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2013.2241774>.

PEREIRA, R. M.; SANDRI, D.; SILVA JÚNIOR, J. J. da. Evaluation of low-cost capacitive moisture sensors in three types of soils in the Cerrado, Brazil. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 30, p. 262-272, 19 ago. 2022. Revista Engenharia na Agricultura. <http://dx.doi.org/10.13083/reveng.v30i1.14017>.

PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 3585, 25 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s20123585>.

POZDNYAKOVA, L. **Electrical Properties of Soils**. 1999. 138 f. PhD dissertation (Doutorado) - Department of Renewable Resources, University of Wyoming, Laramie, US, 1999.

RADI; MURTININGRUM; NGADISIH; MUZDRIKAH, F. S.; NUHA, M. S.; RIZQI, F. A. Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193). In: 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY, 4., 2018, Yogyakarta, Indonesia. **Proceedings of the 2018 4th International Conference on Science and Technology**. Online: IEEE Xplore, 2018. p. 1-6.

REEDY, R. C.; SCANLON, B. R. Soil Water Content Monitoring Using Electromagnetic Induction. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 11, p. 1028-1039, nov. 2003. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2003\)129:11\(1028\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:11(1028)).

REIS, A. **Uma contribuição ao estudo da interação rio-aquífero em áreas tropicais, utilizando a temperatura como traçador**. Em desenvolvimento. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos.

REIS, A.; BERTOTTO, L. E.; MARTINS, R. T. A. A.; JHUNIOR, H. C. da S.; BALLARIN, A. S.; WENDLAND, E. C. Identificação da interação rio-aquífero usando a medição distribuída de temperatura: avaliação da sazonalidade em áreas tropicais. In: **XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2022**, São Paulo. **Anais do XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2022. p. 1-2.

ROBINSON, D. A.; CAMPBELL, C. S.; HOPMANS, J. W.; HORNBUCKLE, B. K.; JONES, S. B.; KNIGHT, R.; OGDEN, F.; SELKER, J.; WENDROTH, O. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: a review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 1, p. 358-389, fev. 2008. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2007.0143>.

RODRÍGUEZ, C. A. M.; TEIXEIRA, B. A. do N. Avaliação de bacias de retenção de águas pluviais implantadas no município de São Carlos (SP), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 143-150, fev. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220190034>.

SAKAKI, T.; LÜTHI, B. F.; VOGT, T.; UYAMA, M.; NIUNOYA, S. Heated fiber-optic cables for distributed dry density measurements of granulated bentonite mixtures: feasibility experiments. **Geomechanics For Energy And The Environment**, v. 17, p. 57-65, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gete.2018.09.006>.

SAYDE, C.; BUELGA, J. B.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; KHOURY, L. E.; ENGLISH, M.; GIESEN, N. van de; SELKER, J. S. Mapping variability of soil water content and flux across 1-1000 m scales using the Actively Heated Fiber Optic method. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7302-7317, set. 2014. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2013wr014983>.

SAYDE, C.; GREGORY, C.; GIL-RODRIGUEZ, M.; TUFILLARO, N.; TYLER, S.; GIESEN, N. van de; ENGLISH, M.; CUENCA, R.; SELKER, J. S. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. **Water Resources Research**, v. 46, n. 6, p. 1-8, jun. 2010. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009wr007846>.

SCHWAMBACK, D.; PERSSON, M.; BERNDTSSON, R.; BERTOTTO, L. E.; KOBAYASHI, A. N. A.; WENDLAND, E. C. Automated Low-Cost Soil Moisture Sensors: trade-off between cost and accuracy. **Sensors**, v. 23, n. 5, p. 2451, 22 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s23052451>.

SELKER, J. S.; THÉVENAZ, L.; HUWALD, H.; MALLET, A.; LUXEMBURG, W.; GIESEN, N. van de; STEJSKAL, M.; ZEMAN, J.; WESTHOFF, M.; PARLANGE, M. B. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. **Water Resources Research**, v. 42, n. 12, p. 1-8, dez. 2006. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2006wr005326>.

SENEVIRATNE, S. I.; CORTI, T.; DAVIN, E. L.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E. B.; LEHNER, I.; ORLOWSKY, B.; TEULING, A. J. Investigating soil moisture–climate interactions in a

changing climate: a review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, n. 3-4, p. 125-161, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>.

SERNA, J. L.; MUÑOZ, J. F.; SUÁREZ, F. Evaluación del método activo para determinar contenidos de humedad en suelos. **Ingeniería del Agua**, v. 21, n. 3, p. 165-178, 27 jul. 2017. Universitat Politecnica de Valencia. <http://dx.doi.org/10.4995/ia.2017.6802>.

SHEHATA, M.; HEITMAN, J.; ISHAK, J.; SAYDE, C. High-Resolution Measurement of Soil Thermal Properties and Moisture Content Using a Novel Heated Fiber Optics Approach. **Water Resources Research**, v. 56, n. 7, p. 1-11, 29 jun. 2020. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2019wr025204>.

SHEHATA, M.; HEITMAN, J.; SAYDE, C. High-Resolution Field Measurement of Soil Heat Capacity and Changes in Soil Moisture Using a Dual-Probe Heat-Pulse Distributed Temperature Sensing Approach. **Water Resources Research**, v. 58, n. 6, p. 1-14, jun. 2022. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2021wr031680>.

SHIOZAWA, S.; CAMPBELL, G. S. Soil thermal conductivity. **Remote Sensing Reviews**, v. 5, n. 1, p. 301-310, jan. 1990. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02757259009532137>.

SOURBEER, J. J.; LOHEIDE II, S. P. Obstacles to long-term soil moisture monitoring with heated distributed temperature sensing. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 7, p. 1017-1035, 25 out. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10615>.

STEELE-DUNNE, S. C.; RUTTEN, M. M.; KRZEMINSKA, D. M.; HAUSNER, M.; TYLER, S. W.; SELKER, J.; BOGAARD, T. A.; GIESEN, N. C. van de. Feasibility of soil moisture estimation using passive distributed temperature sensing. **Water Resources Research**, v. 46, n. 3, p. 1-12, mar. 2010. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009wr008272>.

STRIEGL, A. M.; LOHEIDE II, S. P. Heated Distributed Temperature Sensing for Field Scale Soil Moisture Monitoring. **Ground Water**, v. 50, n. 3, p. 340-347, 28 mar. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00928.x>.

SUÁREZ, F.; HAUSNER M. B.; DOZIER, J.; SELKER, J. S.; TYLER S. W. Heat Transfer in the Environment: development and use of fiber-optic distributed temperature sensing. **Developments in Heat Transfer**, p. 611-636, 15 set. 2011. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/19474>.

TSAI, H.-L.; TRUONG, L. P.; HSIEH, W.-H. Design and Evaluation of Wireless Power Monitoring IoT System for AC Appliances. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 163, 23 dez. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en16010163>.

TYLER, S. W.; SELKER, J. S.; HAUSNER, M. B.; HATCH, C. E.; TORGENSEN, T.; THODAL, C. E.; SCHLADOW, S. G. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. **Water Resources Research**, v. 45, n. 4, p. 1-7, 28 jan. 2009. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2008wr007052>.

VEETIL, A. V.; MISHRA, A. Water Security Assessment for the Contiguous United States Using Water Footprint Concepts. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 7, p. 1-11, 2 abr. 2020. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2020gl087061>.

WANG, C.; CHEN, J.; WANG, J.; CHEN, J.. Flume testing of seepage velocity monitoring using optic fiber distributed temperature sensing for embankments. **Sensor Review**, v. 36, n. 2, p. 120-129, 21 mar. 2016. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/sr-04-2015-0065>.

WEIHERMÜLLER, L.; HUISMAN, J.A.; LAMBOT, S.; HERBST, M.; VEREECKEN, H. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques. **Journal of Hydrology**, v. 340, n. 3-4, p. 205-216, jul. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.013>.

WEISS, J. D. Using Fiber Optics to Detect Moisture Intrusion into a Landfill Cap Consisting of a Vegetative Soil Barrier. **Journal Of The Air & Waste Management Association**, v. 53, n. 9, p. 1130-1148, set. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10473289.2003.10466268>.

WIŚNIEWSKI, T. S.; FURMAŃSKI, P. Thermal Contact Resistance. In: HETNARSKI, R.B. **Encyclopedia of Thermal Stresses**. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2014. p. 4957-4968.

WU, R.; LAMONTAGNE-HALLÉ, P.; MCKENZIE, J. M. Uncertainties in Measuring Soil Moisture Content with Actively Heated Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing. **Sensors**, v. 21, n. 11, p. 3723, 27 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s21113723>.

YAO, J.-C.; SHI, B.; LIU, J.; SUN, M.-Y.; FANG, K.; YAO, J.; GU, K.; ZHANG, W.; ZHANG, J.-W. Improvement and Performance Evaluation of a Dual-Probe Heat Pulse Distributed Temperature Sensing Method Used for Soil Moisture Estimation. **Sensors**, v. 22, n. 19, p. 7592, 7 out. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s22197592>.

YONG, R. N.; WARKENTIN, B. P. **Soil Properties and Behaviour**. 1. ed. Amsterdam, NL: Elsevier, 1975. 449 p.

ZHANG, X.; HEITMAN, L.; HORTON, R.; REN, T. Measuring Near-Surface Soil Thermal Properties with the Heat-Pulse Method: correction of ambient temperature and soil-air interface effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 5, p. 1575-1583, set. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0014>.

ZHENG, D.; VELDE, R. van Der; SU, Z.; WANG, X.; WEN, J.; BOOIJ, M. J.; HOEKSTRA, A. Y.; CHEN, Y. Augmentations to the Noah Model Physics for Application to the Yellow River Source Area. Part II: turbulent heat fluxes and soil heat transport. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 6, p. 2677-2694, 18 nov. 2015. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jhm-d-14-0199.1>

ZUBELZU, S.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; SAA-REQUEJO, A.; BENITEZ, J.; TARQUIS, A. M. Assessing soil water content variability through active heat distributed fiber optic temperature sensing. **Agricultural Water Management**, v. 212, p. 193-202, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.008>.



EESC • USP