UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LETÍCIA BECHER NIEDVIESKI

ENERGIA GEOTÉRMICA: DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO ATRAVÉS DO ENSAIO DO CONE TÉRMICO (TCT)

PONTA GROSSA
2023

LETÍCIA BECHER NIEDVIESKI

ENERGIA GEOTÉRMICA: DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO ATRAVÉS DO ENSAIO DO CONE TÉRMICO (TCT)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil na Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Prof. Bianca Penteado de Almeida Tonus

PONTA GROSSA
2023

LETÍCIA BECHER NIEDVIESKI

ENERGIA GEOTÉRMICA: DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO ATRAVÉS DO ENSAIO DO CONE TÉRMICO (TCT)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil na Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Ponta Grossa, 16 de Fevereiro de 2023

_____

Prof. Msc. Bianca Penteado de Almeida Tonus – Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

_____

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

_____

Prof. Dr. Vítor Pereira Faro

Departamento de Construção Civil – Universidade Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

À Deus por me iluminar e me conceder a capacidade de alcançar minhas metas e objetivos.

À minha orientadora Professora Bianca Penteado, pela generosidade e pela dedicação em me auxiliar e colaborar para que este estudo se transformasse em realidade, além de desenvolver em mim, o amor e o interesse pelas áreas geotécnicas.

A meus pais, Angela e Luiz, que transmitem presença, aconchego e amor. Que não medem esforços para contribuir com o meu crescimento e são os meus exemplos de equilíbrio e integridade!

E a todos os meus amigos e familiares que contribuíram, de alguma maneira, para a conclusão desta etapa. muito obrigada!

RESUMO

O Ensaio do Cone Térmico (TCT) promove uma análise das propriedades térmicas do solo, avaliando a condutividade térmica, de forma a obter parâmetros para projeto considerando o solo como uma fonte primária de calor para a produção de energia geotérmica, a qual dispõe de procedência limpa e sustentável. Para tanto, no desenvolver do estudo, são apresentados resultados de ensaios laboratoriais com o uso do cone térmico para aferição da condutividade térmica em areias de diferentes granulometrias com variação da umidade e compacidade. Em tais ensaios, o cone térmico foi aquecido em água quente até atingir um patamar próximo à 70ºC e em seguida foi penetrado no solo até dissipar o calor, e atingir a temperatura ambiente em uma taxa constante, de tal forma obtém-se a curva de dissipação do calor ao longo do tempo. Vale mencionar que nesse estudo, o cone utilizado mede apenas a temperatura do solo, não contendo as demais propriedades de um CPT convencional. As curvas obtidas de dissipação do calor, foram interpretadas através dos métodos de Akrouch (2016), e Vardon (2018) para a obtenção da condutividade térmica do solo. Na sequência, os modelos foram replicados por meio de métodos numéricos em um programa computacional de Elementos Finitos e foi realizada uma sobreposição de curvas, de forma a comparar os resultados laboratoriais com os numéricos. Por último, o Ensaio do Cone Térmico foi reproduzido no campo experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa em solo argilo arenoso. Com isso, conclui-se que os modelos laboratoriais mais úmidos e com maiores granulometrias, resultaram em condutividades térmicas mais elevadas. Para mais, os métodos de cálculo compartilharam de valores semelhantes, entretanto, destoaram das condutividades obtidas pelos modelos numéricos. Por sua vez, os modelos numéricos foram validados e mostraram-se efetivos para uma gama de condutividades, contudo, não se encaixaram nas curvas térmicas alcançadas em laboratório. A aplicação do método em campo experimental promoveu taxas de condutividades térmicas próximas, demonstrando coerência e confiabilidade de resultados.

Palavras-chave: Energia geotérmica, condutividade térmica, ensaio de cone térmico, estacas trocadoras de calor, modelagem numérica.

ABSTRACT

The Thermal Cone Test (TCT) promotes an analysis of the thermal properties of the soil, evaluating the thermal conductivity, to obtain parameters for the project considering the soil as a primary source of heat to produce geothermal energy, which has origin clean and sustainable. Therefore, in the development of the study, results of laboratory tests are presented with the use of the thermal cone to measure the thermal conductivity in sands of different granulometries with variation of humidity and compactness. In such tests, the thermal cone was heated in hot water until it reached a level close to 70ºC and then it was penetrated the ground to dissipate the heat, and reach the ambient temperature at a constant rate, in such a way that the dissipation curve is obtained of heat over time. It is worth mentioning that in this study, the cone used only measures the soil temperature, not containing the other properties of a conventional CPT. The heat dissipation curves were interpreted using the methods of Akrouch (2016) and Vardon (2018) to obtain the thermal conductivity of the soil. Next, the models were replicated using numerical methods in a Finite Element Computer Program and curves were superimposed, to compare the laboratory results with the numerical ones. Finally, the Thermal Cone Test was reproduced in the experimental field of the Ponta Grossa State University in sandy clay soil. With this, it is concluded that the more humid laboratory models and with larger granulometries, result in higher thermal conductivities. Furthermore, the calculation methods shared similar values, however, they differed from the conductivities originated by numerical models. In turn, the numerical models were validated and found to be effective for a range of conductivities, however, they did not fit the thermal curves found in the laboratory. The application of the method in an experimental field promoted close thermal conductivity rates, demonstrating follow-up and reliability of results.

Keywords: Geothermal energy, thermal conductivity, thermal cone test, heat exchanger piles, numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de dióxido de carbono por setor econômico 14
Figura 2 – Relação comportamental do solo Temperatura x Profundidade em função das estações . 18
Figura 3 – Solo como Fonte de Resfriamento e Aquecimento, variável com as estações do ano..... 19
Figura 4 – Esquema de funcionamento da bomba de calor 20
Figura 5 – Estruturas geotérmicas em estacas (a), laje (b), túnel (c), parede de contenção (d)..... 22
Figura 6 – Esquema indicativo dos principais sistemas geotérmicos..... 22
Figura 7 – Tubo trocador de calor com arranjo em U com 6 loops (a) e arranjo em espiral (b)..... 23
Figura 8 – Esquema com estacas trocadoras de calor integradas à bomba de calor em um edifício . 24
Figura 9 – Fenômeno de condução..... 26
Figura 10 – Fenômeno de convecção 27
Figura 11 – Equipamento elaborado para ensaio TRT na Suécia..... 29
Figura 12 – Esquema representativo do cone de penetração..... 30
Figura 13 – Relação Temperatura do Cone x Atrito Lateral 31
Figura 14 – Exemplo do método gráfico por Vardon 34
Figura 15 – Fluxograma das etapas de pesquisa..... 35
Figura 16 – Cone Térmico 38
Figura 17 – Modelo para Ensaio Laboratorial..... 39
Figura 18 – Modelo Pequeno para Ensaio Laboratorial 40
Figura 19 – Análise da Transferência de Calor do cone para o solo através do *software* 41
Figura 20 – Dimensões do campo experimental em metros e localização dos furos de sondagens e trincheiras 42
Figura 21 - Perfil geológico-geotécnico do campo experimental..... 42
Figura 22 – Sensor de temperatura LM35..... 43
Figura 23 – Terminações dos fios conectados aos sensores de temperatura 43
Figura 24 – Multímetro aferindo a intensidade da corrente elétrica em cada sensor..... 44
Figura 25 – Temperaturas do Campo Experimental..... 45
Figura 26 – Crescimento Anual do Número de Instalações Geotérmicas Globais..... 46
Figura 27 – Número de Instalações Geotérmicas em 2004 47
Figura 28 – Número de Instalações Geotérmicas em 2014 47
Figura 29 – Quantidade de Energia Geotérmica produzida em 2020 48
Figura 30 – Curvas granulométricas..... 51
Figura 31 – Ensaio de índice de vazios máximo 51
Figura 32 – Aparelhagem para ensaio de índice de vazios mínimo..... 52
Figura 33 – Conjunto molde e sobrecarga anexado à mesa vibratória 53
Figura 34 – Molde com material rasado 54
Figura 35 – Passos para a execução do modelo, (a) solo misturado com água na betoneira, (b) compactação da camada e (c) inserção dos sensores de temperatura 57
Figura 36 – Sensor LM35 58

Figura 37 – (a) Cone aquecendo e (b) Coleta dos Dados com o arduíno 59
Figura 38 – (a) Cápsulas em secagem na estufa e (b) Determinação da Umidade e Densidade 59
Figura 39 – Coleta de Dados 60
Figura 40 – Ensaio do modelo pequeno do cone térmico para diferentes umidades 62
Figura 41 – Comportamento Laboratorial do Sensor 1 63
Figura 42 - Comportamento Laboratorial do Sensor 2 63
Figura 43 - Comportamento Laboratorial do Sensor 3 64
Figura 44 - Comportamento Laboratorial do Sensor 4 64
Figura 45 - Comportamento Laboratorial do Sensor 5 65
Figura 46 - Comportamento Laboratorial do Sensor 6 65
Figura 47 – Comportamento do Sensor do Cone para Areia Fina 66
Figura 48 – Comportamento do Sensor do Cone para Areia Média 66
Figura 49 – Decaimento da Temperatura do cone dos modelos Pequenos (a) Areia Fina (b) Areia Média 67
Figura 50 – Modelo de Planilha para o método Analítico Axissimétrico 70
Figura 51 – Gráfico Condutividade Térmica x Tempo 71
Figura 52 – Gráfico ln(T – T0) x Tempo 71
Figura 53 - Gráfico ln(T – T0) x Tempo para os 6 modelos pequenos 72
Figura 54 – (a) Malha, (b) Transferência de Calor do modelo de Validação pelo cone e (c) Transferência de Calor pelo modelo completo 75
Figura 55 – (a) Comparação dos modelos de Validação realizado por Vardon e (b) pelo autor 75
Figura 56 – Pontos para análise da Temperatura 76
Figura 57 – Comparativo dos pontos da modelagem numérica com os dados plotados por Vardon 76
Figura 58 – Interface do Programa Computacional 77
Figura 59 – Malha Extra Fina 79
Figura 60 – Estatística dos elementos da malha 80
Figura 61 – Pontos de plotagem 80
Figura 62 – Gráficos plotados no *Software* do modelo 1 – (a) cone e (b) apenas sensores 81
Figura 63 – Variação de Temperatura dos Sensores do modelo Grande 1 81
Figura 64 – Bulbo de Calor em (a) 5, (b) 30 e (c) 120 minutos 82
Figura 65 – Comportamento da Temperatura em (a) 5, (b) 30 e (c) 120 minutos 82
Figura 66 – Sensor 1 – modelo numérico 83
Figura 67 – Sensor 2 – modelo numérico 83
Figura 68 – Sensor 3 – modelo numérico 84
Figura 69 – Sensor 4 – modelo numérico 84
Figura 70 – Sensor 5 – modelo numérico 85
Figura 71 – Sensor 6 – modelo numérico 85
Figura 72 – Sensor do Cone – modelo numérico 86
Figura 73 – Modelo Geométrico no Programa Computacional 88
Figura 74 – Malha Extra Fina para o modelo Pequeno 90

Figura 75 – Comportamento da Temperatura em (a) 0, (b) 5 e (c) 30 minutos para o modelo 1..... 90
Figura 76 – Bulbo de Calor para o modelo pequeno 1 em 30 minutos 91
Figura 77 – Gráfico plotado no *Software* modelo 1 Fina 91
Figura 78 - Comportamento da Temperatura em (a) 0, (b) 5 e (c) 30 minutos para o modelo 3 92
Figura 79 – Bulbo de Calor para o modelo Pequeno 3 em 30 minutos..... 92
Figura 80 – Estimativa de Condutividades Térmicas superiores para o modelo Pequeno 2 93
Figura 81 – Sobreposição das curvas de Condutividades Térmicas..... 95
Figura 82 – Ensaio em campo..... 98
Figura 83 – Decaimento da Temperatura × Tempo 99
Figura 84 - Gráfico ln(T – T0) x Tempo para os furos do campo 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Banco de dados 49
Tabela 2 – Porcentagem granulométrica das areias 50
Tabela 3 – Resultados dos Índices de Vazios máximo e mínimo 54
Tabela 4 – Formato dos Grãos das areias 55
Tabela 5 – Índice de Vazios para os modelos 56
Tabela 6 – Dados de compacidade, umidade e densidade para os modelos 57
Tabela 7 – Índice de Vazios para compacidade de 5% 61
Tabela 8 – Dados de umidade, densidade e peso dos materiais para execução do modelo Pequeno 61
Tabela 9 – Condutividades térmicas calculadas por Akrouch – modelo tanque cilíndrico 69
Tabela 10 – Condutividades térmicas calculadas por Akrouch – modelo pequeno 70
Tabela 11 – Resumo das Condutividades Térmicas por Akrouch e Vardon 73
Tabela 12 – Parâmetros do modelo de Validação 74
Tabela 13 – Parâmetros dos materiais 78
Tabela 14 – Dados de densidade e condutividade térmica dos demais modelos 78
Tabela 15 – Temperaturas iniciais do solo e do cone para cada modelo 79
Tabela 16 – Parâmetros de Entrada dos materiais 89
Tabela 17 – Temperaturas iniciais do cone e do solo para cada modelo Pequeno 89
Tabela 18 – Parâmetros mínimos e máximos de Condutividade Térmica por Laloui & Loria 94
Tabela 19 – Dados do ensaio em campo 99
Tabela 20 – Condutividade Térmica do Campo por Vardon 100

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

GSHP – Bombas de Calor com fonte térmica no subsolo

IRENA – Agência Internacional de Energia Renovável

UEPG – Universidade Estadual de Ponta Grossa

SPT – Sondagem à Percussão

CPT – Ensaio de Penetração do Cone

TCT – Ensaio do Cone térmico

TRT – Teste de Resposta térmica

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14
1.1 JUSTIFICATIVA 15
1.2 OBJETIVOS 16
1.2.1 Objetivo Geral 16
1.2.2 Objetivos Específicos 16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1 ENERGIA GEOTÉRMICA 17
2.2 SISTEMAS GEOTÉRMICOS 19
2.2.1 Bomba de Calor 19
2.2.2. *Ground Source Heat Pumps* (GSHP) 20
2.2.3 Sistema GSHP acoplados à Estacas Trocadoras de Calor 23
2.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR 24
2.4 ENSAIOS PARA A OBTENÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA 27
2.4.1. Ensaio de Resposta Térmica (TRT) 27
2.4.2. Ensaio do Cone Térmico (TCT) 30
3. METODOLOGIA 35
3.1 BANCO DE DADOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS 35
3.2 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AREIA MÉDIA E FINA 35
3.3 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA 37
3.4 MODELOS EXPERIMENTAIS DO SOLO VARIANDO COMPACIDADE E UMIDADE 37
3.5 MODELOS NUMÉRICOS UTILIZANDO O SOFTWARE 40
3.6 APLICAÇÃO DO MÉTODO NO CAMPO EXPERIMENTAL 41
4. BANCO DE DADOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS 46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 50

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS 50
5.2 ENSAIOS LABORATORIAIS – MODELO DO TANQUE CILÍNDRICO 56
5.3 ENSAIOS LABORATORIAIS – MODELO PEQUENO 61
5.4 PLOTAGEM DOS RESULTADOS LABORATORIAIS 63
5.5 CÁLCULO DAS CONDUTIVIDADES TÉRMICAS 69
5.6 ENSAIOS NUMÉRICOS – MODELO DE VALIDAÇÃO 74
5.7 ENSAIOS NUMÉRICOS – MODELO DO TANQUE CILÍNDRICO 77
5.8 ENSAIOS NUMÉRICOS – MODELO PEQUENO 88
6. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO 98
7. CONCLUSÕES 102
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105

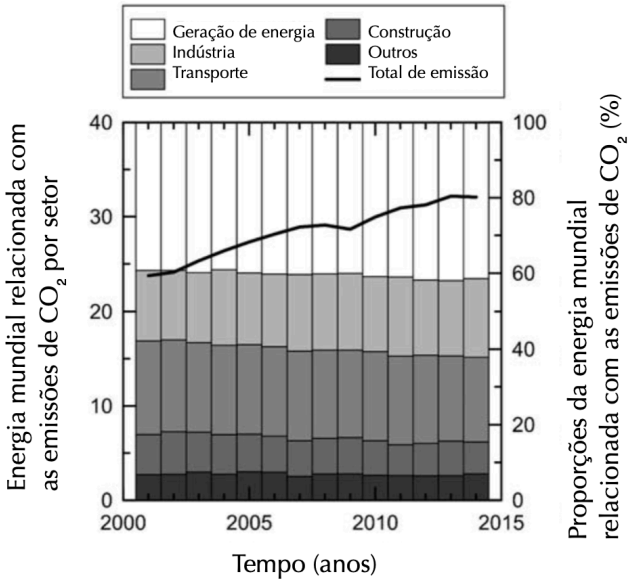
1. INTRODUÇÃO

A demanda populacional e a tendência de crescimento nas próximas décadas, unida à necessidade crescente de desenvolvimento energético, trazem à tona o ideal do pensamento sustentável quanto às questões energéticas.

Dessa forma, em concordância com Laloui e Loria (2020) é possível categorizar as fontes de energia, como primárias ou secundárias, sendo a primeira, aquela disponível na natureza, e consequentemente, as fontes secundárias, resultam de um processo de transformação da fonte inicial primária, cabendo citar os combustíveis sintéticos e refinados, bem como, a energia elétrica. Ademais, são subdivididas em renováveis (solar, eólica, geotérmica, hidroelétrica, maremotriz e biomassa) ou não renováveis (combustíveis fósseis, como óleo, gás natural e carvão, e combustíveis minerais, dado o exemplo do urânio) de acordo com as características de esgotabilidade de produção e disponibilidade.

Aliado aos conceitos expostos, o uso descontrolado de combustíveis fósseis promove um aumento considerável na emissão de dióxido de carbono (CO_2) à atmosfera. Na Figura 1 observa-se as proporções de emissão de gás carbônico variáveis aos setores econômicos, ao longo dos anos 2000 a 2015, conforme dados da Agência Internacional de Energia, em Paris, no qual se observa a predominância dos setores industriais e de transportes.

Figura 1 – Emissão de dióxido de carbono por setor econômico



FONTE: Adaptado de LALOUI e LORIA (2020)

Em junção a isso, Bandeira Neto (2015) deixa explícito que apesar do Brasil ser referência na produção de energia hidroelétrica, é essencial que haja novas possibilidades de matriz energética, à fim de minimizar a dependência do país.

Em continuidade, a energia geotérmica apresenta-se como uma nova matriz limpa e renovável, a qual beneficia-se do calor armazenado naturalmente no solo para uma produção energética sustentável. Possui várias aplicabilidades, porém, para este estudo, o foco será no aquecimento e resfriamento de ambientes. Assim, cabe o uso de valas ou estacas com tubos trocadores de calor acopladas ao subsolo que funcionam como fundação, bem como, realizam trocas térmicas com o ambiente, sistema que se torna possível pela capacidade do solo em manter temperatura constante à medida que aumenta a profundidade.

Para o aproveitamento do potencial geotérmico dos solos, é importante que se conduza em campo, algum programa de investigação que contemple as características térmicas dos materiais. O ensaio de maior precisão para obtenção de dados em campo é o *Thermal Response Test* (TRT). Este, conta com o auxílio de um equipamento que injeta ou remove uma carga térmica constante ao solo. Todavia, é um ensaio lento, promovendo alguns dias de permanência. Neste contexto, o desenvolvimento da pesquisa está fundamentado no Ensaio do Cone Térmico (TCT) por ser um método mais simples, rápido e espera-se que alcance valores satisfatórios para a condutividade térmica do solo.

Em laboratório, realiza-se modelos experimentais variando a umidade e compacidade, para areias de duas granulometrias, moldando o Ensaio do Cone com o objetivo de avaliar a condutividade térmica do solo. Aliado à simulação numérica que reproduzirá e expandirá os modelos, para avaliar a efetividade da transferência de calor dada as condutividades térmicas previamente estabelecidas.

Em paralelo, será elaborada uma pesquisa relativa ao quantitativo do uso de geoestruturas no âmbito mundial, visto que em inúmeros países europeus e asiáticos é uma tecnologia já consolidada.

1.1 JUSTIFICATIVA

A questão energética é um ponto fundamental no âmbito do desenvolvimento socioeconômico. Dessa forma, o aproveitamento do calor proveniente do solo demonstra-se válido à pretexto de uma opção renovável, em junção à disponibilidade contínua em todas as estações do ano, independente de intempéries e fatores

ambientais, uma vez que, nas camadas de solo acima de 10 metros, a temperatura tem a tendência de apresentar-se constante. Em épocas de inverno, a temperatura do solo é superior a ambiente, enquanto, no verão este processo é inverso, mantendo-se mais baixa que o ambiente (PESSIN, 2021).

Além disso, é uma fonte energética limpa e sustentável, não há produção de resíduos somado a mínima emissão de poluentes na atmosfera (CAMPOS *et. al.,* 2017). Em complemento, os sistemas GSHP (*ground source heat pumps)* suprem as necessidades do consumo energético individual, tanto do ponto de vista financeiro, quanto da potência elétrica produzida, contribuindo com uma economia de até 75% no gasto total de energia elétrica (MORAIS; TSUHA, 2019).

Seguindo esse princípio, o estudo é necessário para contribuir com o desenvolvimento das pesquisas no campo geotérmico, pouco explorado no cenário brasileiro. Morais e Tsuha (2019) comprovam benefícios da implantação de estacas trocadoras de calor com o intuito de estarem integradas ao sistema de fundações e sustentação da edificação, agregado ao ideal de refrigeração ou aquecimento dos ambientes, colaborando com a redução da demanda por energia elétrica convencional, as quais, por sua vez, são baseadas na utilização de combustíveis fósseis que emitem dióxido de carbono e são fontes esgotáveis. A proposta também aponta economia financeira à longo prazo e baixo custo de manutenção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem por objetivo principal analisar a viabilidade da obtenção da condutividade térmica do solo através do ensaio do cone térmico (TCT).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o cenário mundial quanto ao uso de estruturas geotérmicas através da elaboração de um banco de dados.
- Caracterizar em laboratório duas areias obtidas no Rio Tibagi a serem utilizadas nos modelos experimentais de laboratório.
- Elaborar modelos numéricos em um *software* fundamentado no método de elementos finitos e comparar os resultados com os obtidos experimentalmente no modelo de laboratório.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA GEOTÉRMICA

Os contínuos processos de desenvolvimento econômico e crescimento populacional em grandes centros urbanos ao redor do mundo motivaram, nos últimos anos, a busca incessante por matrizes energéticas renováveis de caráter sustentável. (TARELOW; NETO, 2019).

De acordo com Omido; Barboza e Júnior (2017), a geotermia deriva-se de um fluxo geotérmico profundo, por meio do fluxo de águas subterrâneas, radiação solar e a própria energia armazenada no solo. Em complemento, Dickson e Fanelli (2004) afirmam que a energia geotérmica é o calor contido na terra que gera fenômenos geológicos em escala planetária, entretanto, está disponível para que seja retirada e explorada pelo homem.

Outrossim, segundo Laloui e Loria (2020), a energia geotérmica natural presente no subsolo encontra-se dissipada nas camadas geológicas do planeta, composto pela crosta, manto superior e inferior, bem como, núcleo externo e interno. Por sua vez, o calor é decorrente de três fatores fundamentais: a formação do planeta, decaimento radioativo dos materiais e a energia solar absorvida na superfície. Para mais, o gradiente geotérmico médio é de aproximadamente 3°C a cada 100 metros de profundidade até a camada do manto superior, com variações de 1°C e 10°C. Em regiões mais profundas, o gradiente de temperatura é reduzido para aproximadamente 0,1°C a cada 100 metros de profundidade.

Ademais, para Campos *et al.* (2017) tal fonte renovável é uma boa opção, dado ao fato que a energia geotérmica é limpa, não emitindo poluentes nocivos ao ambiente, assim como, apresenta disponibilidade de recursos em todas as estações do ano, não dependendo das condições meteorológicas para o devido funcionamento, fato vantajoso se comparado com as fontes solares e eólicas, as quais dependem das condições ambientais.

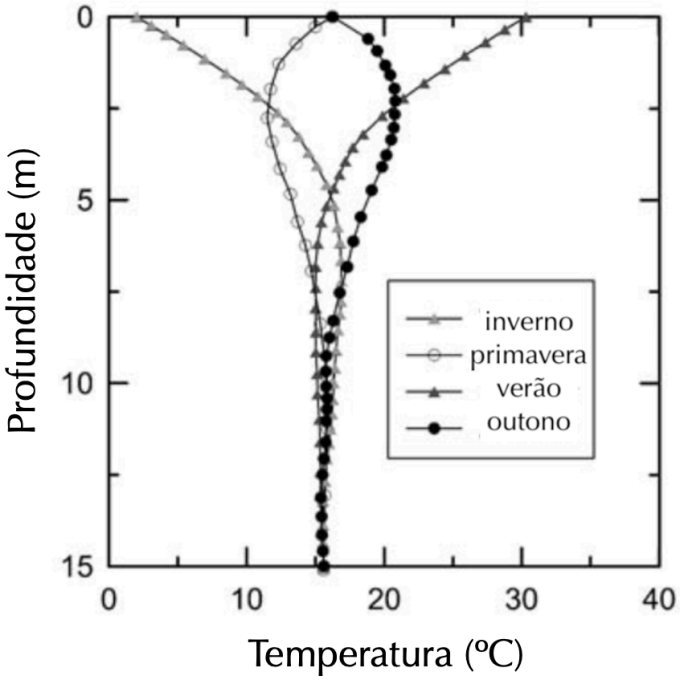
O solo possui uma propriedade térmica conhecida como entalpia, conceito que compreende uma unidade de medida da quantidade de energia térmica presente em um material. Esta se dá em função das relativas temperaturas: acima de 150ºC é uma entalpia alta aplicada na produção de energia elétrica, na faixa de valores de 90 à 150ºC, a entalpia é destinada em indústrias para refrigeração, degelo, lavagem e secagem de produtos e para o intervalo de 30 à 90ºC, a entalpia destina-se

essencialmente à agricultura e alimentação, bem como, no aquecimento de estufas. No presente estudo, a entalpia natural do solo é muito baixa, com temperaturas inferiores à 30ºC, sendo assim, emprega-se em edifícios e habitações para aquecimento ou resfriamento de ambientes com o auxílio de bombas de calor, conforme explícito por Omido; Barboza e Júnior (2017).

Sabe-se que nas profundidades iniciais de uma camada de solo, a temperatura é variável em função da sazonalidade e características regionais, as quais englobam a temperatura média do ar, umidade, tipo de solo e presença de cobertura vegetal, bem como, da profundidade e estabilidade térmica. À medida que se aprofunda nas camadas de solo, em um patamar acima de 10 metros, a temperatura apresenta-se constante, independente dos fatores ambientais, com médias térmicas acima de 20ºC em locais tropicais, conforme mencionado por Pessin (2021).

Assim, de acordo com Laloui e Loria (2020), o gradiente de temperatura do solo demonstra sensibilidade nas cotas de 4 à 6 metros de profundidade. Nos metros seguintes, a temperatura se mantém relativamente constante, variável de 10ºC a 25ºC conforme à região. A Figura 2 representa a oscilação da temperatura do solo ao longo de uma profundidade de 0 a 15 metros.

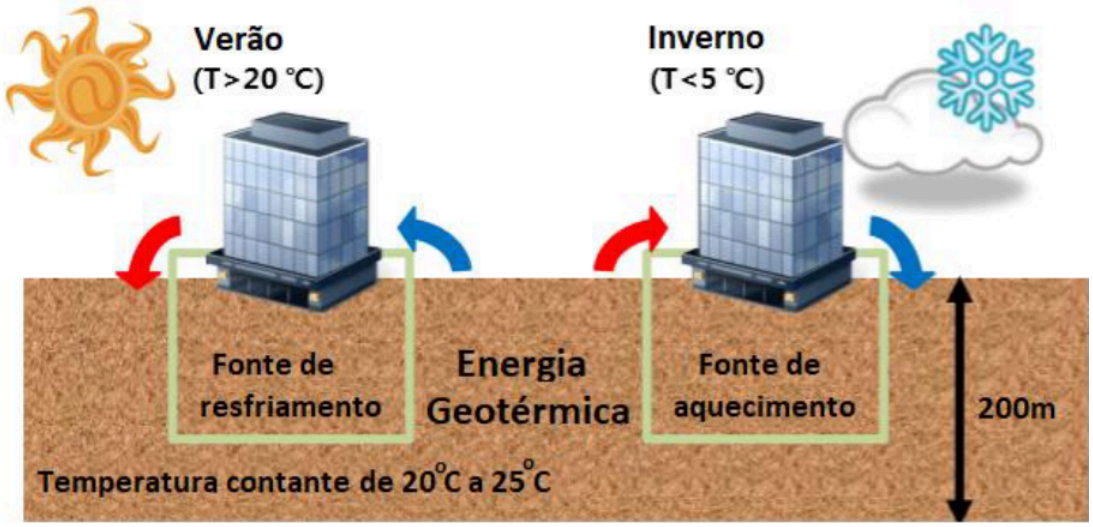
Figura 2 – Relação comportamental do solo Temperatura x Profundidade em função das estações



FONTE: Adaptado de LALOUI e LORIA (2020)

Ademais, o solo apresenta a tendência de manter-se aquecido no período do inverno, já que a temperatura ambiente é baixa, em contraposição ao verão, época em que a temperatura ambiente está elevada e o solo tende a esfriar. Com esse princípio, as estacas trocadoras de calor transformam-se em fontes de aquecimento ou resfriamento dependendo das condições às quais estão submetidas, assim como, representado na Figura 3.

Figura 3 – Solo como Fonte de Resfriamento e Aquecimento, variável com as estações do ano



FONTE: TARELOW e NETO (2019)

Segundo Batchelor (2005 *apud* BANDEIRA NETO, 2015), as diferentes maneiras de aproveitamento da energia geotérmica creditam a ela um grande potencial de crescimento, o que reduz substancialmente a emissão de gases estufa, particularmente em países em desenvolvimento.

2.2 SISTEMAS GEOTÉRMICOS

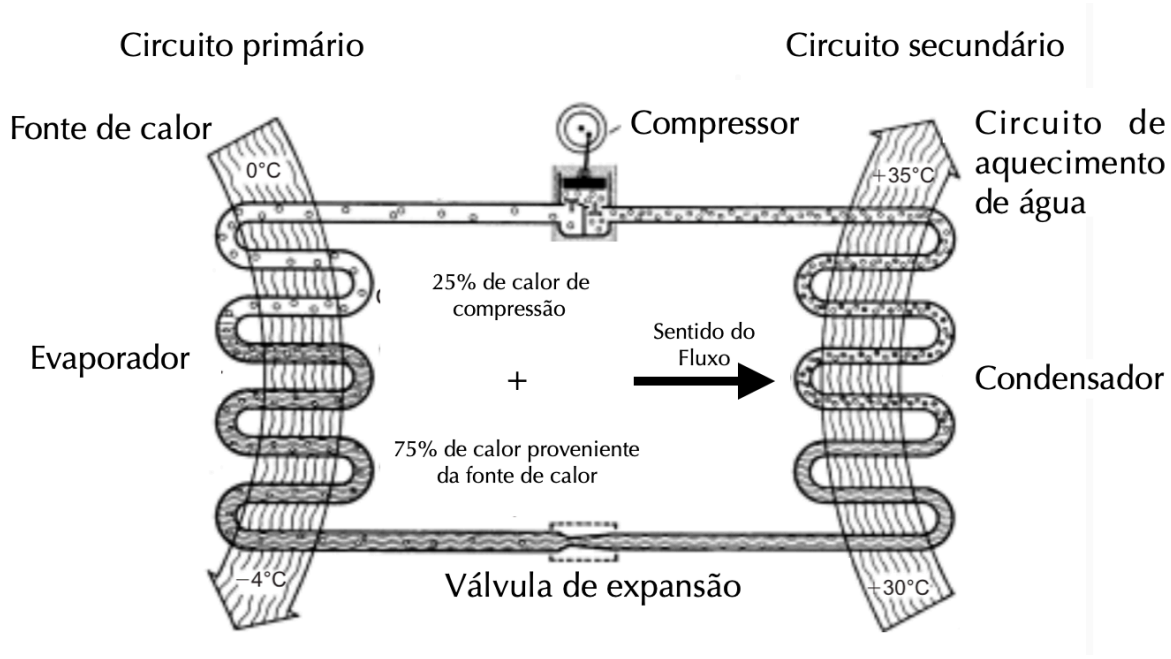
2.2.1 Bomba de Calor

A bomba de calor é um componente fundamental do sistema geotérmico, responsável por conectar os circuitos trocadores de calor e tem como função a extração do calor armazenado no solo e a transformação e armazenamento calorífico, para que na sequência, aqueça e resfrie ambientes.

Portanto, a bomba de calor é um dispositivo mecânico responsável por movimentar o calor existente a partir de um gradiente de temperatura, sendo composta por três elementos fundamentais: evaporador, compressor e condensador. De acordo com Bandeira Neto (2015) o processo se dá quando o líquido circulante

passa pelo evaporador, no qual é removido o potencial calorífico e segue para o compressor que movimenta e comprime o líquido até atingir o estado gasoso em conjunto à uma elevada temperatura. O gás, por sua vez, passa pelo condensador, que é responsável pela transferência do calor para um reservatório de armazenamento. Ao atingir a válvula de expansão, a temperatura é reduzida com o intuito do gás retornar à condição líquida e recomeçar esse procedimento cíclico, conforme demonstrado no esquema da Figura 4.

Figura 4 – Esquema de funcionamento da bomba de calor



FONTE: Adaptado de BRANDL (2006)

2.2.2. *Ground Source Heat Pumps* (GSHP)

A sigla *ground source heat pumps (GSHPs)* é entendida como bombas de calor com fonte térmica no subsolo, um método que segue o princípio de aproveitamento do calor armazenado nas profundidades do solo, devido a capacidade térmica do subsolo unido à temperatura relativamente constante, relacionando o funcionamento do equipamento detalhado no tópico anterior com as propriedades caloríficas do solo. Morais e Tsuha (2016) frisam que a chave do funcionamento tecnológico do sistema baseia-se no fundamento que a temperatura do subsolo se mantém constante.

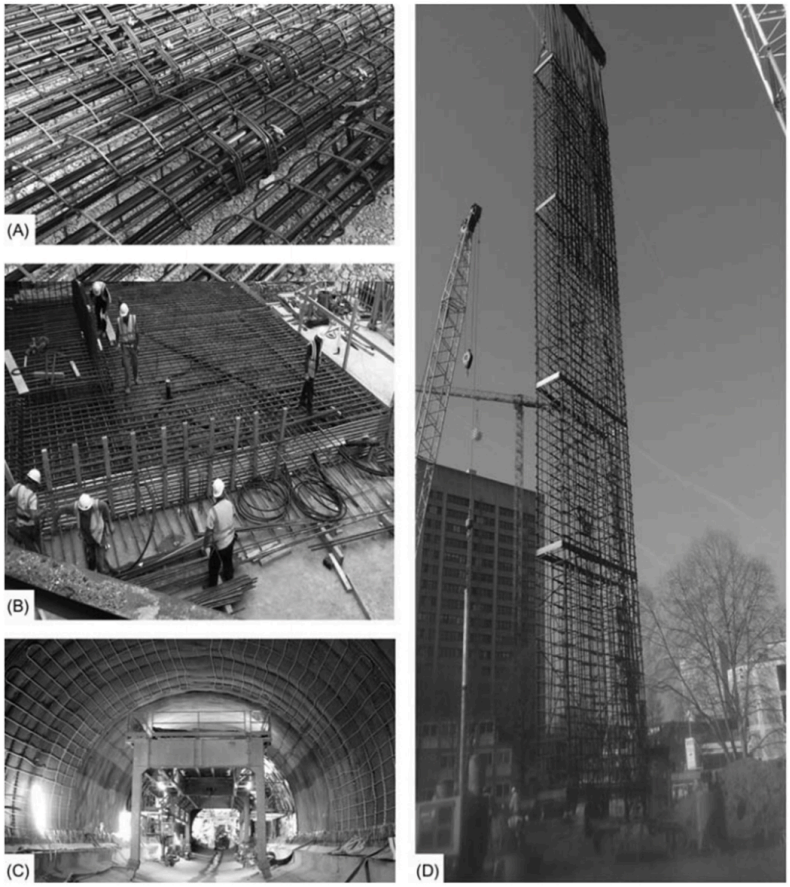
Deste modo, o sistema geotérmico é composto por três fases com características particulares: a primeira, é um circuito formado por um conjunto de tubos

trocadores de calor inseridos em contato com o subsolo, os quais, atuam como fonte ou receptor de calor (energia térmica). Nestes tubos, desloca-se um fluido bombeado por máquinas acionadas através de fontes elétricas, com a aplicabilidade de trocador de calor. O líquido pode ser água, fluido anticongelante (em caso de temperaturas ambientais extremas), este, por sua vez, pode ser uma mistura de água com etilenoglicol ou glicol, ou uma solução salina, as quais contém aditivos em combate à corrosão, responsáveis por conduzir a energia gerada. Tais tubos são constituídos de polietileno de alta densidade, com diâmetros que variam de 10 à 40mm, com espessura de 2 à 4mm. Na sequência, o circuito secundário é composto por elementos que armazenam o calor, como, pisos e tetos radiantes, radiadores ou ventilo-convectores, conforme necessidade de aquecimento ou resfriamento. Entre esses circuitos, tem-se a bomba de calor e um reservatório, que tem por intuito conectar os dois circuitos mencionados. (PESSIN, 2021).

Ainda, pode-se ordenar os circuitos como abertos ou fechados. O primeiro é aquele que o líquido circula nos tubos e corpos d'água, fazendo uso de aquíferos. Já, o sistema fechado concentra o fluido no interior do tubo de maneira cíclica e repetitiva. Este, por sua vez, reduz a possibilidade de riscos ambientais e precipitações minerais, já que não há contato direto do fluido com o solo, entretanto, o circuito aberto apresenta uma troca de calor mais favorável, porém, necessita de maior investimento econômico e pode gerar, por exemplo, poluição do subleito, como mencionado por Laloui e Loria (2020).

Para mais, o sistema pode ser aplicado em edifícios, tanto comerciais, como residenciais, em estacas, lajes, paredes de contenção, além de pavimentos rodoviários, túneis e pontes, como demonstrado na Figura 5, nos quais os tubos são acoplados à própria armadura.

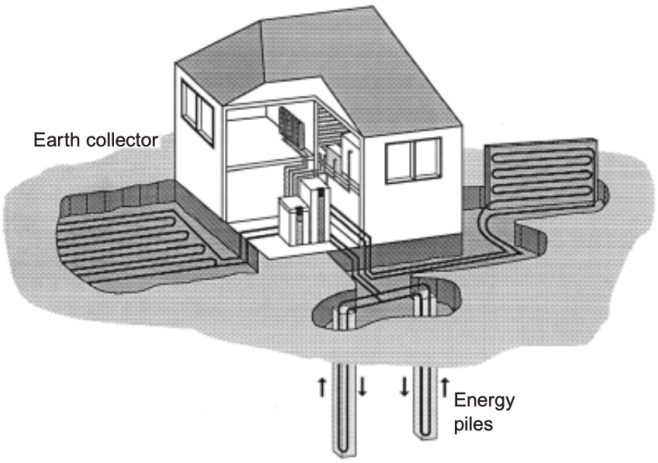
Figura 5 – Estruturas geotérmicas em estacas (a), laje (b), túnel (c), parede de contenção (d)



FONTE: LALOUI e LORIA (2020)

Para mais, os sistemas geotérmicos podem ser horizontalizados, verticalizados em profundidade, por meio de paredes diafragma ou sistemas em loop aberto em contato com aquíferos ou lagos ou simplesmente em contato com o solo, conforme representa a Figura 6.

Figura 6 – Esquema indicativo dos principais sistemas geotérmicos



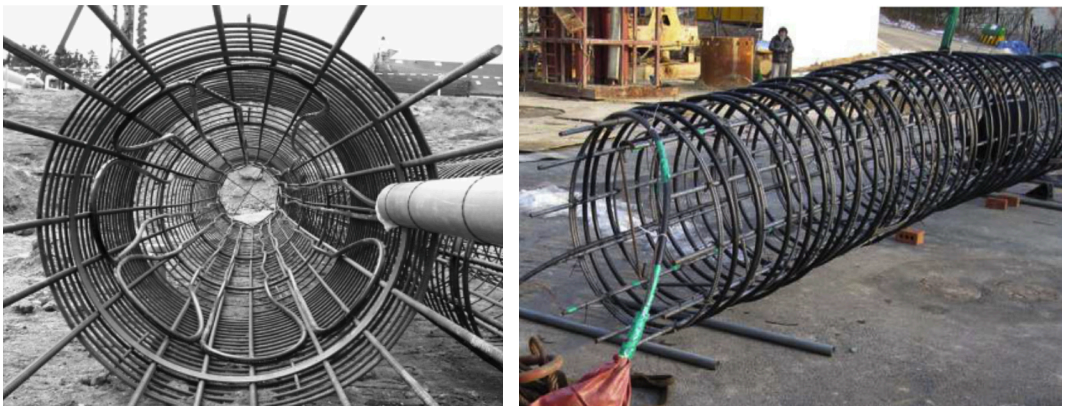
FONTE: BRANDL (2006)

2.2.3 Sistema GSHP acoplados à Estacas Trocadoras de Calor

Apesar da simplicidade envolvida no conceito de estacas trocadoras de calor, o dimensionamento desses sistemas depende de muitos parâmetros, como a condutividade térmica do solo e do material da estaca, a geometria e disposição dos tubos trocadores de calor nas estacas, a presença de um fluxo de água subterrânea e o modo de operação do sistema (FROMENTIN & PAHUD, 1997 *apud* PESSIN, 2021).

As estacas trocadoras de calor funcionam em um sistema vertical de loop fechado, neste caso particular, Morais e Tsuha (2019) afirmam que estas apresentam dupla função, atuando como elemento de suporte estrutural, resistindo às cargas as quais são solicitadas, bem como, atuam utilizando a taxa térmica constante do subsolo unida à elevada condutividade térmica do concreto para realizar as trocas térmicas com os ambientes as quais estão inseridas. Os tubos são posicionados no interior das estacas previamente à concretagem, tais tubos podem ser imobilizados com o auxílio de braçadeiras os fios de aço, para o caso das estacas escavadas (moldadas *in loco*). Estes, podem apresentar variados arranjos e formatos, simples, duplo ou triplo U, em formato W, S ou espiral (Figura 7).

Figura 7 – Tubo trocador de calor com arranjo em U com 6 loops (a) e arranjo em espiral (b)



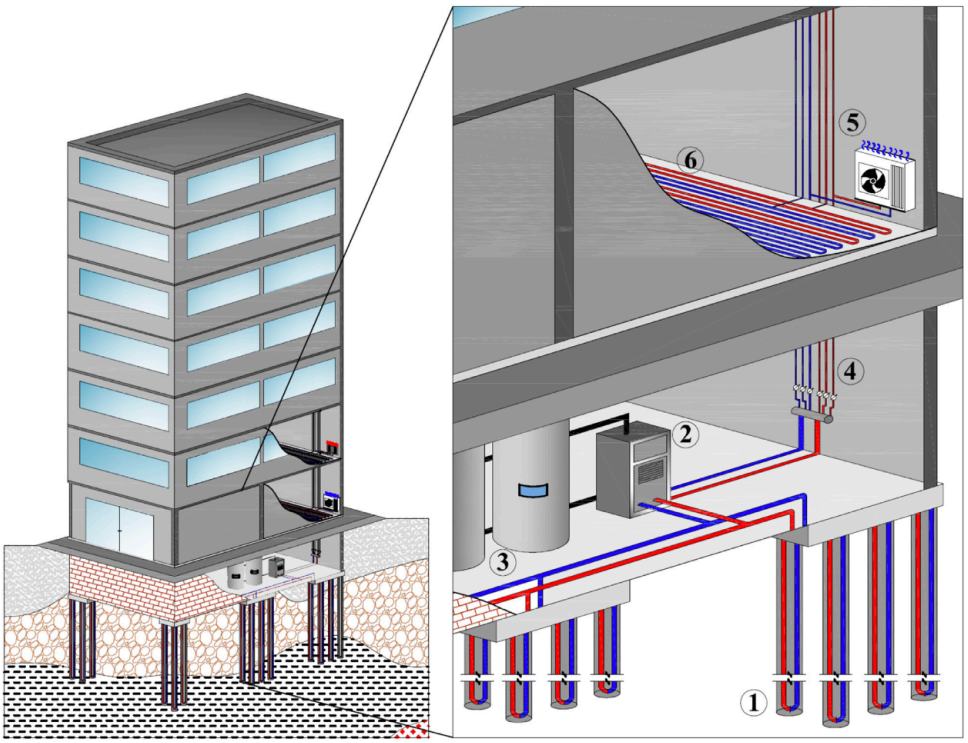
FONTE: BRANDL (2006) e PARK *et. al.* (2014)

Segundo Cecinato & Loveridge (2015) a quantidade de tubos é o fator que exerce maior influência no potencial de trocas energéticas, seguido do comprimento da estaca, bem como, as propriedades térmicas da estaca em si. Concluiu-se que arranjos em espiral contribuem com maiores níveis de trocas térmicas devido à capacidade espacial no interior da estaca, possibilitando maior comprimento de tubos inseridos na região. Para mais, Brandl (2006) informa que as estacas devem

apresentar um comprimento mínimo de 6 metros, para que sejam vantajosas do ponto de vista econômico, visto que as taxas de potencial energético expandem proporcionalmente com a profundidade.

Na Figura 8 há um esquema detalhando o sequenciamento de um sistema trocador de calor em um edifício modelo, no qual, o número 1 representa um conjunto de estacas trocadoras de calor, 2 – Bomba de calor, 3 – Reservatório para armazenamento do fluido, 4 – Coletor e feixe de controle, 5 – Radiador espacial e 6 – Radiador no piso.

Figura 8 – Esquema com estacas trocadoras de calor integradas à bomba de calor em um edifício



FONTE: MORAIS; TSUHA; NETO e SINGH (2020)

Em suma, o objetivo de um sistema geotérmico funcional é resumido na obtenção de energia geotérmica que pode ser armazenada ou extraída do solo, bem como, a interligação dos elementos trocadores de calor com os elementos mecânicos, como a bomba de calor e tubulação de distribuição.

2.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Pode-se dizer que o solo é o meio de equilíbrio das estruturas geotérmicas. O comportamento termohidromecânico do solo contribui nos efeitos de deformabilidade e capacidade energética, à vista das propriedades e mecanismos de transferência de

calor do solo. Entretanto, o primeiro atributo a ser considerado é a mineralogia, devido as influências no tamanho, formato e propriedades das partículas sólidas (LALOUI e LORIA, 2020). Os autores pautam que o solo mineral pode ser categorizado como minerais argilosos ou não-argilosos. O primeiro apresenta fundamentalmente interações químicas, enquanto, minerais não-argilosos possuem natureza física. As interações químicas entre partículas envolvem inerentemente uma maior sensibilidade do material à temperatura em comparação com um material cujas interações entre as partículas são predominantemente físicas, implicando em uma maior sensibilidade à temperatura dos solos de granulação fina em relação aos solos de granulação grossa. (LALOUI e LORIA, 2020). Com isso, é válido que os minerais argilosos exibem melhor desempenho térmico e mecânico. Outrossim, os autores expõem o conceito de pressão de pré-consolidação ou compressão, traduzido como a força vertical máxima que o solo suporta ao ser solicitado. Vale comentar, que o solo dispõe de memória do máximo esforço pelo qual já foi requisitado. A tensão de pré-consolidação é a fronteira imposta à uma deformação reversível ou irreversível e plástica.

Em relação ao índice de vazios máximo e mínimo, quanto maior o índice, mais soltos se encontram os grãos, consequentemente, quanto menor o valor calculado, maior a densidade e aproximação entre as partículas.

Na sequência, Prevedello (2010 *apud* MORAIS, 2019) declara que a condutividade térmica é uma propriedade intrínseca do solo, responsável por medir a quantidade de energia térmica que o solo é capaz de transmitir a cada segundo por metro (W/m.K). É o conceito inverso à resistividade térmica, propriedade que resiste a propagação do fluxo de calor.

Para mais, a temperatura e a porosidade indicam variabilidade na condutividade térmica. Solos saturados possuem condução térmica mais acelerada quando comparada com solos apenas úmidos, fato explicado pela adsorção de água pelos grãos, formando pontes condutoras de calor. (SOUSA JÚNIOR, 2017)

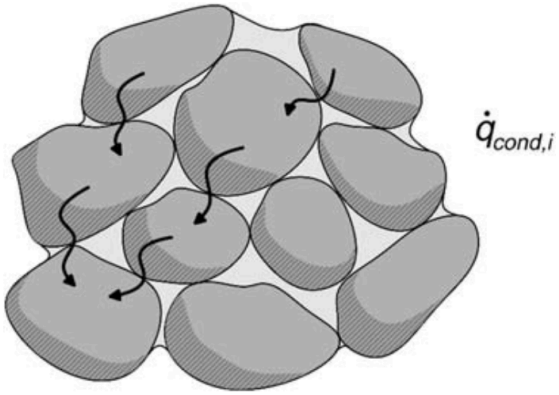
Aliado a isto, cabe dizer que em solos com porosidade reduzida, tem-se uma melhor condução térmica. Farouki (1981 *apud* SOUSA JÚNIOR, 2017) comenta que a porosidade indica a quantidade de partículas sólidas existentes no material, em razão da condução térmica assumir papel principal na transferência de calor em solos.

Sabe-se que a energia não é criada, nem destruída, apenas transformada. Entretanto, o calor pode ser entendido como a energia térmica em movimento fundamentado na existência de um gradiente térmico. (MORAIS, 2019).

O mecanismo de transferência de calor por condução é aquele que se dá de partícula para partícula, molécula para molécula, na qual, as que apresentam maior temperatura e velocidade deslocam-se e colidem com as de menor temperatura, transferindo calor (PESSIN, 2021), porém, esse processo também pode acontecer através de líquidos ou gases, contudo, o caminho dos grãos sólidos é preferencial, uma vez que, apresentam maior condutividade térmica.

Em geral, quanto mais denso o solo, rocha ou concreto, menores são os poros e há maior quantidade de pontos de contato entre os grãos sólidos. Por esta razão, quanto maior for a densidade seca dos geomateriais para o mesmo fluido preenchendo os poros, maior será a condutividade térmica efetiva global do meio (LALOUI e LORIA, 2020). Para mais, Loveridge (2012) afirma que o fluxo de calor através dos grãos de solo é limitado pelo contato das partículas, e a quantidade de água e ar nos poros geram um papel importante a respeito da condutividade térmica do solo. A Figura 9 representa o processo de condução, que se dá essencialmente pelo contato entre as partículas sólidas.

Figura 9 – Fenômeno de condução



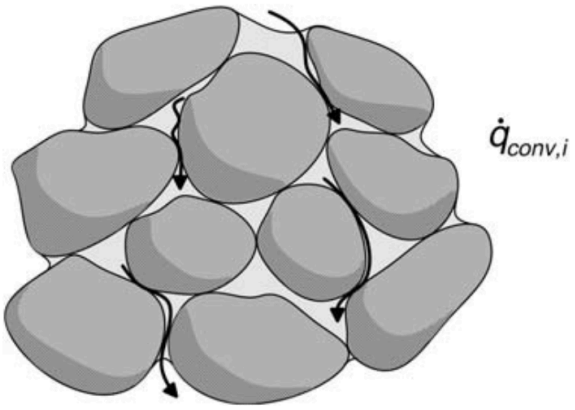
FONTE: LALOUI e LORIA (2020)

Na sequência, o mecanismo de convecção é baseado no escoamento de fluídos, os quais dependem da viscosidade e das propriedades térmicas, sendo elas, condutividade térmica, calor específico e densidade do líquido, seguindo os ideais de Holman (1983 *apud* MORAIS, 2019). Ademais, a convecção sucede com a difusão

líquida nos solos saturados, assim como, por meio de difusão em vapor em solos não saturados.

Loveridge (2012) sustenta que tal processo cumpre-se livremente, quando exposto à uma superfície com temperatura desigual (gradiente), à medida que o fluído encontra um novo estado de temperatura, há alteração na densidade, responsável por impulsionar o escoamento. Já, em um sistema forçado, a convecção acontece devido à movimentação de águas subterrâneas ou por meio do escoamento do fluído ao longo dos poros ocasionado pelo diferencial de pressões (Figura 10).

Figura 10 – Fenômeno de convecção



FONTE: LALOUI e LORIA (2020)

No contexto da análise do solo, Prevedello (2010 *apud* MORAIS, 2019) relata que o processo de condução é dominante e ainda mais relevante, quando se trata do solo em condições secas. Já, em segundo plano em termos de eficiência, a convecção é fundamental em meio saturado unido à mudança de fase da água, com evaporação ou ebulição, resultam em maiores níveis de transferência de calor.

2.4 ENSAIOS PARA A OBTENÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Existem inúmeros ensaios de laboratório e de campo destinados à obtenção de dados da condutividade térmica, na continuidade, serão comentados a respeito dos principais ensaios de campo aplicados e de enfoque ao estudo.

2.4.1. Ensaio de Resposta Térmica (TRT)

O ensaio *Thermal Response Test* (TRT) é um procedimento *in situ* responsável por aferir as condições de condutividade térmica e resistência térmica do solo. O teste consiste em injetar ou retirar calor do solo à uma taxa constante através

de um furo previamente realizado. (BANDEIRA NETO, 2015). O espaço vazio existente em meio a área do tubo e o solo, pode ser preenchido com algum material que sustente o transporte térmico e durabilidade, tal como, um material arenoso ou graute (concreto de alta resistência e fluidez, composto majoritariamente por agregados finos), de forma a contribuir com o posicionamento adequado dos tubos, assegurar o contato térmico apropriado do subsolo com os tubos e impedir que a água drene para o núcleo do tubo, conforme exposto por Gehlin (2002 *apud* MORAIS, 2019). Para mais, Bandeira Neto (2015) recomenda o uso de água como fluido condutor que preenche os tubos, devido as condições hidrodinâmicas do líquido e segurança ambiental, uma vez que não haverá riscos de contaminação do solo.

O procedimento de ensaio é detalhado em uma norma própria no Eurocode (CEN/TC 341 N525 2011) por tratar-se de uma técnica internacional.

Loveridge *et. al.* (2020) afirmam que majoritariamente os ensaios em campo apresentam melhores resultados do que aqueles ensaiados em laboratório, fato que se deve à temperatura de entrada ser consideravelmente maior do que o ar ambiente, ocasionando perdas de calor para a atmosfera térmica. Entretanto, esse efeito pode ser mitigado ao reduzir a distância entre a bancada de teste e o elemento trocador de calor, bem como, as amostras coletadas para análise laboratorial, reduzem naturalmente a tensão de confinamento e a umidade relativa, contribuindo com uma alteração dos resultados reais. Ademais, é comum que elevados diâmetros e comprimentos reduzidos das estacas contribuirão para potenciais imprecisões no ensaio TRT.

De forma simples, o equipamento é composto por um aquecedor, bomba d’água, sensores de temperatura na entrada e saída do tubo em “U”, monitor de temperatura, bem como, um medidor de vazão e um sistema coletor de dados, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Equipamento elaborado para ensaio TRT na Suécia

FONTE: GEHLIN (2002) *apud* BANDEIRA NETO (2015)

Em um furo prévio, adiciona-se um tubo em “U” responsável por circular o líquido trocador de calor com o auxílio da bomba d’água. O equipamento é posicionado, liga-se o aquecedor e deposita-se ou remove-se a energia térmica do subsolo, a depender do objetivo do procedimento (MORAIS, 2019). Os dados das primeiras horas de ensaio devem ser desconsiderados, já que apresentam temperaturas elevadas pelo efeito transitório, bem como, anota-se a temperatura inicial do subsolo não perturbado.

Alguns cuidados devem ser tomados para que o ensaio se desenvolva de maneira adequada, como o preenchimento do furo com algum material que possua boas propriedades térmicas e ter cautela ao inserir os tubos, mantendo-os preenchidos e pressurizados e espaçados de forma a evitar o contato e interferência entre os demais tubos.

O tempo de teste é variável em função das dimensões e do projeto do furo, assim como, o valor e a constância da capacidade térmica, entretanto, deve permanecer em funcionamento ao menos por 48 horas ininterruptas com aplicação de carga térmica constante (BANDEIRA NETO, 2015).

2.4.2. Ensaio do Cone Térmico (TCT)

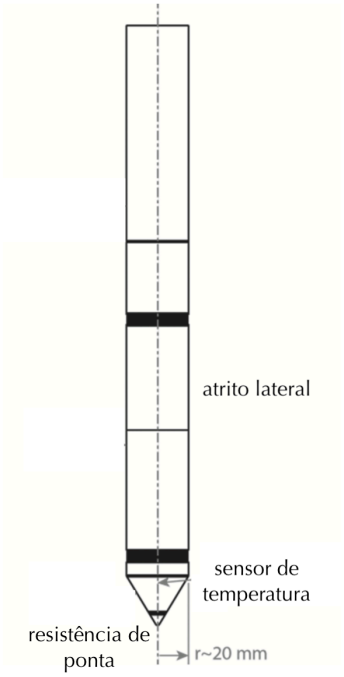
O ensaio do cone térmico deriva-se do ensaio CPT convencional, conhecido como Teste de Penetração do Cone, ao qual atribui-se as aferições de atrito lateral, resistência de ponta e a pressão neutra dos poros. Daí, sucede o conceito do ensaio TCT que evolui o cone do CPT ao acoplar um sensor de temperatura, que afere as propriedades térmicas do solo.

O ensaio TCT provém dados estratigráficos, parâmetros hidráulicos e mecânicos do solo, além de informações térmicas, bem como, elimina a necessidade de aquecimento, uma vez que a fricção durante o movimento de penetração do cone no solo é uma fonte de calor suficiente para suprir as necessidades do ensaio (AKROUCH *et. al*., 2016). Somado a isso, é um teste rápido, com duração inferior à uma hora.

O procedimento resume-se em aplicar um penetrômetro padrão associado à um sensor de temperatura na ponta do cone, até atingir a profundidade desejada no solo, o decaimento de temperatura é registrado até atingir a estabilidade e não haver oscilações. O cone atua proporcionando resistência de ponta ao cravá-lo no solo unido ao atrito lateral, determinante à medida que aumenta a profundidade.

O equipamento base é modificado ao incluir um termopar para que realize medições térmicas ao redor da haste do solo circundante conforme a Figura 12.

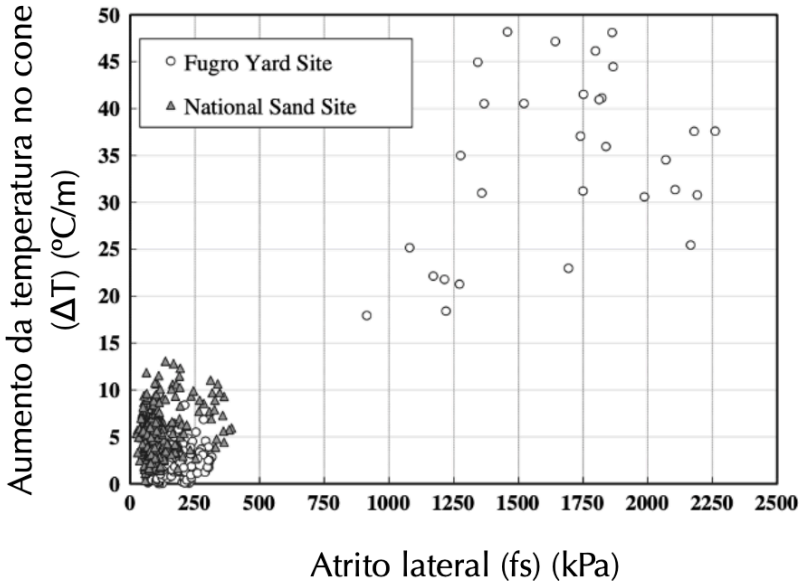
Figura 12 – Esquema representativo do cone de penetração



FONTE: Adaptado de VARDON et. al. (2018)

Na Figura 13 observa-se a relação do aumento da temperatura no cone à medida que o cone avança as profundidades do solo, com o desenvolvimento do atrito lateral, em dois campos de pesquisa distintos, ambos localizados nos EUA.

Figura 13 – Relação Temperatura do Cone x Atrito Lateral



FONTE: Adaptado de AKROUCH *et. al*. (2016)

Na sequência, o autor aponta a tendência comportamental natural da areia, em aumentar a temperatura nas primeiras dezenas de segundos do ensaio, seguidos pelo decaimento esperado resultante da eliminação do calor. A dissipação, por sua vez, é usada para interpretação da condutividade térmica (AKROUCH *et. al*., 2016). A argila, ao contrário, apresenta um decaimento imediato de temperatura após paralisar a penetração do cone.

Ademais, o cone aplicado ao ensaio TCT deve ser calibrado, para que as curvas de decaimento adquiridas em campo sejam correspondentes aos valores reais, fato que será exposto de maneira detalhada nas etapas metodológicas.

De forma à adquirir e interpretar os valores de condutividade térmica, cabe comentar o princípio de funcionamento de dois métodos. O primeiro método de cálculo da condutividade térmica é baseado na equação proposta por Akrouch (2016). O autor interpreta a condutividade térmica como uma medida da capacidade de um material em conduzir calor por unidade de tempo através de uma seção transversal unitária de solo exposto à um gradiente de temperatura. Acerca do assunto, Akrouch baseia-se na equação do escoamento hidráulico para propor uma equação que estima a condutividade, devido à equivalência do processo físico da dissipação da água da

poro-pressão com a dissipação do calor. A Equação 1 1 empírica é dada à seguir, na qual a condutividade (λ) é expressa em W/m.K e t_{50} em segundos. Cabe frisar que o termo t_{50} refere-se ao tempo relativo à dissipação de 50% do excesso de calor.

Equação 1 – Condutividade Térmica por Akrouch

$$\lambda = \frac{77}{(t_{50})^{0,968}}$$

Não obstante, Akrouch (2016) elabora um ajuste para a fórmula apresentada, uma vez que, o ensaio em laboratório apresenta divergências quando comparado ao ensaio em campo, levando em consideração as alterações nas tensões e estruturas do solo, gerando perturbações térmicas no solo que podem impactar na transferência de calor. Além do mais, modelos não saturados contribuem para que o vapor de água interfira na transferência de calor e consequentemente, na condutividade térmica.

Entretanto, a Equação 2 ajustada é dada abaixo.

Equação 2 – Condutividade Térmica ajustada por Akrouch

$$\lambda = \frac{125}{t_{50}}$$

Dessa forma, registra-se as temperaturas iniciais ($T0$) e Finais (Tf) do ensaio e calcula-se a diferença obtida entre estas (Δ). Para tanto, o tempo 50 é dado pela Equação 3.

Equação 3 – Cálculo do t_{50}

$$tempo\ 50 = T0 - \frac{\Delta}{2}$$

A temperatura em graus Celsius, resultante do cálculo, deve-se equivaler aos segundos necessários para que se atinja determinado ponto. Este, é averiguado por meio da planilha de coleta de dados.

Já, o mecanismo de interpretação proposto por Vardon (2019) tem como base soluções analíticas axissimétricas unidimensionais, todavia é indicado para solos, já que apresentam a condução como o processo dominante para a transferência de calor.

O princípio do método é fornecer um valor estável de temperatura em aproximadamente 500 segundos, com precisão de 0,05ºC. Contudo, é necessário apresentar exatidão para a temperatura inicial *in situ* (T0), caso contrário, o gradiente gráfico final será não linear, comprovando dados errôneos. T0 pode ser obtido por meio de análise de dados dispostas em uma planilha auxiliar ou por meio da Equação 4, na qual t_1 refere-se ao tempo de início do ensaio e t_2 ao tempo relativo ao término do ensaio.

Equação 4 – Temperatura Inicial por Vardon

$$T0 = \frac{t_1 \times T_1 - t_2 \times T_2}{t_1 - t_2}$$

A condutividade é alcançada por meio de duas maneiras. A primeira, conta com um valor calculado, o qual refere-se à média de condutividades térmicas (k) no estágio em que o ensaio atinja dados similares. Já, o segundo método é através de dados plotados em gráficos, favorecendo uma interface visual. Ambas, são demonstradas através da Equação 5, o primeiro termo é em função dos dados calculados, e o segundo termo é relativo ao método gráfico.

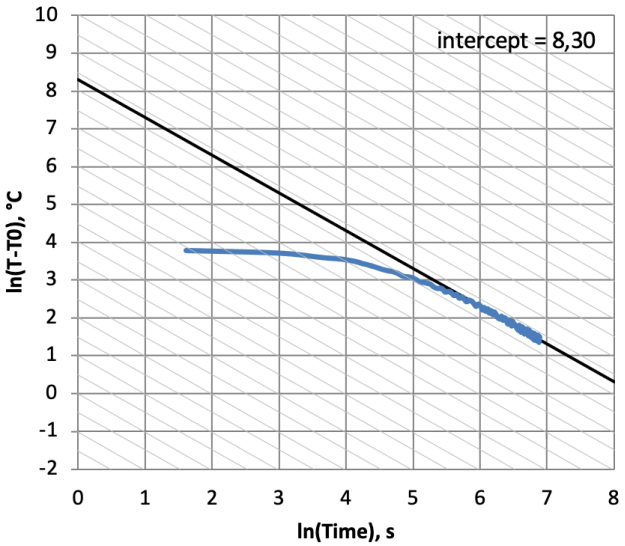
Equação 5 – Condutividade Térmica por Vardon – (a) método de cálculo, (b) método gráfico

$$k = f_{TC} \times \frac{S\,(T_{máx} - T_0)}{4\pi\,[t(T - T_0)]} \quad (a) \quad = f_{TC} \times \frac{S\,(T_{máx} - T_0)}{4\pi \times \exp\,(i_T)} \quad (b)$$

As incógnitas referem-se à condutividade (k), ao fator de calibração do cone (f_{TC}), ao cálculo de liberação de calor por comprimento por graus (S = $cp \times \rho \times A$) do aço do cone, variáveis em função da capacidade de calor específico gravimétrico (cp); da densidade do material que compõe o penetrômetro do cone (ρ) e da área da seção transversal (A), assim como, as temperaturas máximas, momentâneas e iniciais do ensaio ($T_{máx}$; T e T_0), ao tempo (t) e a interceptação do eixo y (i_T).

No entanto, como exemplo, cabe demonstrar que a incógnita i_T é o valor numérico no qual a linha preta intercepta o eixo y. Esta linha deve sobrepor a curva azul, relativa aos dados do ensaio. Para o caso da Figura 14, o exponencial de i_T seria correspondente ao exponencial do número 8,30 computado na fórmula (b).

Figura 14 – Exemplo do método gráfico por Vardon



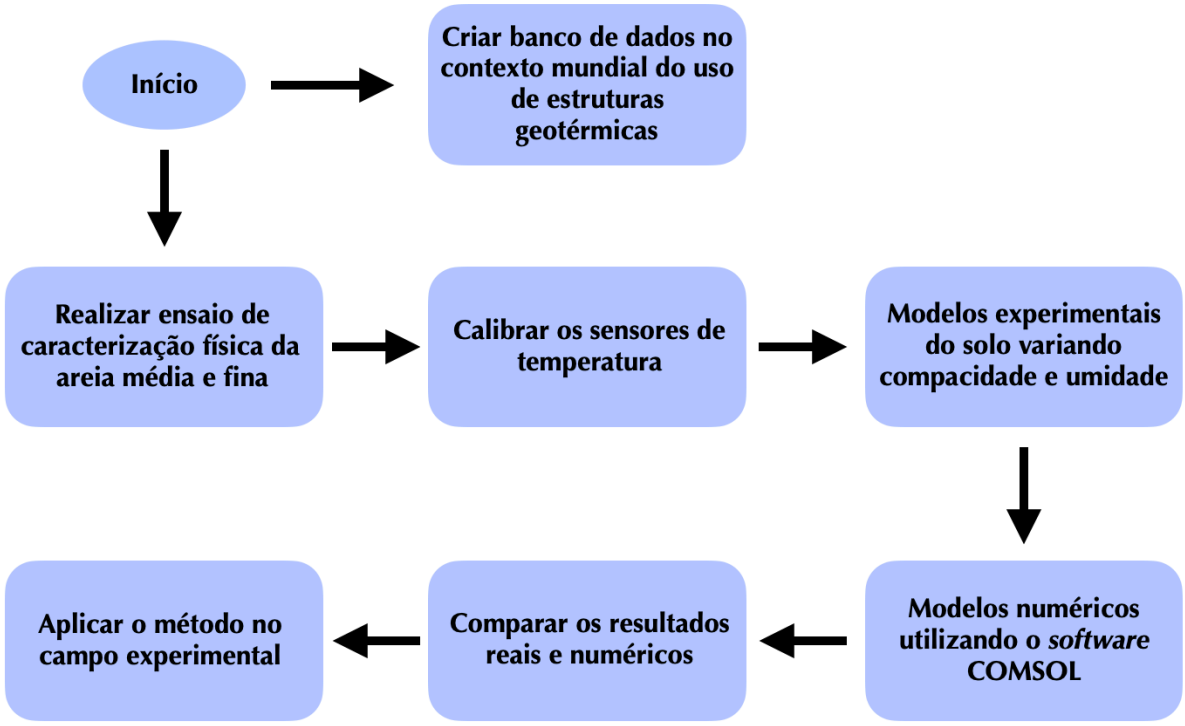
Os dados de entrada para o tempo, em segundos, e temperatura, em graus Celsius são alcançadas por meio dos ensaios laboratoriais, deve-se apenas ajustar os demais dados, segundo as orientações disponibilizadas na planilha auxiliar de Vardon (2019).

Além do mais, Vardon (2019) considera possíveis alterações nas propriedades térmicas em função das mudanças no volume do solo durante a fase de penetração do cone e ao longo do ensaio, especialmente em solos arenosos e argilosos não saturados, podendo ocasionar consolidação local. Ademais, há influência dos movimentos do vapor de água em modelos não saturados.

3. METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na Figura 15 fornece um panorama geral das etapas propostas para pesquisa deste trabalho, tanto do ponto de vista laboratorial, como numérico, os quais serão abordados e detalhados individualmente na sequência.

Figura 15 – Fluxograma das etapas de pesquisa



FONTE: O AUTOR (2022)

3.1 BANCO DE DADOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS

Foi realizado um banco de dados a partir de informações publicadas em pesquisas, artigos acadêmicos, teses, trabalhos científicos, periódicos, dissertações e relatórios, referente ao quantitativo do uso e aplicabilidade do sistema de estruturas geotérmicas em outros países, além dos parâmetros de condutividade térmica registrados, com o intuito de estimular a implantação do modelo no Brasil.

3.2 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AREIA MÉDIA E FINA

A análise laboratorial utiliza areias como meio de estudo, uma vez que representam solos com características comportamentais de amplo conhecimento científico, favorecendo o processo de calibração. Sendo assim, foram ensaiadas duas

granulometrias distintas de areia do Rio Tibagi, uma caracterizada como fina, e outra média. Seguindo esse princípio, foram realizados ensaios de granulometria com sedimentação, peso específico real dos grãos e umidade, assim como, ensaios de índice de vazios máximo e mínimo das areias.

A sedimentação (NBR 7181/2018 – Solo – Análise Granulométrica) é um processo físico que consiste em depositar um material denso no fundo do recipiente com o auxílio da gravidade. Para o caso específico da areia, ao ser misturada com água, a sedimentação tende a acontecer em poucos segundos, mantendo-se constante nas próximas 24 horas que persistem o ensaio, ocasionando apenas variações na temperatura. Já, o peneiramento é o processo para conclusão do ensaio granulométrico, aferindo a porcentagem passante em cada peneira, sendo que o peneiramento grosso compreende o material passante até a peneira #10, equivalente a grãos de 2mm, enquanto, o peneiramento fino, abrange os materiais passantes da peneira #40 à #200 (0,42 à 0,075mm).

O ensaio para obtenção do teor de umidade (NBR 6457/2016 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização) é realizado ao pesar amostras de areia úmida em condições ambiente e posteriormente, seca em estufa, calculando a variação de massa em relação à massa de solo seco, em porcentagem.

O índice de vazios máximo e mínimo (NBR 12051/1991 Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos e NBR 12004/1990 Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos) visa a determinação da porcentagem de espaços vazios entre as partículas de areia, à fim de conhecer os limites de compactação e comportamento dos grãos soltos. Segundo a norma, o ensaio será elaborado levando em consideração o método B1, para os dois casos, já que exige menor quantidade de solo. Para tanto, é necessário a realização de leituras do diâmetro e altura do molde com o auxílio de um paquímetro para o posterior cálculo do volume do molde.

Para mais, no ensaio do índice de vazios máximo, é conhecida a composição mais fofa dos grãos, no qual pesa-se o molde vazio e preenchido com areia, este segundo, conta com o auxílio de um funil e um tubo rígido para que a areia seja direcionada inteiramente ao cilindro de Proctor. Deve-se remover rapidamente o tubo rígido, de forma a promover a eficiência do ensaio. O excesso é rasado com uma régua de aço biselada. O processo repete-se três vezes, de forma a obter-se três

valores de massa. Para o índice de vazios mínimo, o material deve ser seco em estufa à 105 a 110ºC, o molde unido à uma sobrecarga padrão é acoplado em uma mesa vibratória para peneiramento de amostras de análise granulométrica. Novamente, o método é replicado, para que se obtenha três valores de massa.

3.3 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

Calibrar um sensor é concluir qual o desvio constante da medição e encontrar uma curva de ajuste, para que, nesse caso, ao aplicar a equação de parâmetro, a temperatura medida no instrumento seja correspondente à realidade e trabalhem de maneira conjunta ao cone.

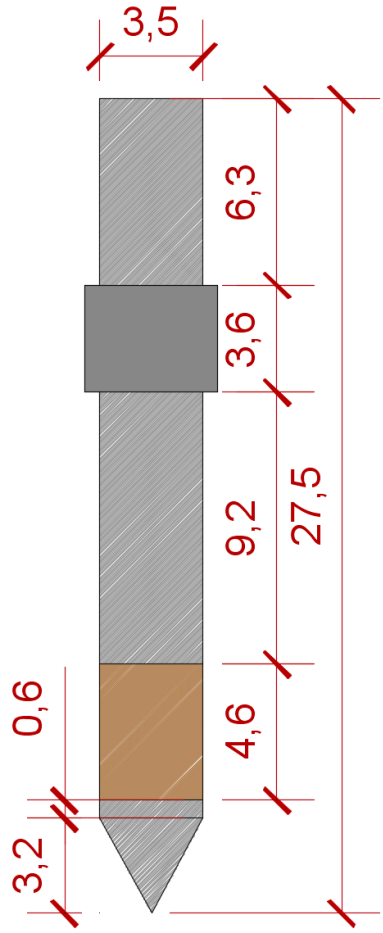
Sendo assim, tal calibração foi feita com o auxílio de um termômetro analógico como referência e água em diferentes temperaturas (gelada, ambiente e quente). Cada sensor foi inserido na água em junção ao termômetro, e registrou-se a temperatura medida pelo termômetro e pelo próprio sensor, o desvio ou diferença térmica foi apontada e cria-se uma equação da reta padrão, a qual encaixa-se em todos os casos.

3.4 MODELOS EXPERIMENTAIS DO SOLO VARIANDO COMPACIDADE E UMIDADE

Foram elaborados modelos experimentais em duas maneiras distintas, a primeira, combinando porcentagens de umidade (variáveis de 5 a 15%) com compacidade relativa (40 e 80%), além de dois modelos totalmente secos a fim de comparar a interferência da umidade no solo, ocasionando 10 modelos, divididos em 5 modelos para cada qualidade granulométrica (média e fina). O segundo modelo abrange umidades de 0 à 20% com compacidade constante de 5% para todos os casos.

Isto posto, o cone térmico é formado por um sensor térmico LM35 protegido pela ponta de aço, que por sua vez, é isolada com uma camada de 4,60cm de Celeron, um material termorrígido laminado com tecidos de algodão e resina fenólica de baixa condutividade, seguida por uma barra e luva de aço. O modelo é detalhado em centímetros conforme exposto na Figura 16.

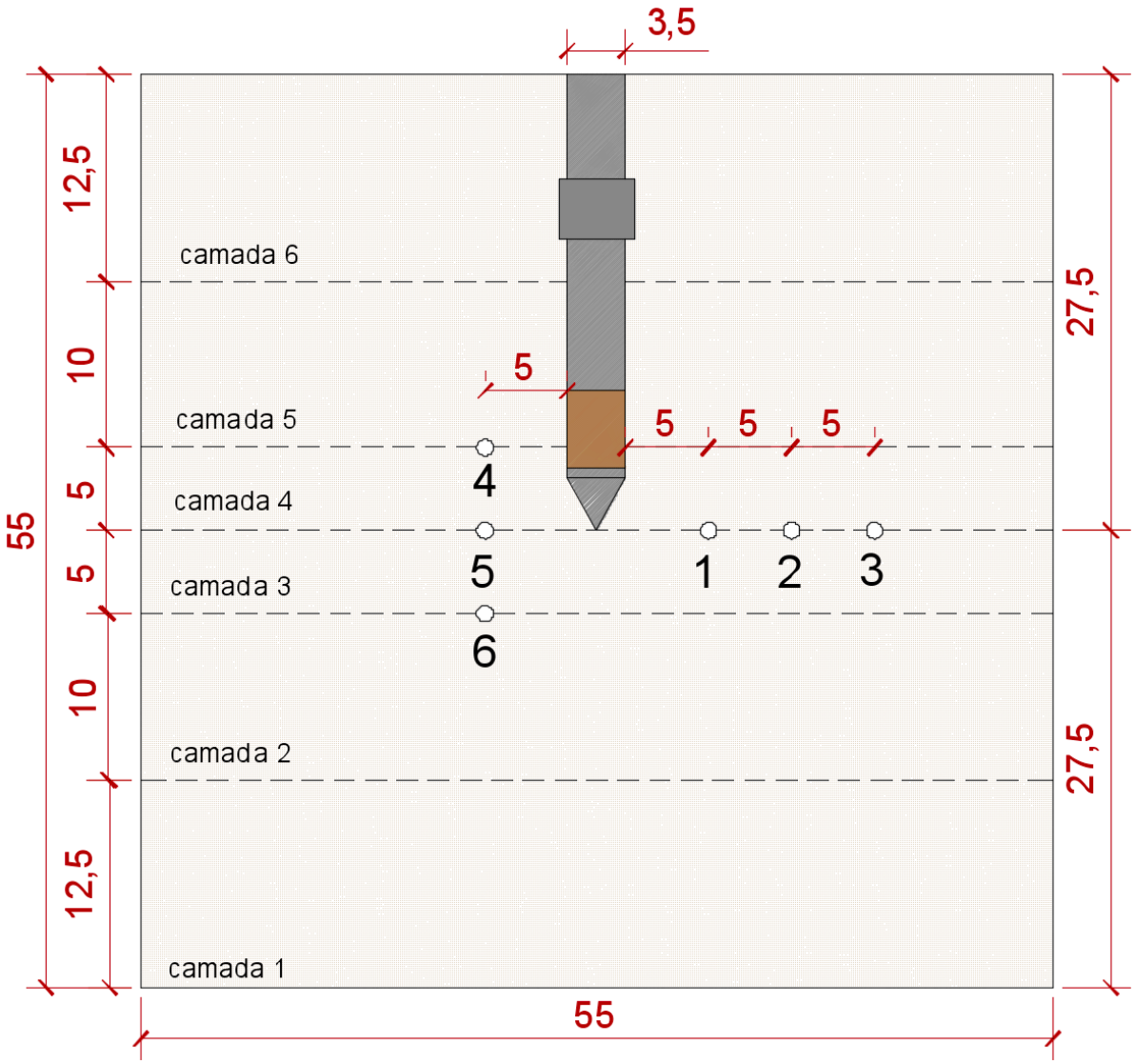
Figura 16 – Cone Térmico



Dimensões em centímetros

O primeiro ensaio foi elaborado em um tanque cilíndrico com capacidade para 200 litros, com diâmetro de 55cm e altura total de 80cm, entretanto, a altura de enchimento será de apenas 55cm, totalizando um volume necessário de material de 0,13m³, dividido em seis camadas de compactação, as quais foram compactadas com o auxílio de um peso padrão de 7,5kg em uma sequência de 4 repetições de golpes para a maior compacidade (80%) e 2 repetições para a menor compacidade (40%). Foram inseridos seis sensores de temperatura nos intervalos dessas camadas, além do cone, este foi aquecido em água quente até atingir 70ºC, seguindo o proposto pela Figura 17. O ensaio persistiu por aproximadamente duas horas para a dissipação completa do calor do cone, os dados de temperatura foram coletados através de um arduíno (sistema eletrônico composto por entradas e saídas que direciona os dados à uma planilha Excel), possibilitando a análise e interpretação de dados, de forma a concluir a condutividade térmica do meio estudado em cada modelo.

Figura 17 – Modelo para Ensaio Laboratorial

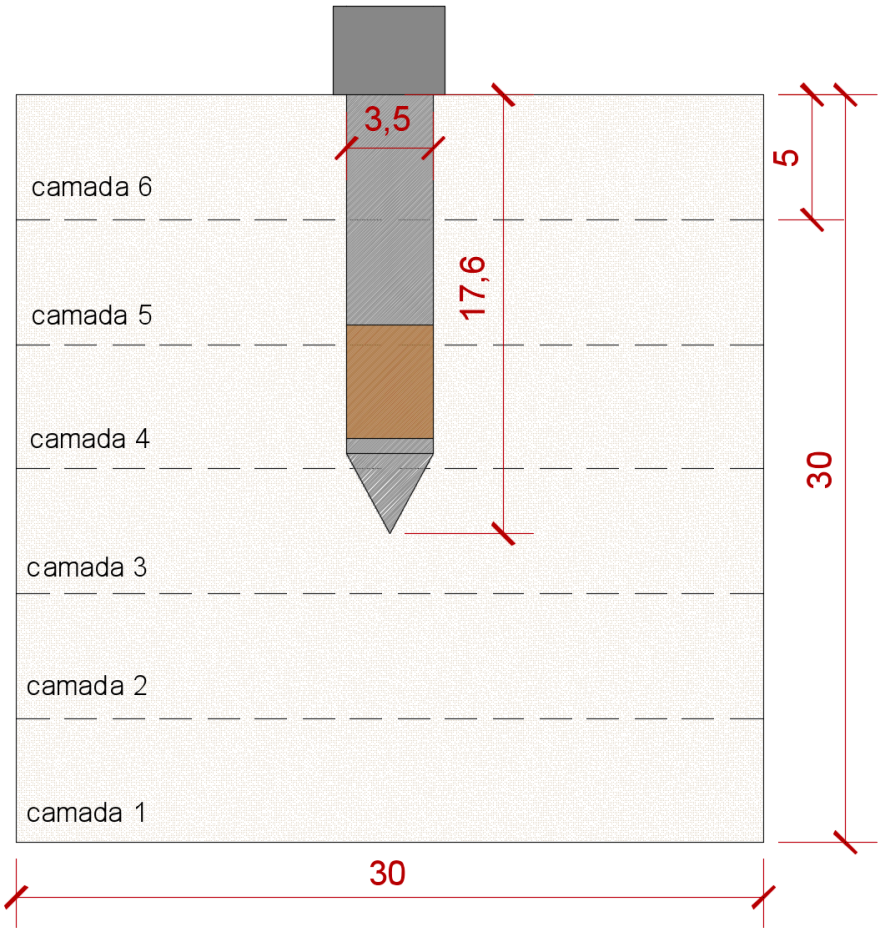


Dimensões em centímetros

Da mesma forma que o modelo do tanque cilíndrico, os modelos seguintes foram executados seguindo o mesmo princípio de funcionamento, porém em recipientes menores. Para tanto, o balde cilíndrico apresenta capacidade de 0,085m³, com diâmetro de 30 cm e altura correspondente à 30 cm.

O modelo pequeno é representado por meio da Figura 18. Este é dividido em seis camadas iguais de 5 cm cada. Cabe mencionar que a luva de aço se encontra fora do modelo, apenas o cone é inserido no material arenoso.

Figura 18 – Modelo Pequeno para Ensaio Laboratorial



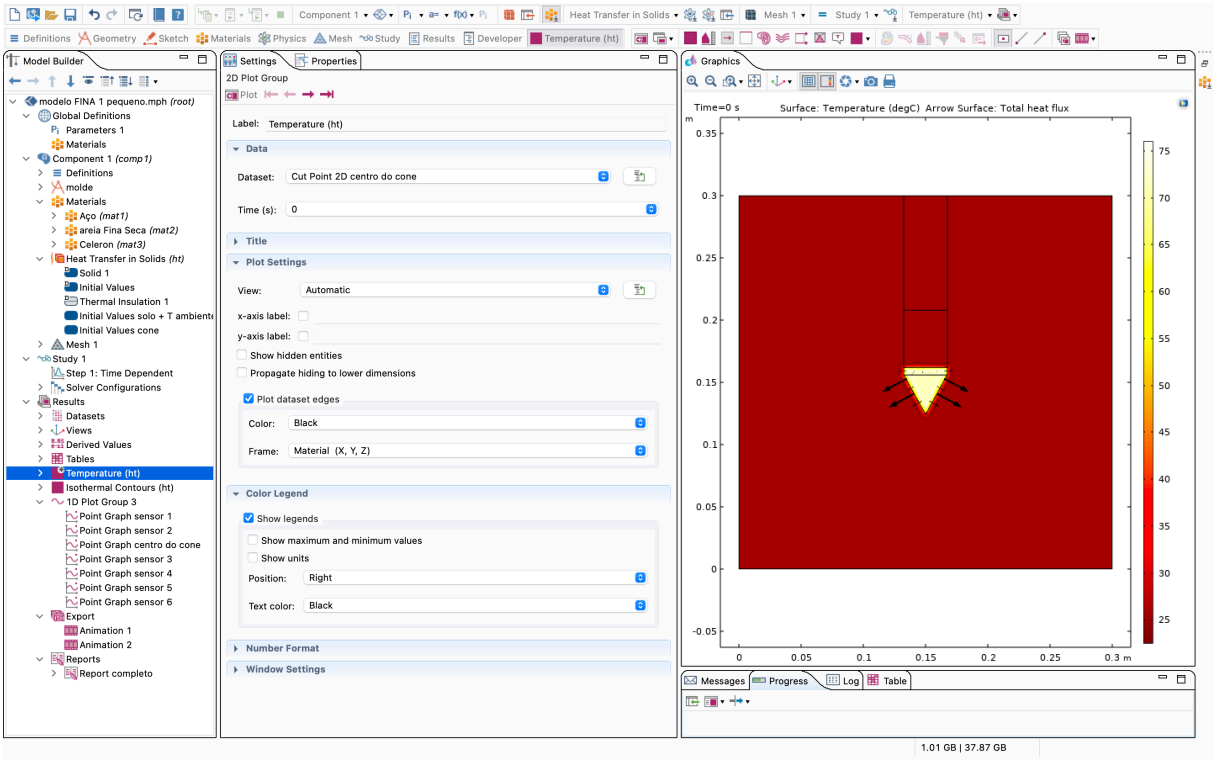
Dimensões em centímetros

Vale comentar que para os ensaios desse trabalho de conclusão de curso, o cone apresenta apenas o sensor de temperatura, não aferindo os demais parâmetros básicos do ensaio CPT convencional.

3.5 MODELOS NUMÉRICOS UTILIZANDO O SOFTWARE

Em paralelo aos modelos experimentais, os dados foram lançados em um *software* de simulação numérica de uso geral que compreende a modelagem multifísica com base no método de elementos finitos, possibilitando o acesso à um banco de dados, além de estabelecer geometrias, materiais e as respectivas propriedades do objeto. Traz funcionalidades específicas de transferência de calor como ferramenta complementar. Realizará a plotagem bidimensional do comportamento observado nos elementos, com auxílio de uma escala de cores. A identidade visual da plataforma pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 – Análise da Transferência de Calor do cone para o solo através do *software*

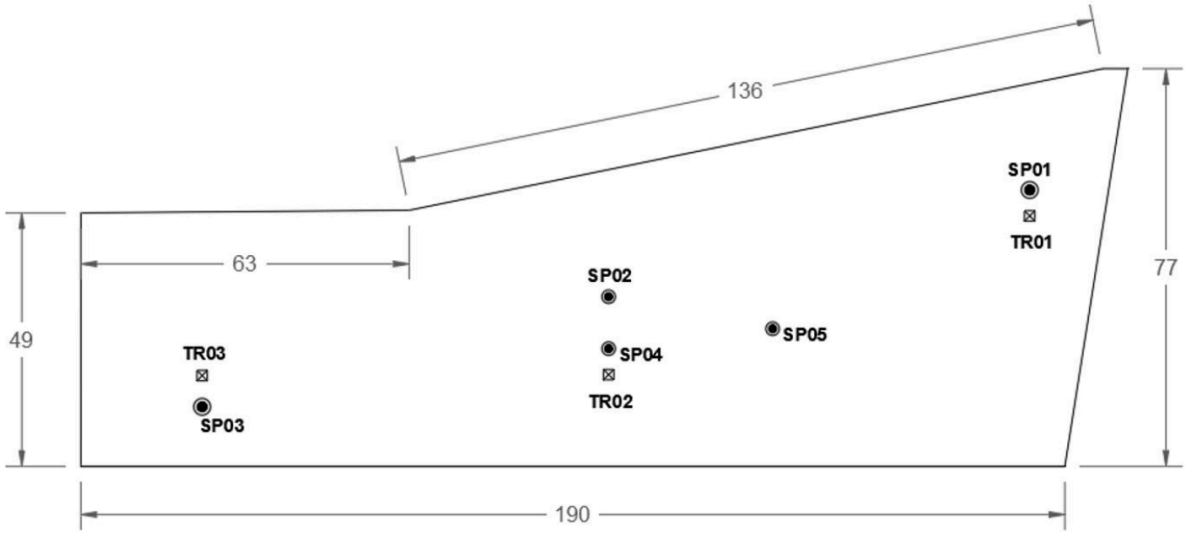


Com o conhecimento do comportamento da condutividade térmica do solo nos modelos experimentais e numéricos, sabe-se o nível de assertividade dos ensaios laboratoriais e conclui-se a viabilidade de utilização do sistema.

3.6 APLICAÇÃO DO MÉTODO NO CAMPO EXPERIMENTAL

O programa experimental inclui a aplicação do método no campo experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) localizado no interior do estado do Paraná. Esse campo abrange uma área de 11.419 m² de extensão e possui um terreno com delimitações irregulares. Ademais, segundo as pesquisas de Tonus *et. al.* (2022) já foram realizados cinco furos através de sondagens à percussão (SPT) para o conhecimento e caracterização do solo regional em laboratório entre os anos de 2018 e 2021, assim como, coleta de amostras deformadas e indeformadas das trincheiras, para ensaios de caracterização laboratorial e ensaios de cisalhamento direto e adensamento uniaxial, respectivamente. A localização dos furos de sondagem realizados para caracterização e coleta de amostras pode ser observada por meio da Figura 20.

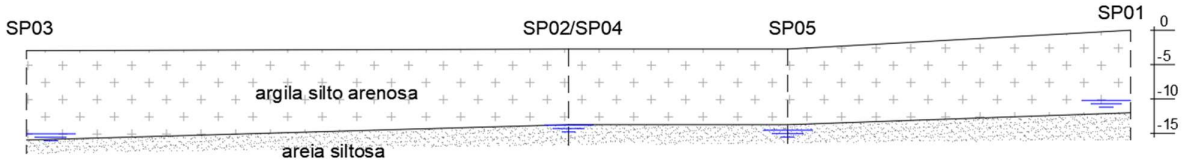
Figura 20 – Dimensões do campo experimental em metros e localização dos furos de sondagens e trincheiras



FONTE: TONUS *et. al.* (2022).

Para mais, após algumas investigações geotécnicas, sabe-se que o solo do campo experimental é composto por uma camada espessa de um pouco mais de 10 metros de argila silto-arenosa e abaixo contém uma camada de areia siltosa, conforme a Figura 21.

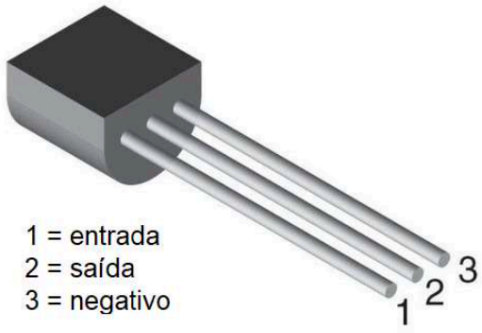
Figura 21 - Perfil geológico-geotécnico do campo experimental



FONTE: TONUS *et. al.* (2022).

No furo SP05 adicionou-se 16 sensores de aferição de temperatura ao longo de uma barra de aço de 12 metros de comprimento, que funciona como guia. Os sensores foram dispostos em pares nas profundidades de 80cm; 2,80m; 4,30m; 5,80m; 7,30m; 8,80m; 9,80m e 11,80m com base na superfície do solo. Abaixo, na Figura 22 pode-se visualizar o sensor de temperatura, modelo LM35, responsável por medir a temperatura com base na tensão elétrica. A equivalência se dá a cada 10mV, o qual registra-se 1ºC.

Figura 22 – Sensor de temperatura LM35



FONTE: TONUS *et. al.* (2022).

Tais temperaturas são registradas três vezes na semana, desde setembro de 2021, e anota-se a temperatura marcada em cada sensor, bem como, a temperatura ambiente. Na Figura 23 observa-se as ligações elétricas às quais estão conectadas aos sensores, assim como, na Figura 24 observa-se uma bateria de 9 volts conectada aos cabos e o multímetro medindo a intensidade da corrente elétrica.

Figura 23 – Terminações dos fios conectados aos sensores de temperatura

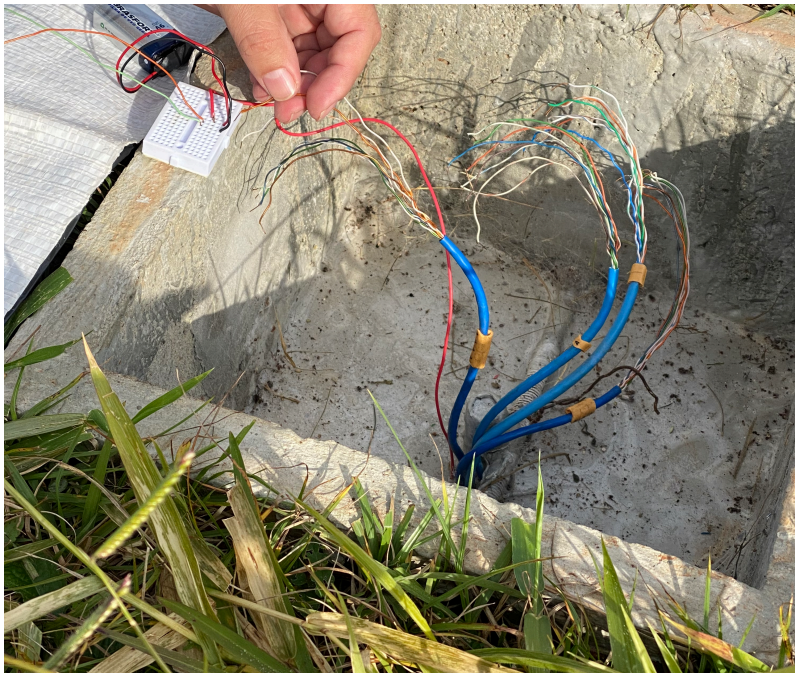
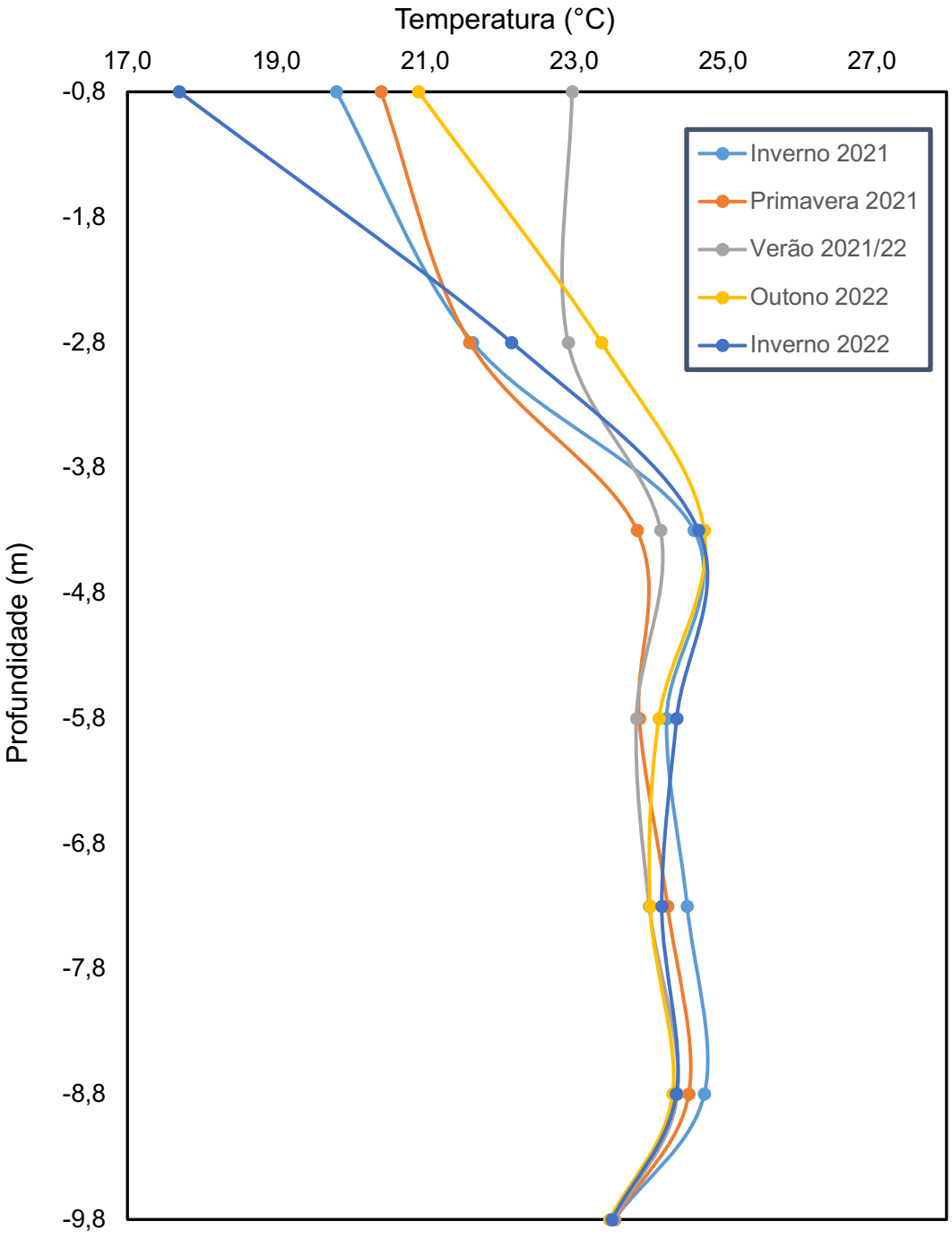


Figura 24 – Multímetro aferindo a intensidade da corrente elétrica em cada sensor

A plotagem dos dados pode ser visualizada na Figura 25, na qual afere as médias das temperaturas das quatro estações do ano, marcada por características bem definidas. Além disso, observa-se um comportamento semelhante ao mencionado na Figura 2, comprovando a hipótese baseada na revisão de literatura de que o solo tem mudanças de comportamento quando se relaciona a profundidade com as estações do ano.

Figura 25 – Temperaturas do Campo Experimental



Para este trabalho, propõem-se realizar o ensaio do cone térmico (TCT) no campo experimental aplicando os conceitos comprovados em laboratório, de forma a analisar a viabilidade, rentabilidade e capacidade de implantação de estacas geotérmicas na região sul do Brasil.

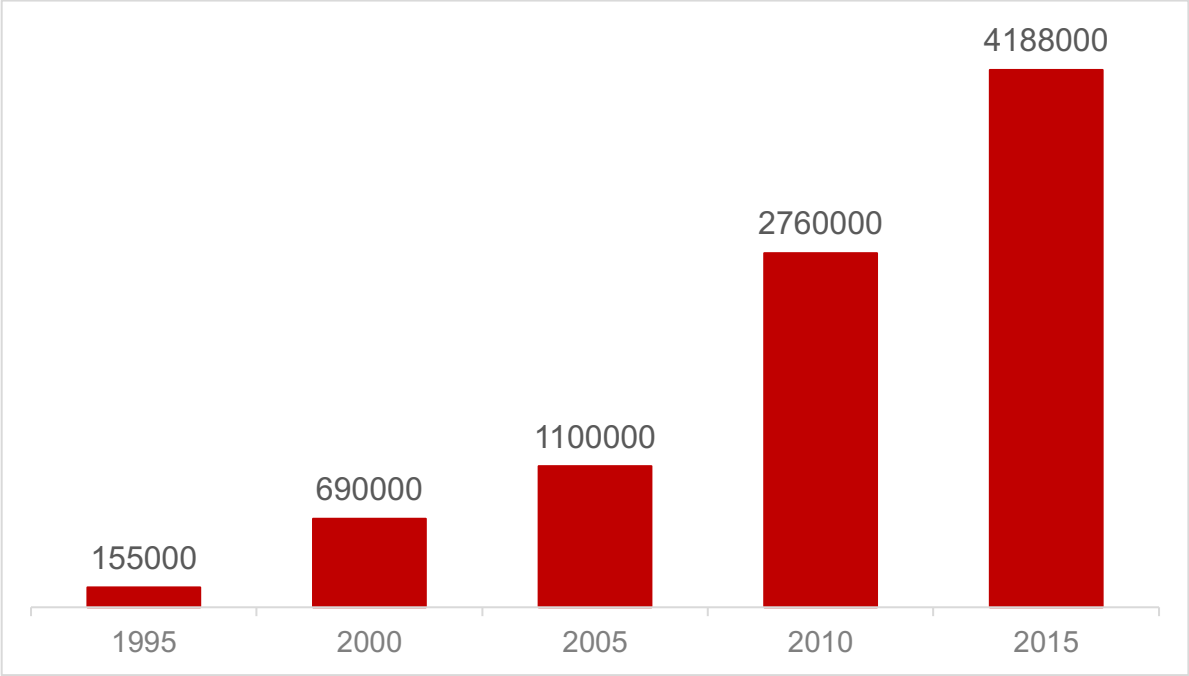
4. BANCO DE DADOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS

O primeiro registro do conceito de bombas de calor geotérmicas surgiu em 1912 proveniente de uma patente suíça. Os principais focos de estudo nesse modelo energético deram-se após a Segunda Guerra Mundial e na década de 1970 por conta da crise do petróleo (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2014).

Ademais, no início da década de 1980, cidades austríacas e suíças aumentaram o uso de elementos geotérmicos acoplados às fundações. Em primeiro lugar, surgiram as fundações em sistemas horizontalizados (valas) e nos anos seguintes, difundiram-se o uso em estacas e paredes-diafragma (BRANDL, 2006).

A Figura 26 apresenta dados compilados do crescimento do número de instalações geotérmicas de 1995 e 2015 em âmbito mundial. É visível que os índices de 2015 aumentaram 27 vezes, quando comparados com os primeiros números de 1995. Para mais, houve um aumento expressivo, de aproximadamente um terço, de instalações geotérmicas de 2010 para 2015.

Figura 26 – Crescimento Anual do Número de Instalações Geotérmicas Globais

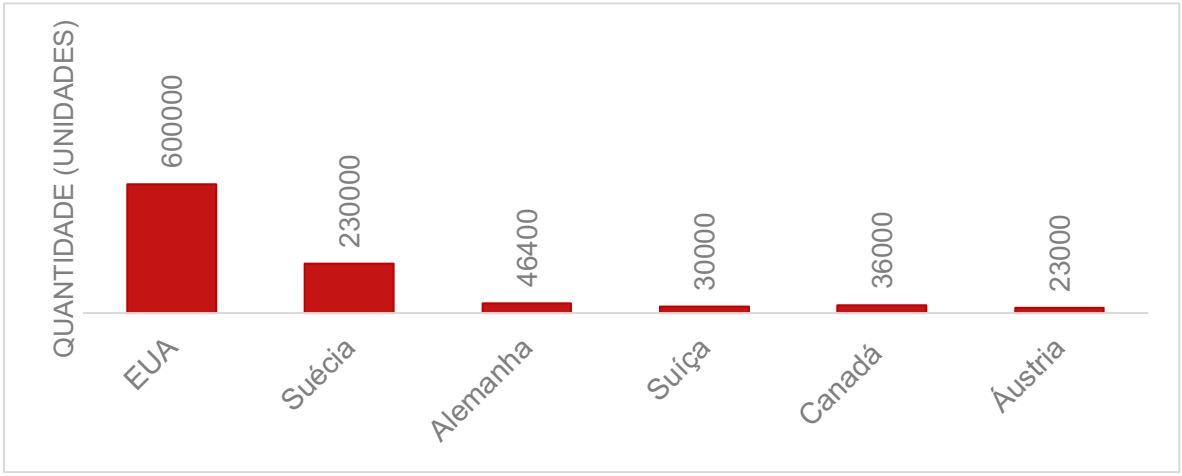


FONTE: Adaptado de LUND; BOYD, 2016.

No ano de 2004, os países europeus e norte-americanos lideravam o número de instalações geotérmicas existentes, totalizando aproximadamente 1.100.000 instalações em um âmbito global, ainda assim, consistia em uma tecnologia pouco difundida, visto a Figura 27. (LUND et. al., 2004 apud BARCELOS, 2018).

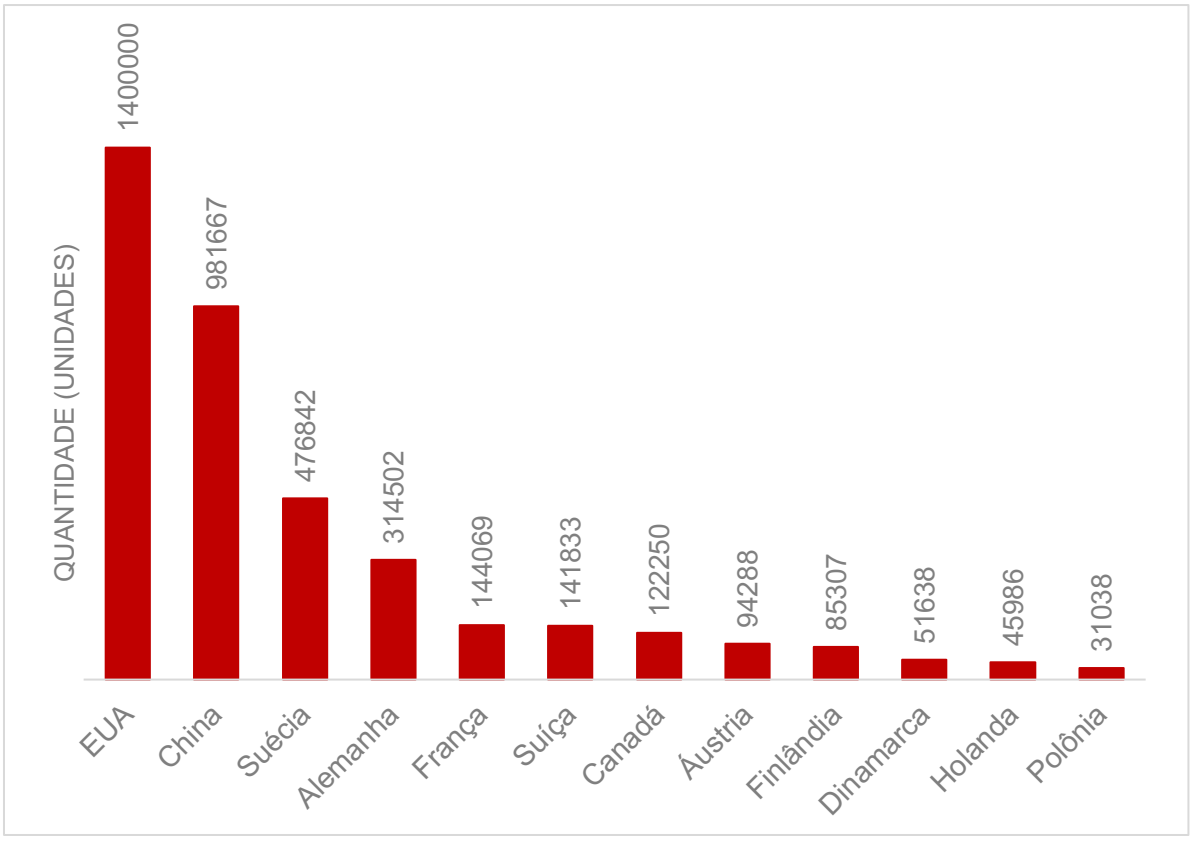
Nota-se que após 10 anos, o EUA manteve a posição de liderança com 1.400.000 instalações, número que supera o total existente no panorama mundial em 2004, conforme a Figura 28. Além disso, em 2014, salienta-se que a China e a Suécia apareciam na sequência, seguido pelos países europeus.

Figura 27 – Número de Instalações Geotérmicas em 2004



FONTE: Adaptado de BARCELOS, 2018.

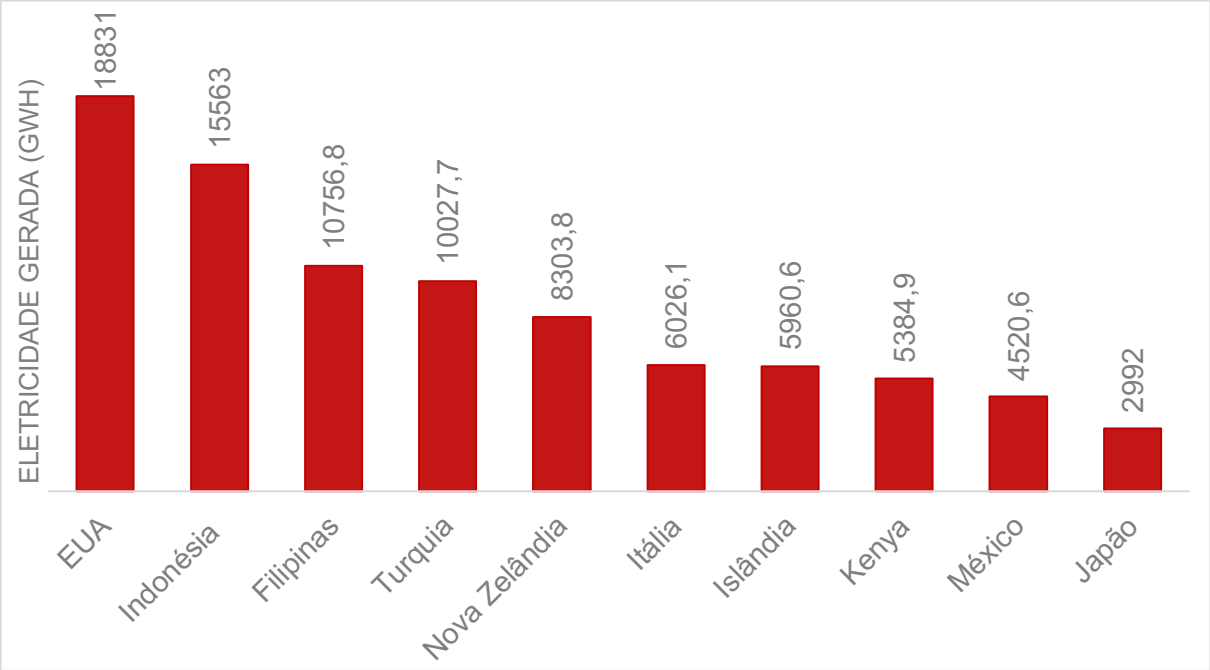
Figura 28 – Número de Instalações Geotérmicas em 2014



FONTE: Adaptado de SILVA PEREIRA, 2019.

De acordo com os dados publicados pela International Renewable Energy Agency (IRENA, 2022) os EUA lideram o quantitativo de eletricidade geotérmica gerada em 2020, com a produção de 18.831 GWH de potência, tais números quase dobram a quantidade energética produzida pelas Filipinas e Turquia, países que se encaixam como 3º e 4º lugar na categorização, em concordância com a Figura 29.

Figura 29 – Quantidade de Energia Geotérmica produzida em 2020



FONTE: IRENA, 2022.

Ademais, condizente com o proposto na metodologia, a Tabela 1 expõe dados de condutividade térmica registrados em ensaios já realizados em solos brasileiros, em equivalência com a taxa de troca de calor aferida por metro de estaca implantada. O intervalo de condutividades térmicas transita de 1,99 a 3,10 W/m.K em campos de pesquisa localizados em São Paulo e no Rio de Janeiro. Todavia, valores baixos de taxas de trocas de calor por metro de estaca não refletem necessariamente à baixas condutividades térmicas.

O Eurocode (CEN 341 N525 2011 *apud* BRUNELLI SANTOS, 2020) informa que condutividades térmicas superiores à 1,70 W/m.K são apontados como alta condutividade térmica, viabilizando o uso de estacas geotérmicas no local, resultando em efeitos satisfatórios.

Tabela 1 – Banco de dados

Referência	Localização	Condutividade Térmica (W/m.K)	Taxa de Troca de Calor por metro (W/m)
Bandeira Neto (2015)	São Carlos (SP)	3,10	variável de 79,0 à 110,0
Morais (2017)	São Carlos (SP)	2,44	não há informações
Ferreira (2017)	Campos dos Goytacazes (RJ)	2,15	valor médio de 45,99
		2,41	
		2,59	
Brunelli Santos (2020)	Campos dos Goytacazes (RJ)	2,02	90,31
		2,25	107,89
		1,99	200,38

FONTE: Adaptado de BRUNELLI SANTOS (2020).

Os dados apresentados servem como base para os ensaios em laboratório, bem como, demonstram o potencial energético em solos tropicais brasileiros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS

Duas areias naturais, extraídas do rio Tibagi, na região de Ponta Grossa, foram submetidas à ensaios granulométricos, pelo peneiramento grosso (grãos de 50 à 2mm), seguido da sedimentação e análise em um período de 24 horas e através do peneiramento fino (1,2 à 0,075mm). Cada uma, por sua vez, apresentam de forma majoritária os grãos finos e médios característicos, conforme visualizado na Tabela 2.

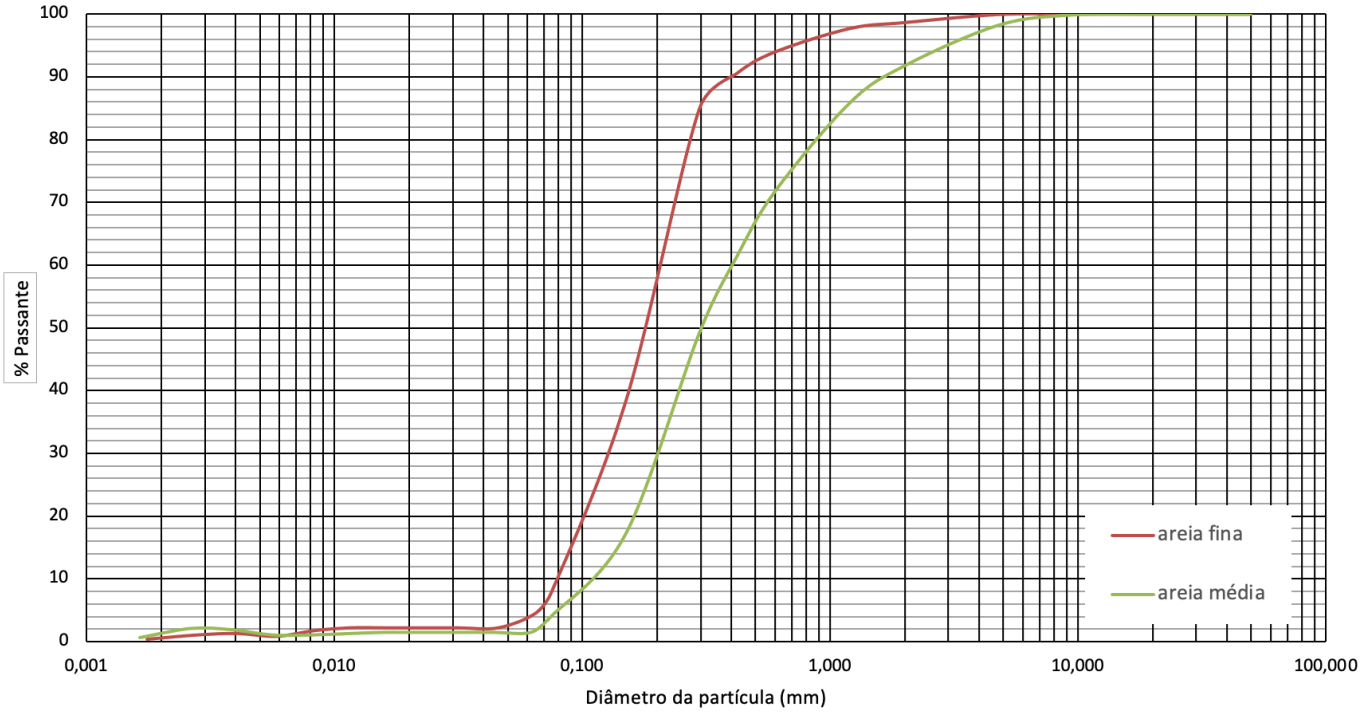
Tabela 2 – Porcentagem granulométrica das areias

Materiais	Diâmetro (mm)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)
Pedregulho	6	2	8
Areia Grossa	2	4	20
Areia Média	0,6	34	**42**
Areia Fina	**0,2**	**55**	28
Silte	0,06	3	0
Argila	0,002	2	2

Em seguimento, vale constar que a areia fina de coloração amarela do Rio Tibagi possui massa específica real dos grãos de 2,654 g/cm³, extremamente semelhante à areia média do Rio Tibagi que apresenta densidade real de 2,655 g/cm³.

Na sequência, os dados foram plotados em um gráfico, assim como demonstrado na Figura 30.

Figura 30 – Curvas granulométricas



Ademais, calculou-se os índices de vazios máximo e mínimo, parâmetros fundamentais para que seja estabelecido os limites máximos e mínimos de compacidade adotado por tais areias.

Em um primeiro momento, o índice de vazios máximo é demonstrado na Figura 31, na qual apresenta o tubo rígido e a aparelhagem aplicada no ensaio e o molde preenchido com solo, momento prévio ao rasamento do excesso de material. O processo repete-se três vezes, de forma a obter-se três valores de massa.

Figura 31 – Ensaio de índice de vazios máximo

A massa específica aparente seca é a razão da massa de solo seco pelo volume do molde. A média dos três valores compõem a massa específica aparente seca mínima. Por fim, o índice máximo de vazios é resultante da razão da massa específica dos grãos do solo (δ – determinado no ensaio de massa específica) pela massa específica aparente seca mínima ($\gamma_{s\,mín}$), menos um, segundo a Equação 6.

Equação 6 – Índice de Vazios máximo

$$e_{máx} = \frac{\delta}{\gamma_{s\,mín}} - 1$$

Para a situação da amostra com granulometria fina, resulta em 0,80, bem como, 0,70 para a areia média.

Na sequência, foi feito o ensaio de índice de vazios mínimo, sendo o arranjo mais compacto dos grãos de solo. O método requer o uso de um cilindro de Proctor com volume nominal de 1000cm³ soldado à base, tubo-guia, disco base de sobrecarga perfurado e com dispositivo para centralização de sobrecarga, bem como, a própria sobrecarga de seção circular com alça, que supre uma pressão de 13,8 kPa. Tais elementos são apresentados na Figura 32.

Figura 32 – Aparelhagem para ensaio de índice de vazios mínimo

O ensaio exige as medições de diâmetro e altura do molde com paquímetro. Vale ressaltar que o solo deve ser previamente homogeneizado, garantindo umidade constante, para que com a assistência de uma concha ou funil, o conjunto molde e tubo-guia seja preenchido com o material, assegurando um excesso de 1 a 2 centímetros acima do molde. Golpeia-se as paredes externas do conjunto com uma régua metálica de forma a contribuir com o recalque da areia.

Fixa-se o conjunto à mesa vibratória e adiciona-se a sobrecarga padrão, conforme mostrado na Figura 33. O conjunto foi vibrado por 10 minutos.

Figura 33 – Conjunto molde e sobrecarga anexado à mesa vibratória

Ao desmontar a aparelhagem, o solo é rasado ao molde e os resíduos limpos com auxílio de pincéis, bem como, apresentado na Figura 34. Pesa-se a massa do molde ocupado com areia e o ensaio é repetido três vezes, de maneira à obter-se três valores de massa.

Figura 34 – Molde com material rasado

O índice de vazios mínimo se dá em função da Equação 7, em que δ indica a massa específica dos grãos do solo (em g/cm³) e $\gamma_{s\,máx}$ a massa específica aparente seca máxima (em g/cm³).

Equação 7 – Índice de Vazios mínimo

$$e_{mín} = \frac{\delta}{\gamma_{s\,máx}} - 1$$

Com efeito, tem-se a Tabela 3 que resume os valores adquiridos com o auxílio dos ensaios. Nota-se que, tanto o índice de vazio máximo, quanto o mínimo, possuem valores superiores para a areia fina quando comparada à areia média, sugerindo maior compactação à medida que há aumento da granulometria.

Tabela 3 – Resultados dos Índices de Vazios máximo e mínimo

	Índice de Vazios máximo	Índice de Vazios mínimo
FINA	0,80	0,59
MÉDIA	0,70	0,43

Para mais, analisa-se a forma dos grãos para cada granulometria, que pode classificar-se como bem graduado à mal graduado. A Equação 8 demonstra o coeficiente de não uniformidade, que tem como variáveis o diâmetro equivalente às porcentagens que passam de 60% (D_{60}) e 10% (D_{10}) na curva granulométrica.

Equação 8 – Coeficiente de Não Uniformidade

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Já, a Equação 9 é responsável por calcular o coeficiente de curvatura dos grãos, na qual, D_{30} é a porcentagem passante em 30% na curva granulométrica.

Equação 9 – Coeficiente de Curvatura

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Por último, a Tabela 4 apresenta um compilado dos resultados calculados. Conclui-se que quanto menor o coeficiente do CNU, mais uniforme é o solo (CNU<3). Logo, a areia fina é mais uniforme (2,63) em confronto com a areia média (3,33). Para além, a areia fina é bem graduada já que (1<CC<3) enquanto a areia média é considerada mal graduada.

Tabela 4 – Formato dos Grãos das areias

	FINA	MÉDIA
γ_S	2,654	2,655
D_{10}	0,08	0,12
D_{30}	0,14	0,20
D_{60}	0,21	0,40
CNU	2,63	3,33
CC	1,17	0,83

5.2 ENSAIOS LABORATORIAIS – MODELO DO TANQUE CILÍNDRICO

Foram pré-determinados modelos com composições que variam umidade e compacidade à fim de avaliar a condutividade térmica do solo sujeito à tais condições. Para tanto, o modelo inicial foi realizado em um tanque cilíndrico, o qual acomoda 0,13m³ de solo, dividido conforme camadas apresentadas na Figura 17.

Para tal ensaio, a compacidade é variável de 40 e 80%, enquanto, a umidade de 5 e 15%. O peso específico relativo à cada modelo é calculado em função da densidade real dos grãos (ρ), índice de vazios (e) e da variação da umidade (h), demonstrada pela Equação 10.

Equação 10 – Peso Específico

$$\gamma = \frac{\rho}{1+e} \times \frac{1+h}{100}$$

O índice de vazios priorizado para o cálculo consta na Tabela 5, seguindo a Equação 11, que por sua vez, apresenta como incógnitas a compacidade relativa (CR) e o índice de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$).

Equação 11 – Índice de Vazios

$$e = \left(\frac{CR}{100} \times (e_{máx} - e_{mín}) \right) - e_{máx}$$

Tabela 5 – Índice de Vazios para os modelos

	CR (%)	Índice de Vazios
FINA	40	0,70
	80	0,64
MÉDIA	40	0,58
	80	0,53

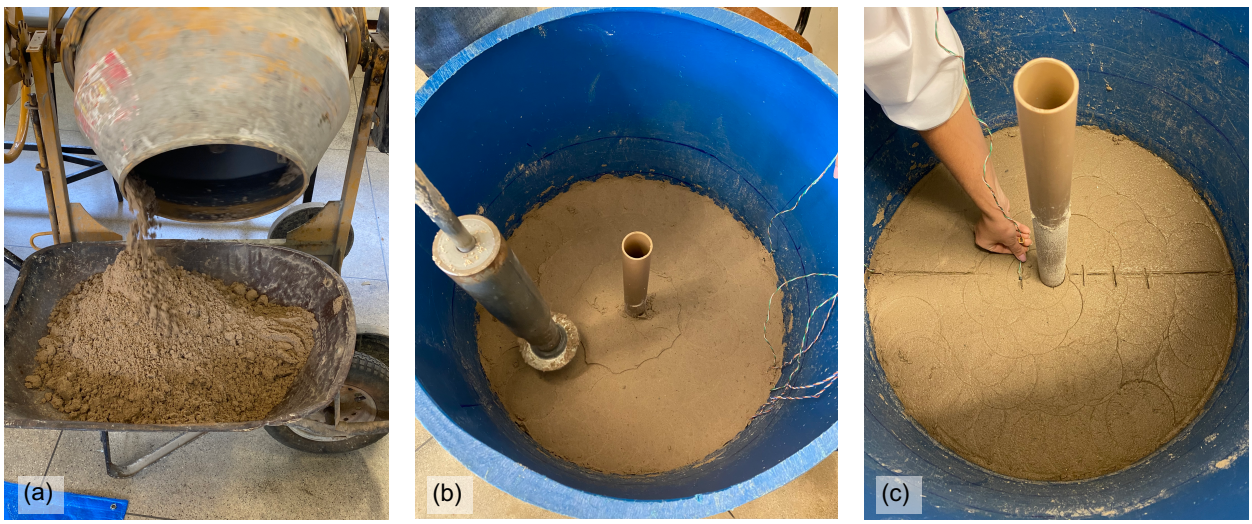
Sendo assim, a Tabela 6 resume a densidade relativa à cada modelo desenvolvido, de forma a auxiliar na determinação da quantidade de material necessária.

Tabela 6 – Dados de compacidade, umidade e densidade para os modelos

modelo		Umidade (%)	Massa Específica (g/cm³)
FINA	1 com 40% compacidade	5	1,640
	2 com 80% compacidade	5	1,700
	3 com 40% compacidade	15	1,800
	4 com 80% compacidade	15	2,000
	5	Seca	1,560
MÉDIA	6 com 40% compacidade	5	1,760
	7 com 80% compacidade	5	1,820
	8 com 40% compacidade	10	1,850
	9 com 80% compacidade	10	1,910
	10	Seca	1,680

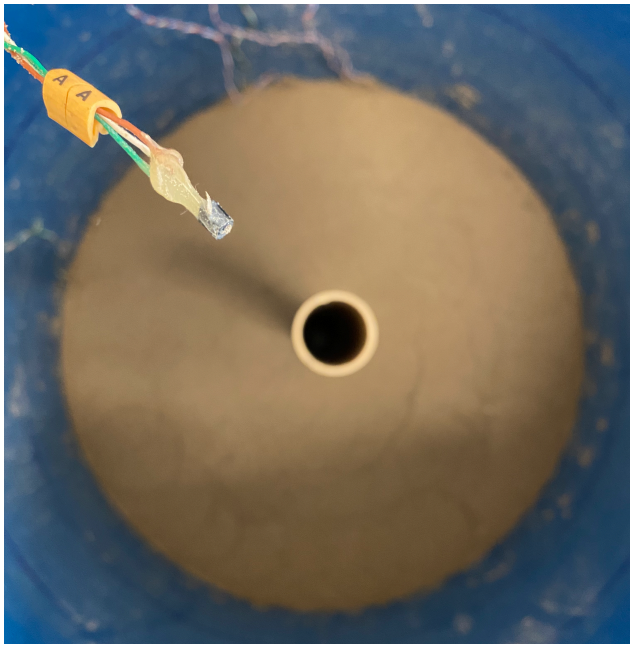
Ademais, cabe explicar que para cada modelo, o solo foi misturado com água com o auxílio de betoneira, de forma a garantir uma mistura homogênea. E à cada camada, o material foi compactado com um peso padrão composto por 7,5kg em uma recorrência de 4 golpes para a maior compacidade, bem como, 2 sequências de golpes para a menor compacidade. O tubo de PVC é inserido apoiado na primeira camada, de forma a sustentar o espaço adequado para a inserção posterior do cone. É importante salientar que para este modelo, o cone é apenas colocado, não provocando calor derivado do atrito lateral e resistência de ponta. Enquanto, os sensores que aferem a temperatura do solo, foram inseridos de acordo com o espaçamento notório no esquema representativo da Figura 17. A sequência de fotos na Figura 35, detalha os principais pontos de execução do modelo.

Figura 35 – Passos para a execução do modelo, (a) solo misturado com água na betoneira, (b) compactação da camada e (c) inserção dos sensores de temperatura



As seis unidades dos sensores térmicos são do modelo LM35 e foram isolados eletricamente, promovendo durabilidade quando expostos à ambientes úmidos, visto que possuem o princípio de funcionamento relacionado com a medição da tensão elétrica. O sensor é evidenciado na Figura 36, logo, percebe-se que há junção de três fios elétricos, estes compõem uma entrada, uma saída e um ponto negativo.

Figura 36 – Sensor LM35



Por conseguinte, ao finalizar a compactação das seis camadas propostas, o cone é aquecido em água quente até atingir 70ºC. Tal temperatura é acompanhada por meio do arduíno que registra a temperatura marcada no cone. Sendo assim, o cone é colocado dentro do tubo que atua como espaçador e neste instante, o ensaio é iniciado. O arduíno coleta os dados dos sensores e do cone à cada 5 segundos, enviando-os à uma planilha Excel, durante 2 horas, até a completa dissipação do calor concentrado pelo cone. Estas etapas são demonstradas através da Figura 37.

Figura 37 – (a) Cone aquecendo e (b) Coleta dos Dados com o arduíno

Ao término do ensaio, o modelo é desmontado e limpo. É importante coletar amostras de solo do interior do molde, à fim de analisar a umidade presente. Pesa-se as amostras na condição ambiente e pesa-se após a secagem em estufa, de maneira à concluir a umidade do material durante o ensaio, para validar a porcentagem estipulada. Unido à isso, é coletado uma cápsula indeformada para a conferência da densidade. Os processos são representados na Figura 38.

Figura 38 – (a) Cápsulas em secagem na estufa e (b) Determinação da Umidade e Densidade

A Figura 39 mostra um exemplo da coleta de dados através do arduíno, percebe-se o decaimento da temperatura do cone, aferida por meio do tempo 0, assim como, o aumento lento e gradual da temperatura dos demais sensores, que estão

localizados no solo. A calibração dos resultados é realizada mais tarde, como uma forma de estabelecer um padrão de referência.

Figura 39 – Coleta de Dados

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Time	tempo	temp0	Calibr. temp0	temp1	Calibr. Temp1	temp2	Calibr. Temp2	temp3	Calibr. Temp3	temp4	Calibr. Temp4	temp5	Calibr. Temp5	temp6	Calibr. Temp6
2:21:57 PM	59	73,173	72,685	18,45	18,404	19,069	18,629	19,366	18,323	19,069	18,204	18,816	18,285	19,238	18,610
2:22:02 PM	65	72,301	71,793	18,522	18,478	19,038	18,597	19,294	18,248	19,032	18,165	18,857	18,328	19,147	18,516
2:22:08 PM	70	70,151	69,593	18,494	18,449	19,069	18,629	19,397	18,356	18,972	18,100	18,853	18,324	19,163	18,533
2:22:13 PM	75	68,014	67,406	18,497	18,452	18,978	18,534	19,378	18,336	19,032	18,165	18,832	18,302	19,141	18,510
2:22:19 PM	81	66,107	65,455	18,494	18,449	19,035	18,593	19,335	18,291	18,978	18,107	18,847	18,318	19,238	18,610
2:22:24 PM	86	64,442	63,751	18,485	18,440	19,032	18,590	19,335	18,291	18,994	18,124	18,819	18,288	19,216	18,588
2:22:30 PM	92	62,96	62,234	18,497	18,452	19,003	18,560	19,403	18,362	19,035	18,168	18,86	18,331	19,235	18,607
2:22:35 PM	97	61,523	60,764	18,522	18,478	19,072	18,632	19,316	18,271	19,06	18,195	18,86	18,331	19,222	18,594
2:22:40 PM	102	60,148	59,357	18,46	18,414	19,088	18,649	19,366	18,323	19,044	18,177	18,891	18,364	19,266	18,639
2:22:46 PM	108	59,045	58,228	18,5	18,455	19,082	18,642	19,322	18,277	19,038	18,171	18,816	18,285	19,207	18,578
2:22:51 PM	113	58,038	57,197	18,5	18,455	19,069	18,629	19,266	18,219	19,044	18,177	18,76	18,227	19,232	18,604
2:22:57 PM	119	57,188	56,327	18,485	18,440	19,1	18,661	19,3	18,254	19,025	18,157	18,832	18,302	19,278	18,652
2:23:02 PM	124	56,382	55,503	18,475	18,430	19,022	18,580	19,319	18,274	19,053	18,187	18,772	18,239	19,213	18,585
2:23:08 PM	130	55,57	54,672	18,513	18,469	19,044	18,603	19,328	18,284	19,038	18,171	18,785	18,253	19,294	18,668
2:23:13 PM	135	54,745	53,827	18,55	18,507	19,041	18,600	19,313	18,268	19,053	18,187	18,81	18,279	19,203	18,574
2:23:18 PM	140	53,985	53,050	18,563	18,521	19,022	18,580	19,297	18,251	19,088	18,225	18,888	18,361	19,16	18,530
2:23:24 PM	146	53,254	52,302	18,588	18,546	19,019	18,577	19,335	18,291	19,085	18,221	18,869	18,341	19,122	18,491
2:23:29 PM	151	52,51	51,540	18,578	18,536	19,066	18,626	19,313	18,268	19,057	18,191	18,907	18,380	19,257	18,630
2:23:35 PM	157	51,804	50,818	18,56	18,517	19,013	18,571	19,338	18,294	19,072	18,207	18,941	18,416	19,238	18,610
2:23:40 PM	162	51,163	50,162	18,616	18,575	19,032	18,590	19,347	18,304	19,05	18,184	18,95	18,425	19,238	18,610
2:23:46 PM	167	50,373	49,353	18,638	18,598	19,041	18,600	19,363	18,320	19,088	18,225	18,919	18,393	19,282	18,656
2:23:51 PM	173	49,663	48,627	18,616	18,575	19,091	18,652	19,325	18,281	19,153	18,294	19,007	18,485	19,278	18,652
2:23:56 PM	178	48,994	47,942	18,675	18,636	19,06	18,619	19,35	18,307	19,153	18,294	18,947	18,422	19,25	18,623
2:24:02 PM	184	48,435	47,370	18,65	18,610	19,075	18,635	19,307	18,262	19,16	18,302	18,969	18,445	19,303	18,678
2:24:07 PM	189	47,857	46,779	18,71	18,672	19,038	18,597	19,316	18,271	19,2	18,345	19,053	18,533	19,269	18,642
2:24:13 PM	195	47,313	46,222	18,713	18,676	19,069	18,629	19,372	18,330	19,2	18,345	19,128	18,611	19,269	18,642

5.3 ENSAIOS LABORATORIAIS – MODELO PEQUENO

Para esta etapa de ensaios, a umidade é variável de 0 à 20% e a compacidade fixa em 5%. O índice de vazios do material é calculado através da Equação 11 e tais dados são provenientes do ensaio preliminar para determinar o índice de vazios máximo e mínimo.

Estes, são publicados mediante a Tabela 7. O índice de vazios propende à ser maior à proporção que a granulometria torna-se mais fina.

Tabela 7 – Índice de Vazios para compacidade de 5%

	e máx	e mín	e calculado
FINA	0,80	0,59	0,790
MÉDIA	0,70	0,43	0,687

Foram aplicadas duas granulometrias, com o objetivo de comparar os efeitos da condutividade térmica em cada material ao variar o tamanho dos grãos.

Outrossim, o peso específico relativo à cada modelo é calculado em função da densidade real dos grãos (ρ), índice de vazios (e) e da variação da umidade (h), demonstrada pela Equação 10.

Assim, a Tabela 8 apresenta os dados de densidade e estipula-se a quantidade de material e água necessário para que se obtenha a condutividade térmica, como produto.

Tabela 8 – Dados de umidade, densidade e peso dos materiais para execução do modelo Pequeno

modelo		Umidade	Densidade (g/cm³)	Peso solo (kg)	Peso água (kg)
FINA	1	0%	1,480	26,55	0,00
	2	15%	1,710	26,55	3,98
	3	20%	1,780	26,55	5,31
MÉDIA	4	0%	1,570	28,18	0,00
	5	10%	1,730	28,18	2,82
	6	15%	1,810	28,18	4,23

É importante salientar que se adota uma compacidade mais baixa, em função da complexidade em alcançar compactações elevadas, devido a procedência de um trabalho manual, além de que a condutividade térmica não apresentou variação expressiva nos modelos maiores onde a compacidade foi variada.

Associado aos dados já indicados, o processo de execução é semelhante ao descrito para o modelo grande, uma vez que o material arenoso é homogeneizado com a quantidade recomendada de água e insere-se no balde em camadas, com leves golpes para regularizar a superfície. O cone é aquecido à 70ºC em água quente e compete evidenciar que para os modelos pequenos, o cone é cravado, ao contrário da inserção do cone nos modelos grandes. Vale comentar que apenas o cone e um sensor de controle são colocados no modelo. Os resultados são computados por intermédio do arduíno. A Figura 40 retrata a execução do ensaio.

Figura 40 – Ensaio do modelo pequeno do cone térmico para diferentes umidades

5.4 PLOTAGEM DOS RESULTADOS LABORATORIAIS

Os sensores de temperatura distribuídos no modelo do tanque cilíndrico, são plotados e exibidos na Figura 41 à 46. Constata-se que os sensores tendem a apresentar um aquecimento mais elevado à medida que se encontram próximos ao cone, que é a fonte primária de calor.

Figura 41 – Comportamento Laboratorial do Sensor 1

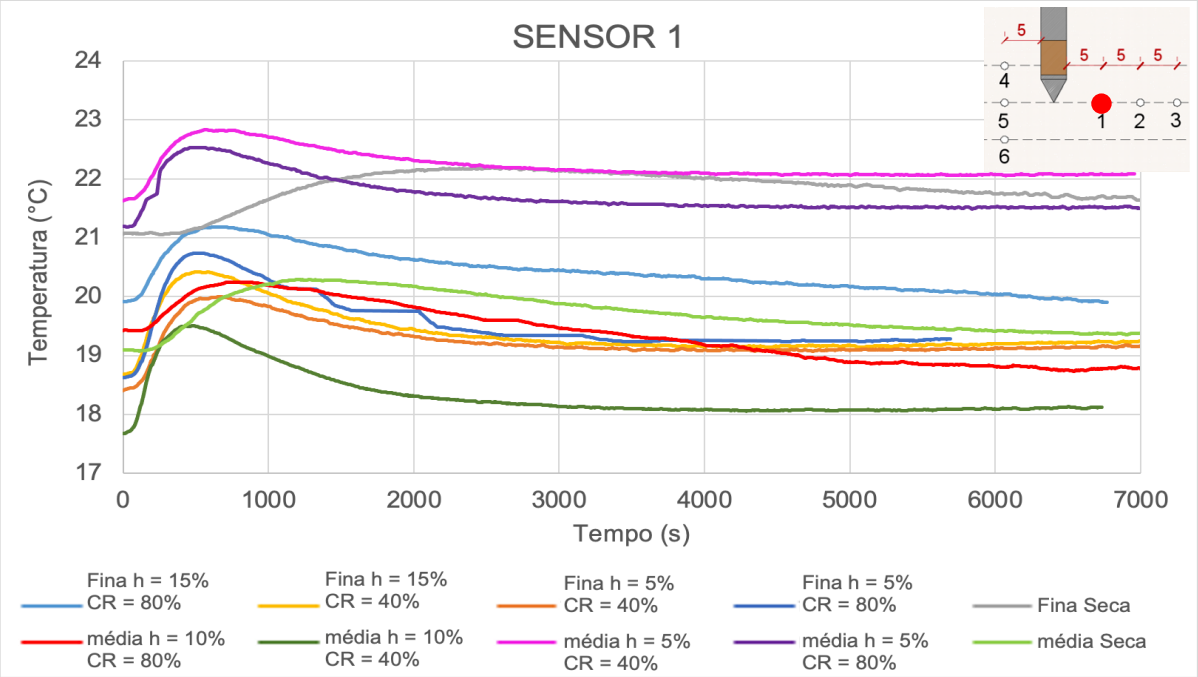


Figura 42 - Comportamento Laboratorial do Sensor 2

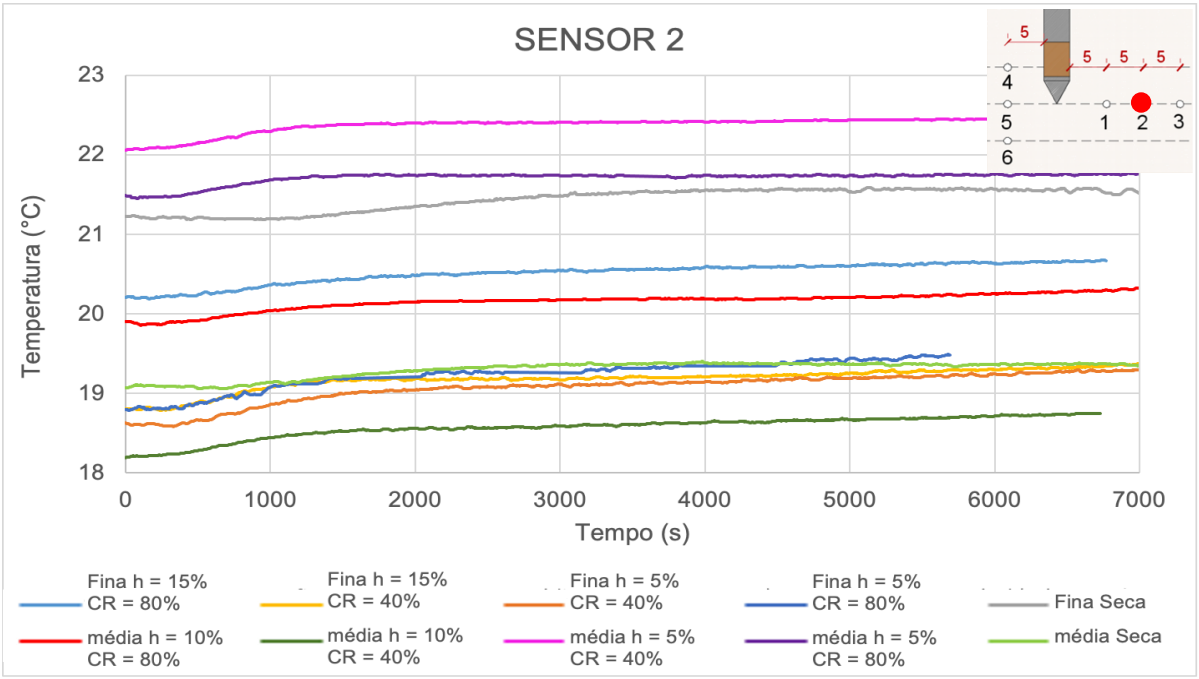


Figura 43 - Comportamento Laboratorial do Sensor 3

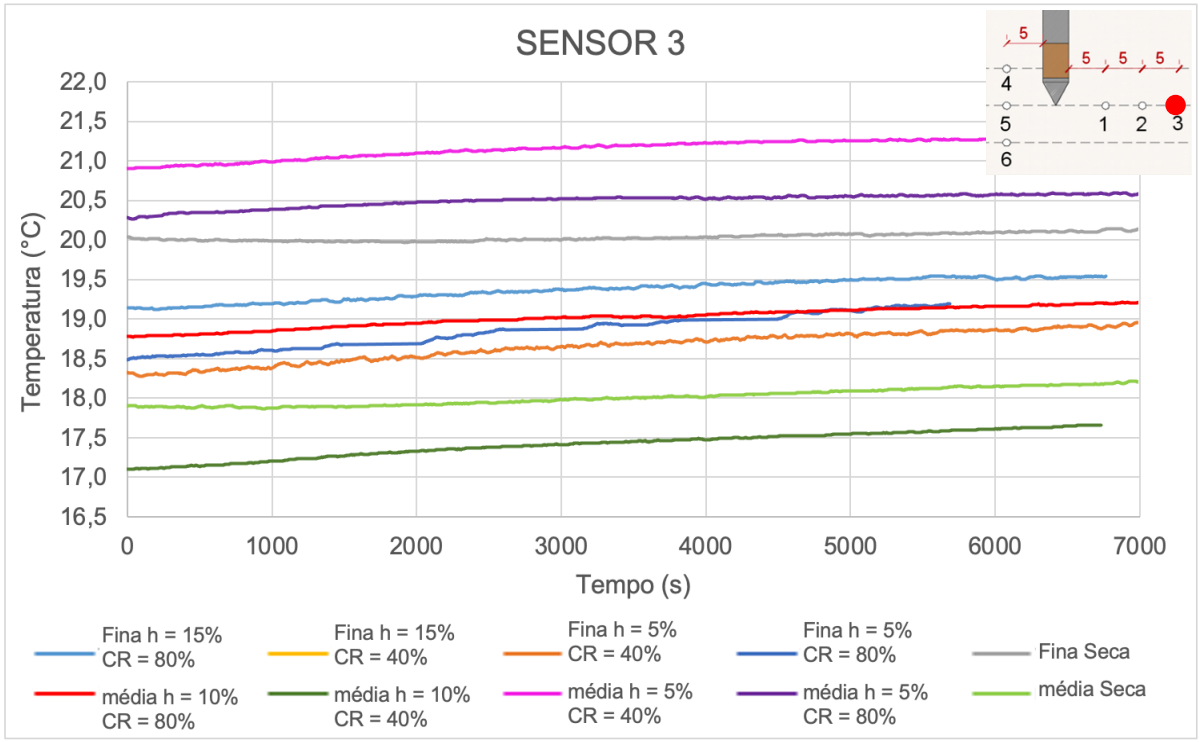


Figura 44 - Comportamento Laboratorial do Sensor 4

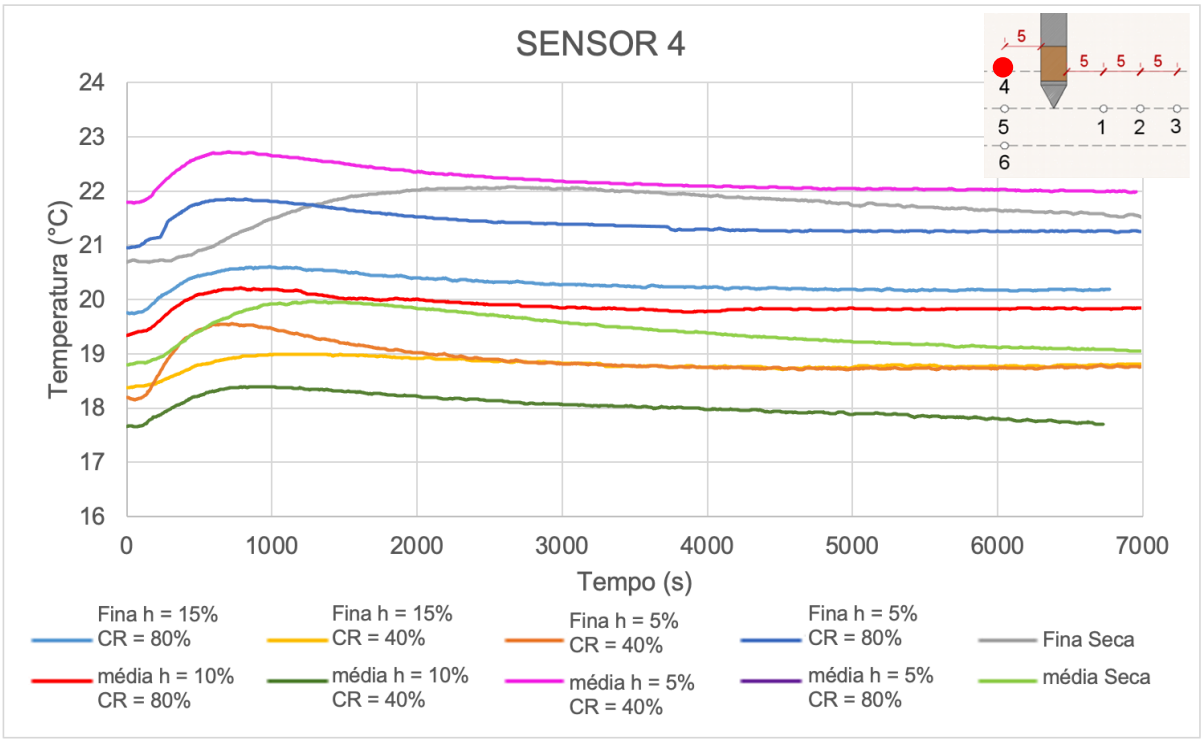


Figura 45 - Comportamento Laboratorial do Sensor 5

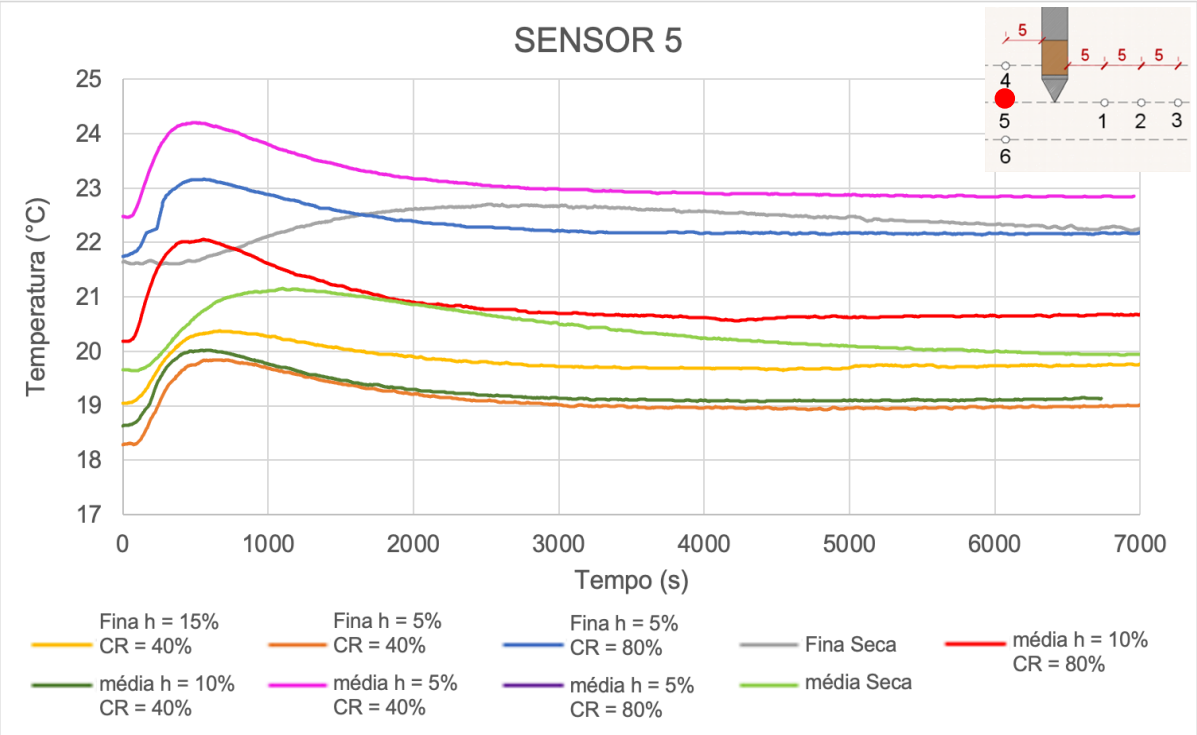
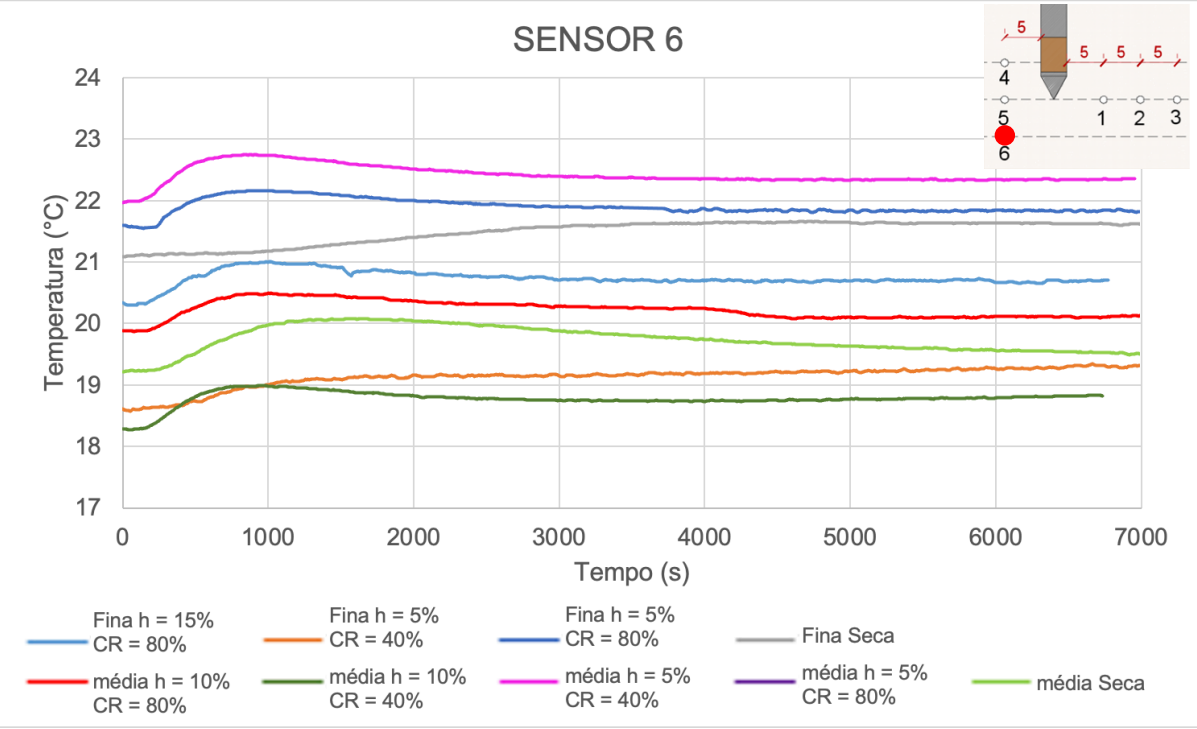


Figura 46 - Comportamento Laboratorial do Sensor 6



Já, as curvas plotadas nas Figura 47 e 48 revelam a performance do cone inserido no modelo grande, quando exposto à índices de umidade variáveis de 5, 10 e 15% combinados com a compacidade relativa de 40 e 80%. Além disso, percebe-se

que a areia fina completamente seca apresenta a tendência de decaimento lento da temperatura e atinge a constância em um patamar superior as demais combinações. Já, para as areias médias, o modelo seco tem um decaimento mais sucinto e encontra-se estável em uma faixa de temperatura similar aos modelos seguintes.

Figura 47 – Comportamento do Sensor do Cone para Areia Fina

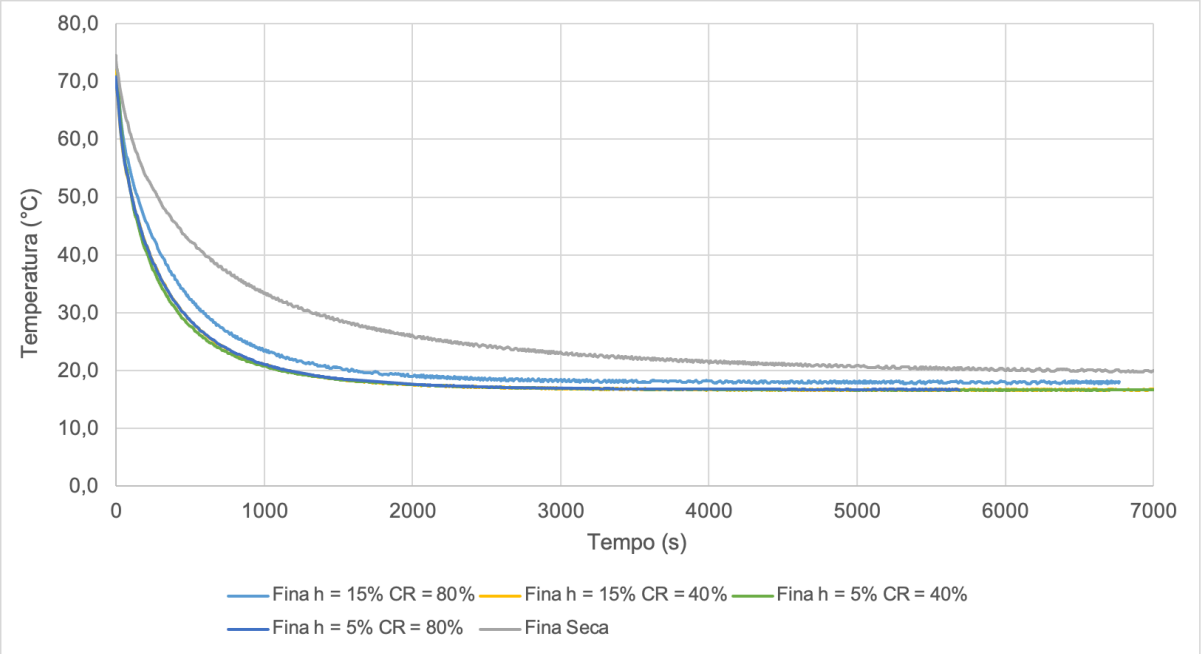
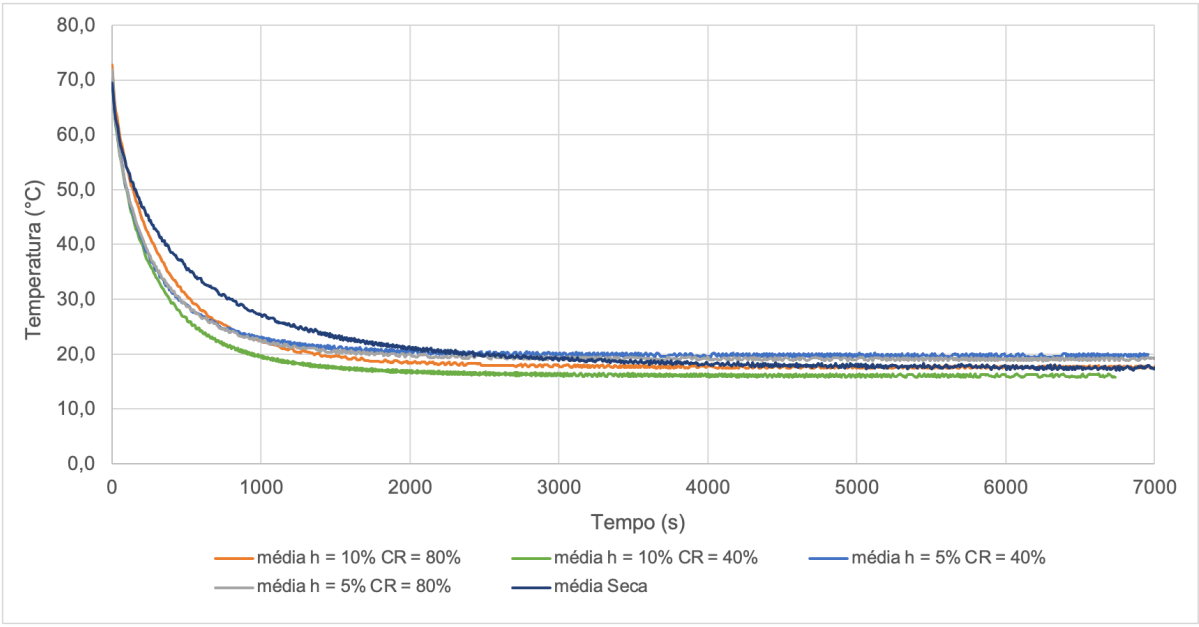
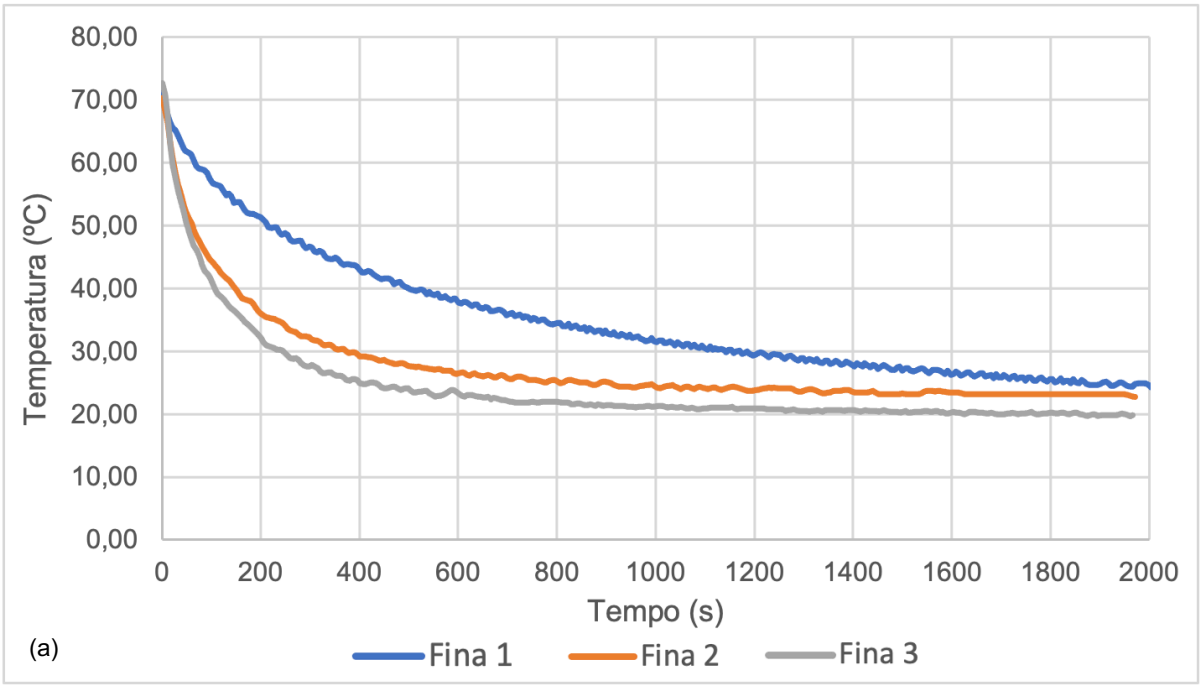


Figura 48 – Comportamento do Sensor do Cone para Areia Média

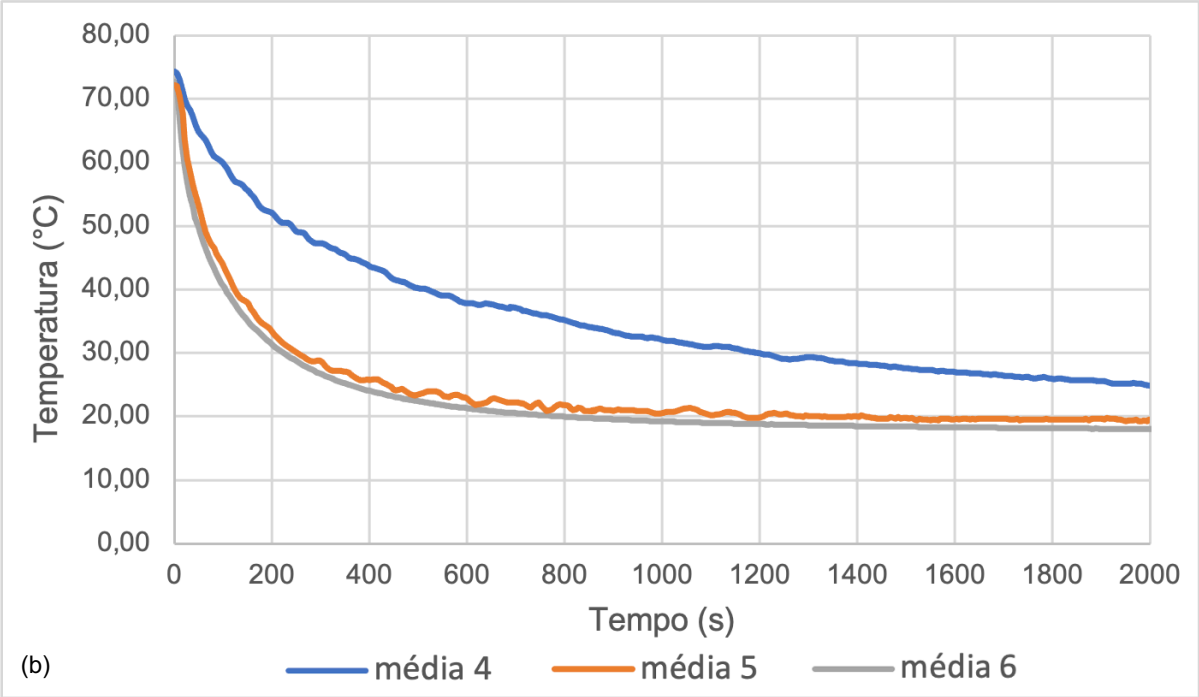


Em comparação, os dados para os modelos pequenos, foram plotados em curvas de forma a compreender o comportamento do solo quando sujeito às condições impostas, segundo a sequência na Figura 49. Constata-se que o cone inicia em aproximadamente 70ºC e estabiliza passado 1000 segundos para os modelos úmidos, enquanto, os modelos secos não encontram a estabilizada mesmo após o término do ensaio, concluindo que a condutividade do material seco é reduzida, contribuindo para um processo mais lento. Ademais, os modelos compostos com areia média tendem a estabilizar em 20 à 18ºC, bem como, os modelos com areia fina estabilizam em um patamar levemente superior, na faixa de 23 a 20ºC para os modelos úmidos. Também, os modelos secos possuem um decaimento mais acentuado, provocando uma curva mais verticalizada.

Figura 49 – Decaimento da Temperatura do cone dos modelos Pequenos (a) Areia Fina (b) Areia Média



(a)



(b)

Aliado aos dados evidenciados, convém a representação dos modelos pelo método numérico, visando comprovar o desempenho do solo, estendendo o conhecimento para simulações além dos dados experimentais disponíveis.

5.5 CÁLCULO DAS CONDUTIVIDADES TÉRMICAS

Os resultados calculados de condutividade térmica dos ensaios laboratoriais do tanque cilíndrico, segundo as fórmulas propostas por Akrouch (2016) normal e ajustada, seguindo as Equações 1 e 2, estão agrupados na Tabela 9. Percebe-se que os modelos secos apresentam condutividades inferiores e t_{50} mais elevados, bem como, à medida que se aumenta a umidade e compacidade, há redução da condutividade e aumento progressivo de t_{50}.

Tabela 9 – Condutividades térmicas calculadas por Akrouch – modelo tanque cilíndrico

modelo			t_{50} (segundos)	λ (W/m.K)	λ ajustada (W/m.K)
FINA	1	h = 5% e CR = 40%	146	0,62	0,86
	2	h = 5% e CR = 80%	168	0,54	0,74
	3	h = 15% e CR = 40%	163	0,56	0,77
	4	h = 15% e CR = 80%	206	0,44	0,61
	5 Seca		271	0,34	0,46
MÉDIA	6	h = 5% e CR = 40%	136	0,66	0,92
	7	h = 5% e CR = 80%	129	0,69	0,97
	8	h = 10% e CR = 40%	157	0,58	0,80
	9	h = 10% e CR = 80%	189	0,48	0,66
	10 Seca		227	0,40	0,55

Ao analisar os dados, convencionou-se a aplicação do método em modelos menores, já que os modelos grandes apresentaram pouquíssima sensibilidade de condutividade térmica ao variar umidade e granulometrias das areias, bem como, o recipiente grande impossibilitou a execução de modelos com porcentagens de umidade mais elevadas, já que as camadas de solo possuem variações consideráveis na umidade, porque a água tende a escoar para o fundo do recipiente, expressando um material mais úmido no fundo e mais seco na superfície do modelo. Além disso, houve dificuldade na cravação do cone, por este motivo, foi apenas colocado nos ensaios grandes. Assim, com o intuito de minimizar o espaço de percolação da água, o modelo pequeno é aplicado, além de promover agilidade e reduzir a quantidade de material e esforço físico. Foi determinado combinações que abrangem compacidade de 5%, bem como, umidades variáveis de 0 à 20%, representando modelos completamente secos, como, modelos úmidos, visando atingir níveis mais altos de umidade, em busca de variações perceptíveis de condutividade.

Para os modelos pequenos, a condutividade é calculada da mesma forma, de acordo com a Equação 1 adaptada de Akrouch, referente à dissipação da água de poro-pressão, bem como, por meio da fórmula ajustada, conforme a Equação 2.

Os valores compilados, resultantes das fórmulas indicadas são demonstrados pela Tabela 10.

Tabela 10 – Condutividades térmicas calculadas por Akrouch – modelo pequeno

modelo		t_{50} (segundos)	λ (W/m.K)	λ ajustada (W/m.K)
FINA	1	243	0,38	0,51
	2	76	1,16	1,64
	3	65	1,35	1,92
MÉDIA	4	239	0,38	0,52
	5	82	1,08	1,52
	6	70	1,26	1,79

Devido à discrepância de resultados entre os modelos de laboratório e numéricos, os quais serão evidenciados na sequência, buscou-se calcular a condutividade térmica através de outro método de interpretação além do método de Akrouch (2016), a fim de verificar os resultados obtidos. Para tanto, o método escolhido foi o método de Vardon (2019). Entretanto, para o método analítico de cálculo, segundo Vardon, tem-se um exemplo da planilha auxiliar que consta na Figura 50.

Figura 50 – Modelo de Planilha para o método Analítico Axissimétrico

Raw Data		**Time measures**		Initial temp		**for k**		
t	T	ln(t)	sqrt(t)	T0	T0_av in 10	dT	ln(T-T0)	k
0	71,52804		0			54,52804	3,998715	
5	69,92243	1,609438	2,236068	56,48130714	52,48733113	52,92243	3,968827	20,59005
10	68,09954	2,302585	3,162278	55,71520103	52,09789742	51,09954	3,933775	10,66229
16	66,60922	2,772589	4	54,96294224	51,71216775	49,60922	3,904177	6,86412
21	65,66366	3,044522	4,582576	53,89680013	51,37040659	48,66366	3,884933	5,331424
27	64,98792	3,295837	5,196152	53,11176287	51,06266962	47,98792	3,870949	4,205054
32	64,22588	3,465736	5,656854	52,26407081	50,76119768	47,22588	3,854942	3,605265
38	63,26122	3,637586	6,164414	51,53486151	50,47008228	46,26122	3,834304	3,099321
43	62,42004	3,7612	6,557439	50,71937963	50,18507006	45,42004	3,815953	2,78966
48	61,91247	3,871201	6,928203	50,17170121	49,91210279	44,91247	3,804716	2,527313
54	61,59694	3,988984	7,348469	49,76742011	49,62804718	44,59694	3,797665	2,262395
59	61,11188	4,077537	7,681146	48,7351958	43,93708944	44,11188	3,786729	2,093436
65	60,38191	4,174387	8,062258	47,81412661	43,4594663	43,38191	3,770042	1,93217
70	59,63044	4,248495	8,3666	47,08341166	43,05656412	42,63044	3,752569	1,825784
75	59,16039	4,317488	8,660254	46,92751146	42,68721345	42,16039	3,741481	1,723064

Para o primeiro modelo pequeno, os dados dos ensaios foram plotados. A Figura 51 demonstra a reação da condutividade seguindo os dados de entrada informados, calculado diretamente a partir dos dados, em fórmula numérica. Já, a Figura 52 apresenta a tangente linear até a interceptação do valor i_T no eixo y, e com a segunda equação de k, tem-se o valor de condutividade pelo meio gráfico. Segundo o autor, em sua tese, os erros do método oscilam de 2,5 à 1,2% para as fórmulas numéricas e gráficas, respectivamente. Ademais, Vardon (2019) frisa que uma falha de 0,1 no valor de interceptação do eixo y pode produzir imprecisões de até 10% no coeficiente de condutividade térmica.

Figura 51 – Gráfico Condutividade Térmica x Tempo

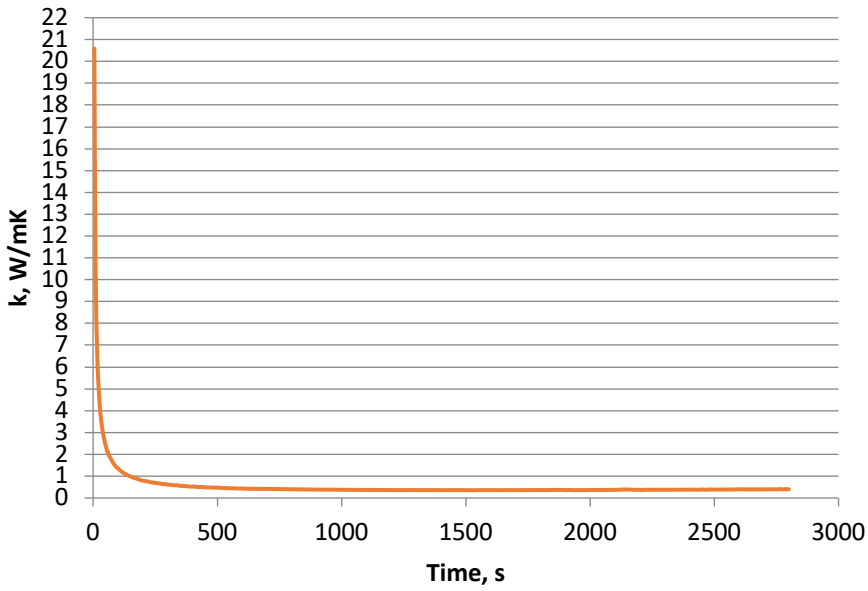
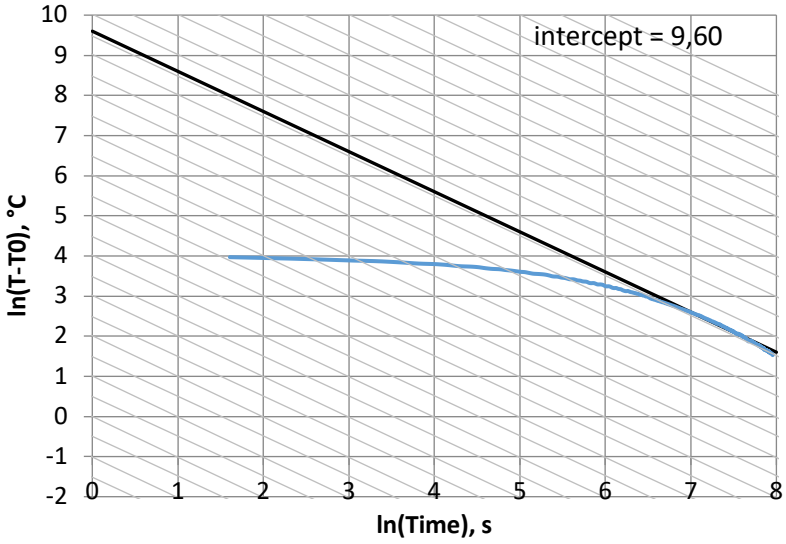


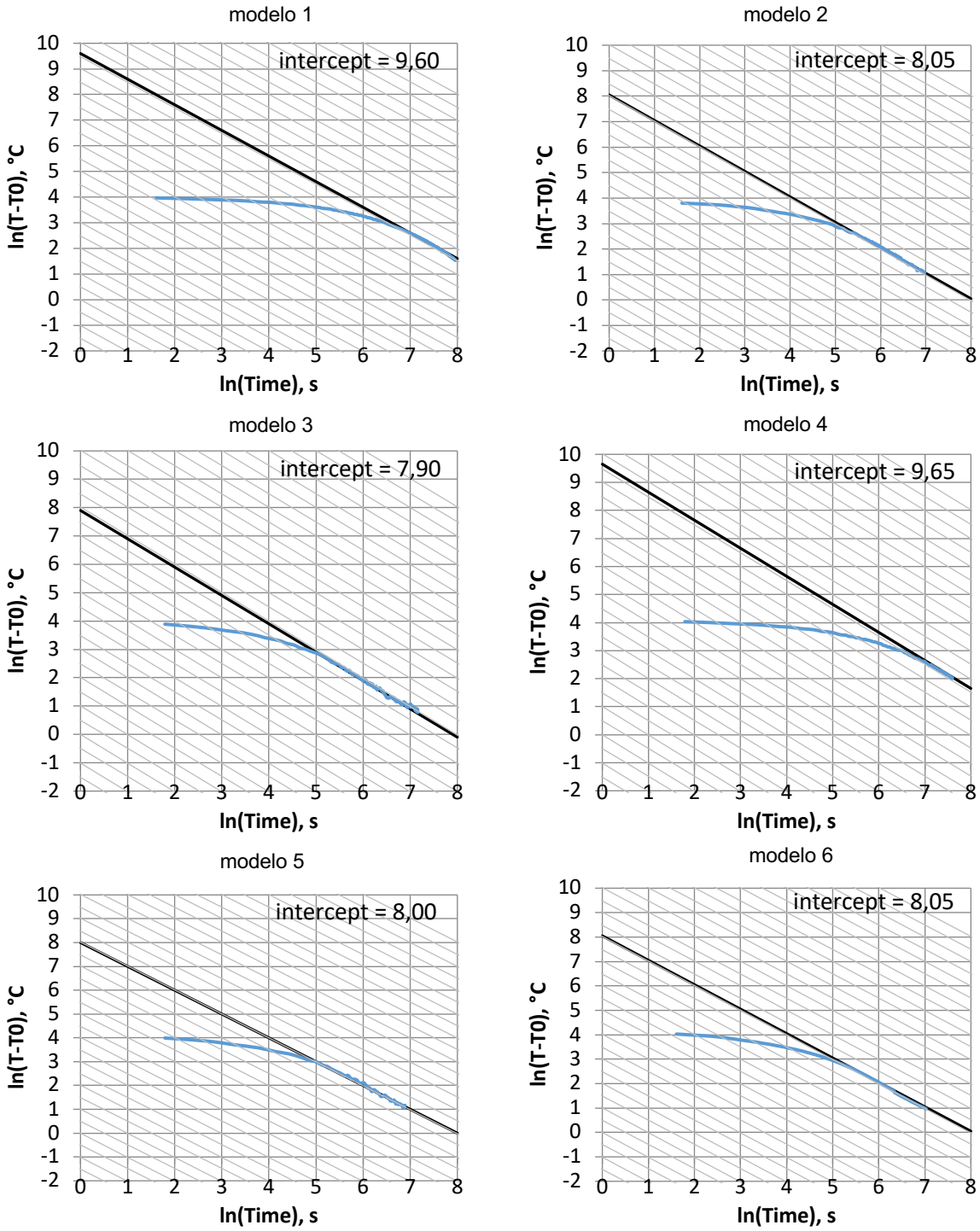
Figura 52 – Gráfico ln(T – T0) x Tempo



Para o caso publicado acima, a linha preta intercepta y em 9,60. Para tanto, a condutividade gráfica será de 0,37 bem como, a condutividade calculada é de 0,39.

Os demais modelos foram representados pelo mesmo método e são dispostos na Figura 53, onde é possível ver o valor de interceptação do eixo y.

Figura 53 - Gráfico ln(T – T0) x Tempo para os 6 modelos pequenos



As condutividades calculadas para os modelos pequenos, tanto pelo método de Akrouch (2016) quanto por Vardon (2019) são resumidas e apresentadas na Tabela 11, assim, a comparação dos resultados é facilitada.

Tabela 11 – Resumo das Condutividades Térmicas por Akrouch e Vardon

modelo	Umidade	λ Akrouch	λ Akrouch ajustado	λ Vardon calculado	λ Vardon gráfico
	%	W/m.K			
Fina 1	0	0,38	0,51	0,40	0,37
Fina 2	15	1,16	1,64	1,65	1,65
Fina 3	20	1,35	1,92	2,03	2,13
média 4	0	0,38	0,52	0,42	0,39
média 5	10	1,08	1,52	1,91	1,94
média 6	15	1,26	1,79	1,96	1,90

Os modelos secos (Fina 1 e média 4) apresentam condutividades reduzidas e similaridade entre os dois métodos. Já, à medida que os modelos úmidos elevam a porcentagem de água, a condutividade aumenta. Nota-se que o modelo com areia Fina 3 apresenta as maiores condutividades dos ensaios, uma vez que possui a maior quantidade de água, 20% de umidade.

Ademais, os modelos 2 e 6, possuem granulometrias diferentes com o mesmo teor de umidade, 15%, favorecendo uma boa comparação. Assim, identifica-se a influência do tamanho dos grãos, já que a condutividade mais elevada para o modelo 2 é de 1,65 em conferência com o valor de 1,96 para o modelo 6.

Em conclusão, pode-se dizer que a condutividade térmica sofre aumento à proporção que se eleva a umidade e o tamanho dos grãos. Ainda, os resultados entre Vardon e Akrouch foram muito semelhantes e coerentes entre si.

5.6 ENSAIOS NUMÉRICOS – MODELO DE VALIDAÇÃO

Os modelos produzidos em laboratório foram replicados em um *software* de simulação multifísica com o propósito de analisar a reação da expansão de calor quando em contato com o solo, dada as condutividades térmicas calculadas.

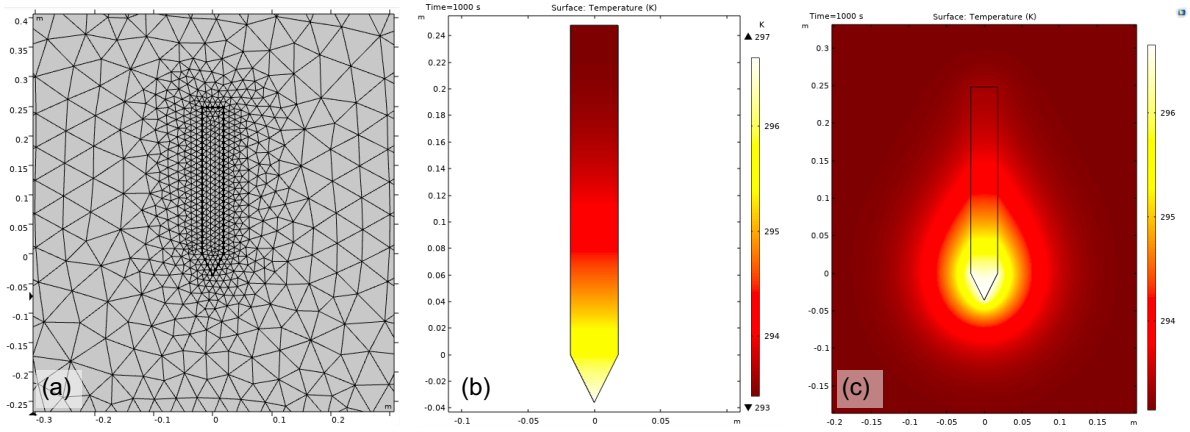
Entretanto, a validação de um modelo numérico já existente foi fundamental para a compreensão do funcionamento do programa, bem como, a validação do modelo numérico proposto. Para tanto, foi tomado como base o modelo numérico incluso na pesquisa de Vardon *et. al.* (2018). O autor recomenda a plotagem em dois estágios, o primeiro engloba apenas o cone com um Fluxo de Calor de ponta de 500W/m², dado os efeitos de resistência de ponta e atrito lateral. A segunda etapa refere-se à inclusão de solo no modelo. O modelo possui duração de 1000 segundos e a temperatura inicial é de 20ºC para ambos os materiais. Os parâmetros usados na réplica do modelo, constam na Tabela 12. Vale comentar que a condutividade adotada foi o limite máximo dentro das condutividades avaliadas no estudo.

Tabela 12 – Parâmetros do modelo de Validação

material	Parâmetro	Valor Adotado	Unidade de medida
AÇO	Condutividade Térmica	44,5	W/m.K
	Calor Específico	475	J/kg.K
	Densidade	7850	kg/m³
	Dimensões do Cone	284 × 36 (raio de 18mm)	mm
SOLO	Condutividade Térmica	3,5	W/m.K
	Calor Específico	800	J/kg.K
	Densidade	2000	kg/m³
	Dimensões do Solo	880 × 1000	mm

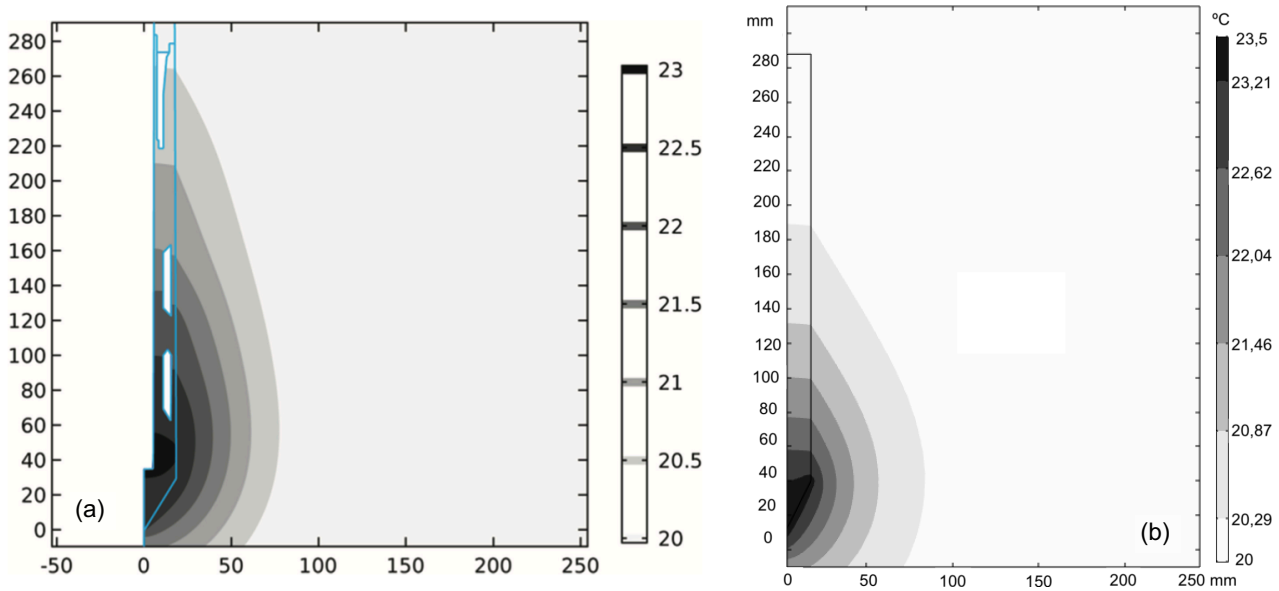
A malha consiste em elementos geométricos mais bem detalhados nas proximidades do cone, bem como, uma malha mais grosseira à medida que há um distanciamento do centro. Conseguinte, há maior fluxo de calor e variações térmicas nas áreas centrais. Esta percepção se dá através da Figura 54. Frisa-se que a temperatura final de aquecimento da ponta do cone é a mesma temperatura inicial registrada no modelo com a presença de solo, com o intuito de representar o calor gerado pela fricção do cone com o solo.

Figura 54 – (a) Malha, (b) Transferência de Calor do modelo de Validação pelo cone e (c) Transferência de Calor pelo modelo completo



Assim, no item (a) da Figura 55, tem-se o modelo realizado por Vardon (2018) e o item (b) refere-se ao mesmo modelo replicado, percebe-se uma similaridade comportamental no bulbo de calor. Vale comentar que não houve alterações térmicas perceptíveis ao desenhar os vazios preenchidos com ar, conforme o modelo original.

Figura 55 – (a) Comparação dos modelos de Validação realizado por Vardon e (b) pelo autor



FONTE: VARDON (2018) e O AUTOR (2023)

Para tanto, com o intuito de aumentar o grau de assertividade do modelo, foi escolhido alguns pontos específicos próximos ao cone para uma análise detalhada da temperatura. Estes são representados por meio da Figura 56. Na sequência, realiza-se uma trajetória comparativa de tais pontos, no qual observa-se a similaridade

térmica da modelagem numérica com os dados propostos por Vardon, conforme a Figura 57.

Figura 56 – Pontos para análise da Temperatura

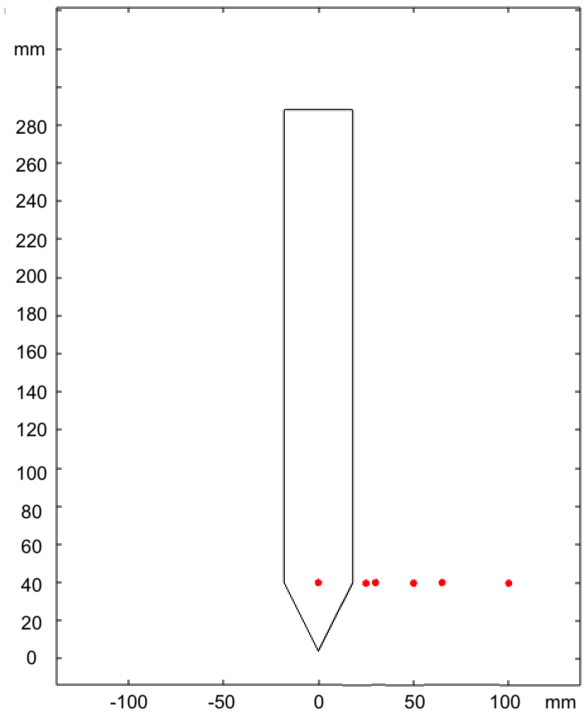
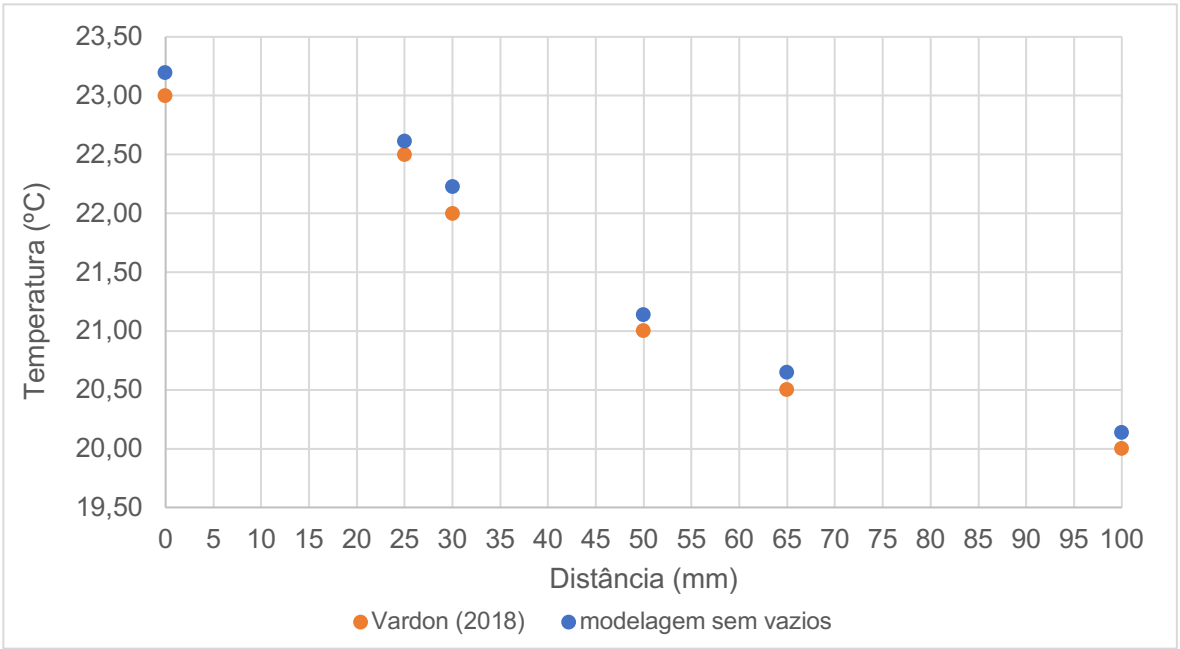


Figura 57 – Comparativo dos pontos da modelagem numérica com os dados plotados por Vardon



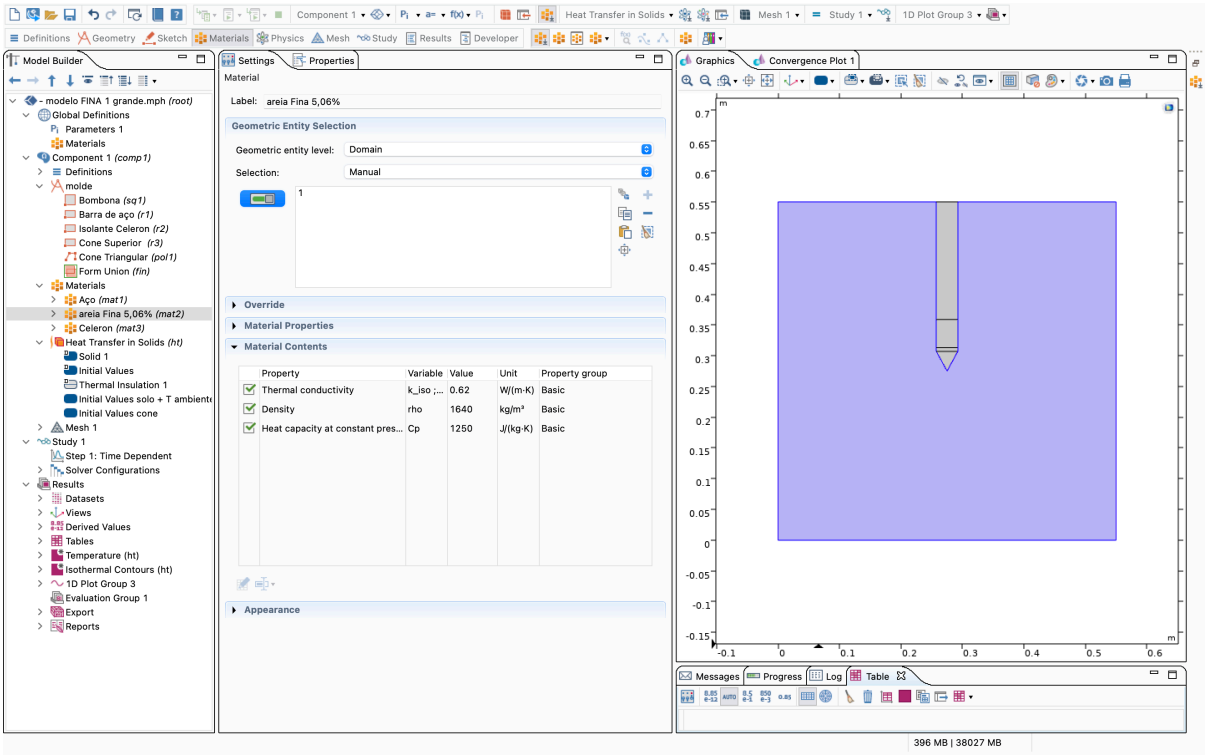
Isto posto, comprova-se a proximidade de valores e ganha-se confiabilidade de reprodução de novos modelos para uma gama de condutividades térmicas.

5.7 ENSAIOS NUMÉRICOS – MODELO DO TANQUE CILÍNDRICO

Para mais, os demais modelos elaborados em laboratório, foram replicados com o objetivo de validar o comportamento das areias quando submetidas a variações de umidade e compacidade, além da mudança da própria condutividade térmica.

A interface do *software* de Elementos Finitos é mostrada na Figura 58. O menu localizado na lateral esquerda promove o acesso rápido aos parâmetros, molde e dimensões, materiais e malha. A Física selecionada para estudo é de Transferência de Calor em Sólidos e o estudo é em função da variação do tempo em um modelo 2D. Assim, a análise se dá pela transferência de calor do cone aquecido para o solo, até atingir a temperatura ambiente.

Figura 58 – Interface do Programa Computacional



Os parâmetros de entrada para o primeiro modelo constam na Tabela 13. Foram realizadas simulações variando parâmetros de condutividade térmica e calor específico do aço, entretanto, não houve mudanças notórias nas temperaturas finais. Vale comentar que as propriedades do aço aplicadas foram extraídas da tese de Vardon (2018), seguindo o modelo de validação mencionado por Vardon, enquanto os dados do isolante Celeron, foram retirados do catálogo da empresa VICK Comércio

de Plásticos. Ambos os parâmetros (do aço e do isolante) permanecem constantes nos outros modelos.

Ademais, Andrade (2017) informa que a capacidade térmica, também chamada de calor específico é variável em decorrência da umidade, estabelecido em 900 J/kg.K para areias secas, assim como, 1250 J/kg.K para areias úmidas.

Tabela 13 – Parâmetros dos materiais

Parâmetro		Valor Adotado	Unidade de medida
AREIA	Condutividade Térmica	0,62	W/m.K
	Calor específico	1250	J/kg.K
	Densidade	1640	kg/m³
AÇO	Condutividade Térmica	44,5	W/m.K
	Calor específico	475	J/kg.K
	Densidade	7850	kg/m³
CELERON	Condutividade Térmica	0,3489	W/m.K
	Calor específico	1465,38	J/kg.K
	Densidade	1350	kg/m³

Na Tabela 14 é apresentado um compilado das informações de densidade e condutividade térmica necessárias para os demais modelos, conforme calculado nos ensaios laboratoriais.

Tabela 14 – Dados de densidade e condutividade térmica dos demais modelos

modelo		Densidade (kg/m³)	Condutividade Térmica (W/m.ºC)
FINA	1	1640	0,62
	2	1700	0,54
	3	1800	0,56
	4	2000	0,44
	5 Seca	1560	0,34
MÉDIA	6	1760	0,66
	7	1820	0,69
	8	1850	0,58
	9	1910	0,48
	10 Seca	1680	0,40

Após alguns testes, optou-se por apresentar as temperaturas reais marcadas no momento exato do início dos ensaios, tanto para o cone, quanto para o solo, de forma a reduzir a oscilação das condutividades e minimizar as imprecisões. Para tanto,

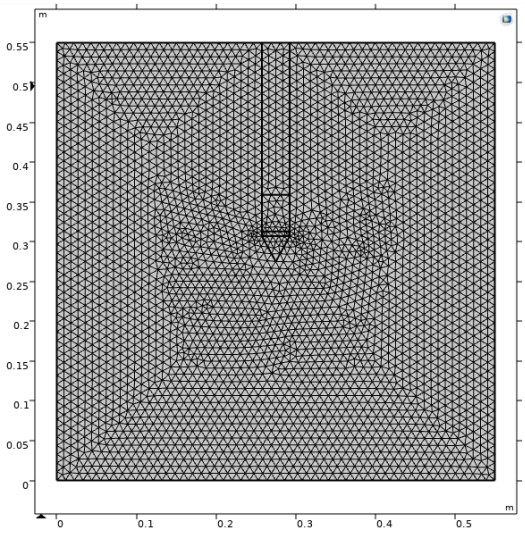
a Tabela 15 resume os dados das temperaturas em graus Celsius e em Kelvin (unidade de medida padrão do *software*).

Tabela 15 – Temperaturas iniciais do solo e do cone para cada modelo

modelo		Temperatura inicial solo		Temperatura inicial cone	
		ºC	K	ºC	K
FINA	1	18,45	291,60	73,17	346,32
	2	18,63	291,78	71,30	344,45
	3	18,71	291,86	72,57	345,72
	4	19,82	292,97	72,52	345,67
	5 Seca	21,00	294,15	74,15	347,30
MÉDIA	6	21,57	294,72	71,79	344,94
	7	21,15	294,30	72,40	345,55
	8	17,75	290,90	72,15	345,30
	9	19,44	292,59	73,22	346,37
	10 Seca	18,96	292,11	70,05	343,20

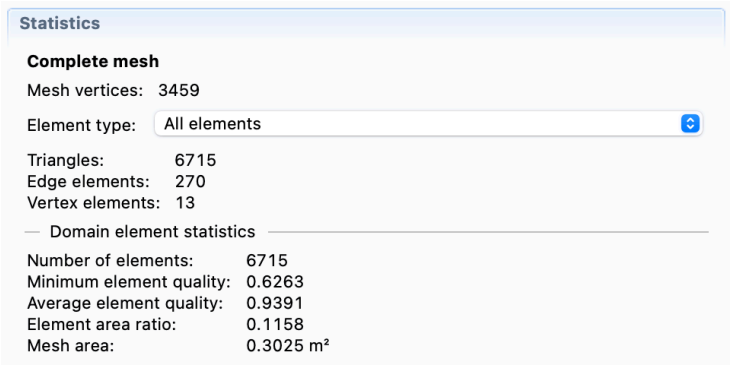
O modelo apresenta duração de 120 minutos, o equivalente à 7200 segundos, com uma malha Extra Fina, de forma a aprimorar o processamento de dados, representado na Figura 59.

Figura 59 – Malha Extra Fina



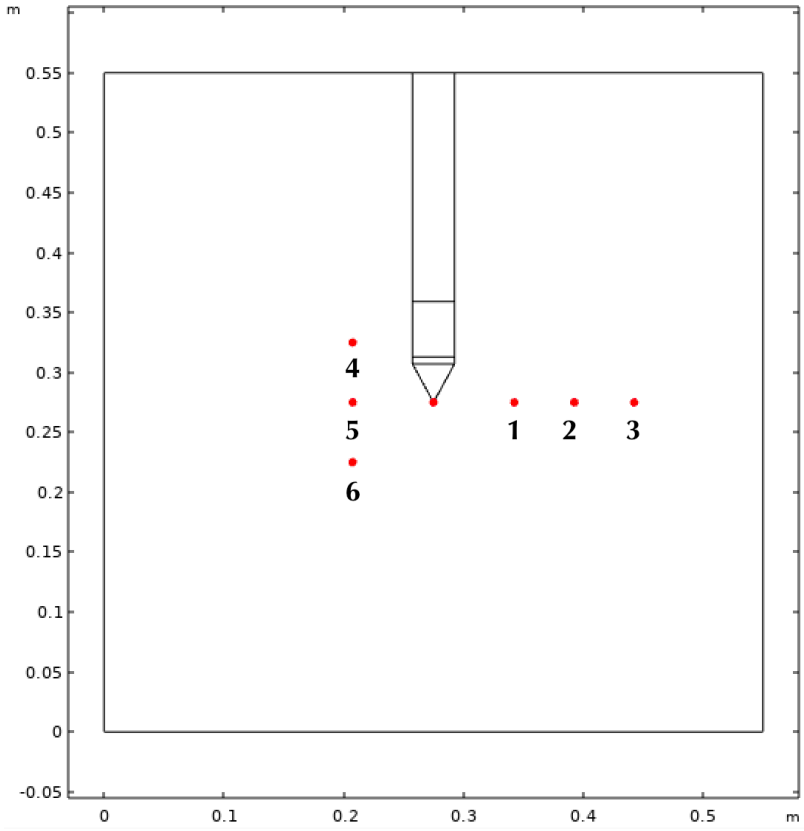
O modelo é composto por 6715 elementos, construindo uma malha com 0,3025m² de área projetada, transmitido pelas estatísticas do próprio programa, conforme Figura 60.

Figura 60 – Estatística dos elementos da malha



Na sequência, escolhe-se pontos para análise da temperatura e plotagem dos Gráficos, condizentes com a localização dos sensores e do cone no modelo, de acordo com a Figura 61.

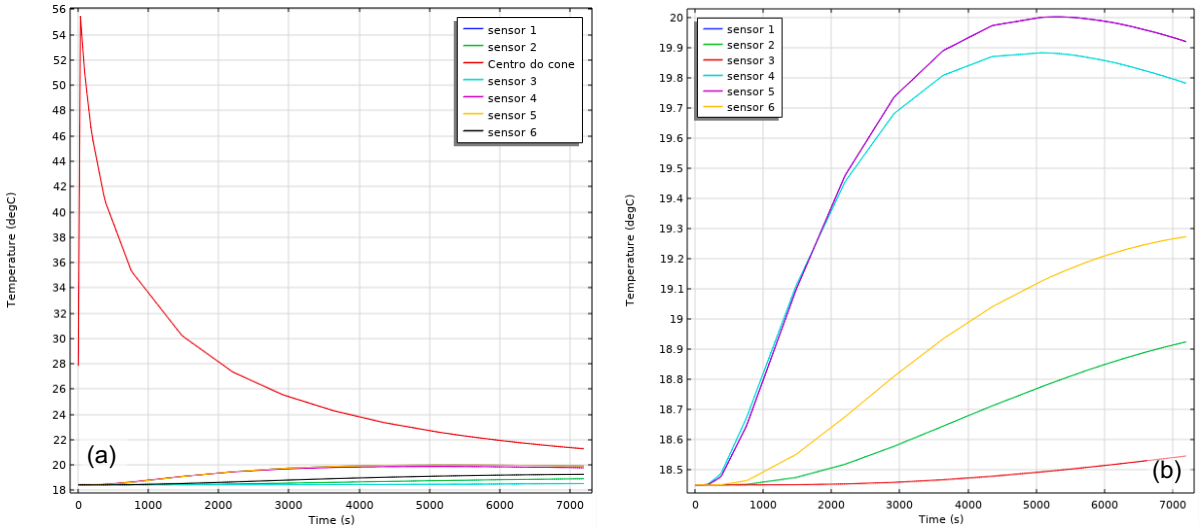
Figura 61 – Pontos de plotagem



Para tanto, o gráfico à esquerda registra todos os pontos plotados demonstrados acima. Percebe-se que em poucos segundos, o cone possui um acréscimo acelerado, seguido pelo decaimento esperado da temperatura. Já, no

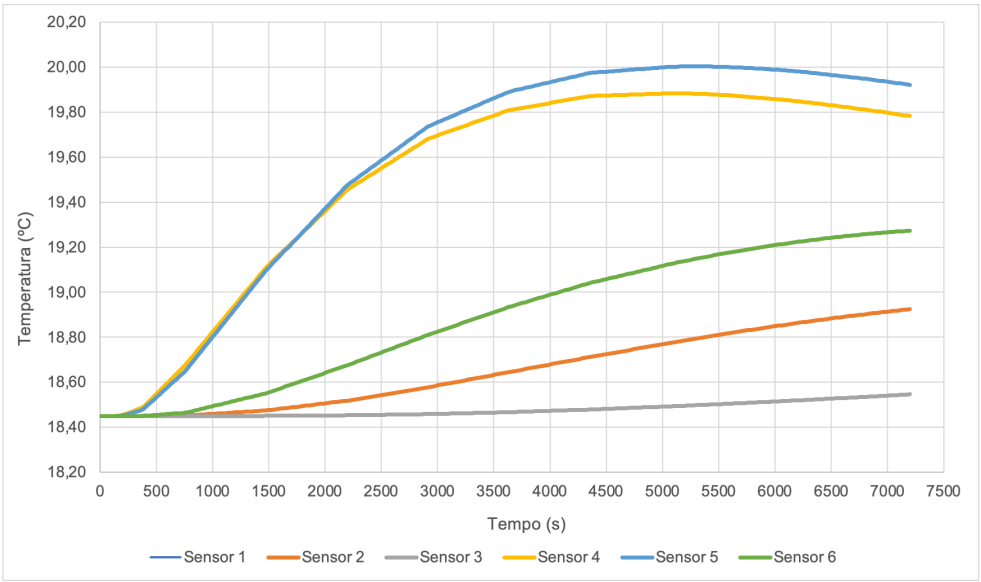
gráfico à direita, apenas os sensores são apresentados, de maneira a analisar detalhadamente a pequena variação da temperatura, conforme indica a Figura 62.

Figura 62 – Gráficos plotados no *Software* do modelo 1 – (a) cone e (b) apenas sensores



O mesmo processo é replicado para o restante dos modelos e as soluções serão expostas ao desenrolar da pesquisa. Para o primeiro modelo, composto por areia Fina, baixa umidade e baixa compacidade, tem-se o respectivo comportamento dos sensores apontado na Figura 63. Observa-se que os sensores localizados próximos ao cone, tendem a aquecer mais.

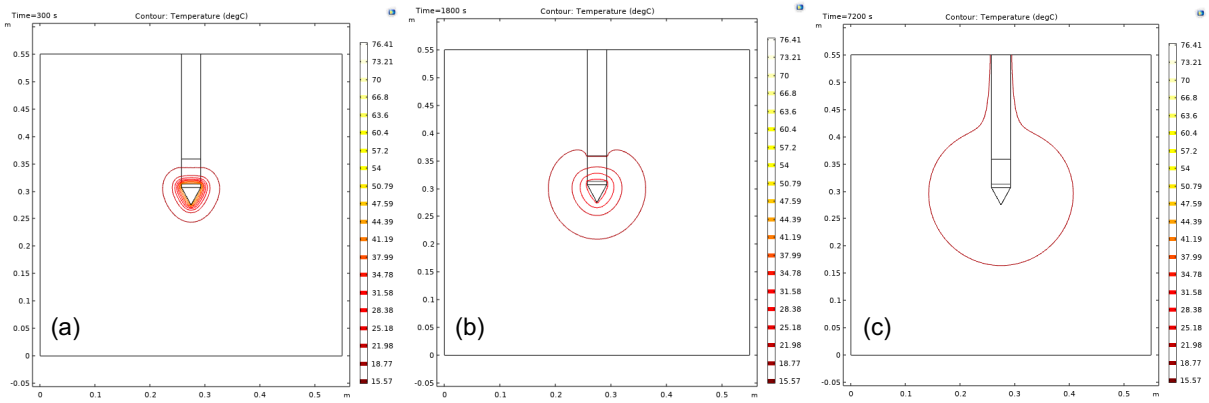
Figura 63 – Variação de Temperatura dos Sensores do modelo Grande 1



O bulbo de isovalores de temperatura do primeiro modelo do tanque cilíndrico é expandido com o passar dos minutos, reduzindo a variação de temperaturas à

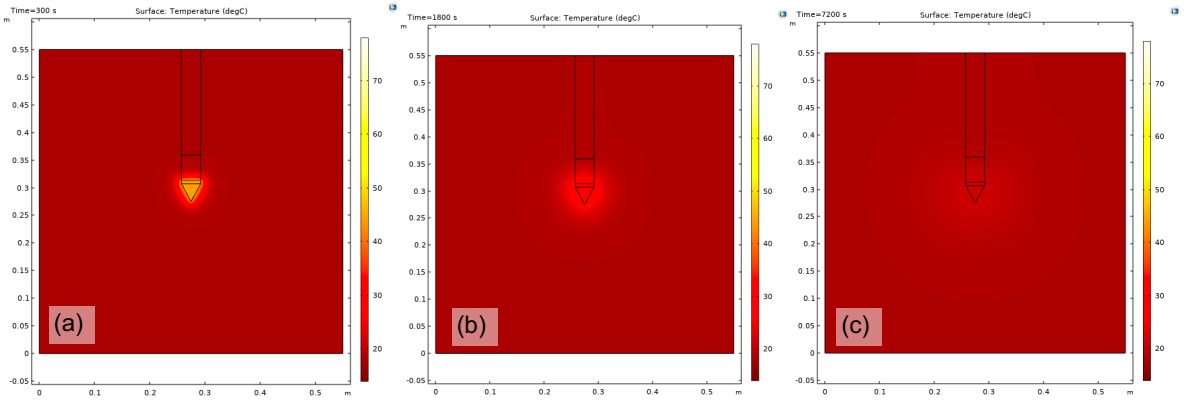
medida que se aproxima do término do ensaio, bem como representado nas curvas isométricas da Figura 64.

Figura 64 – Bulbo de Calor em (a) 5, (b) 30 e (c) 120 minutos



Para mais, pode-se observar a expansão da temperatura no modelo completo, em função da variação do tempo na Figura 65.

Figura 65 – Comportamento da Temperatura em (a) 5, (b) 30 e (c) 120 minutos



Dando continuidade, escolheu-se plotar a resolução dos modelos desmembrando em sensores, facilitando a visualização da interferência da umidade e da compacidade, consoante com a Figura 66 à 71.

Figura 66 – Sensor 1 – modelo numérico

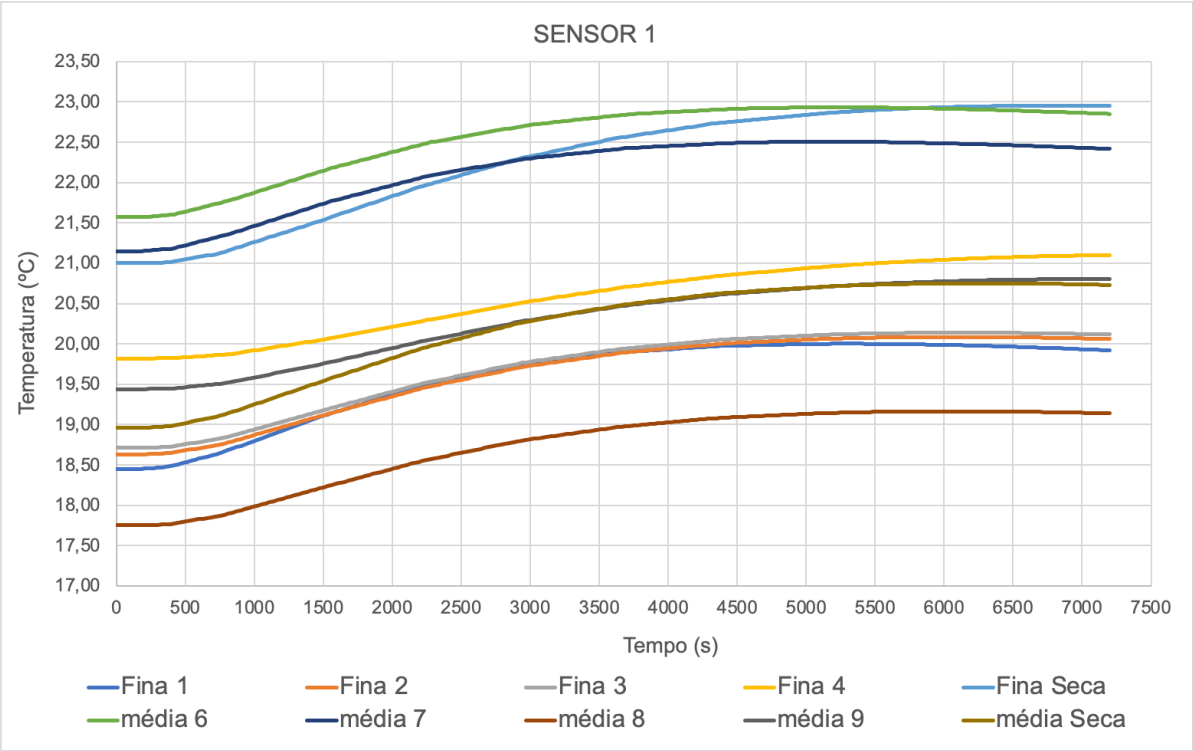


Figura 67 – Sensor 2 – modelo numérico

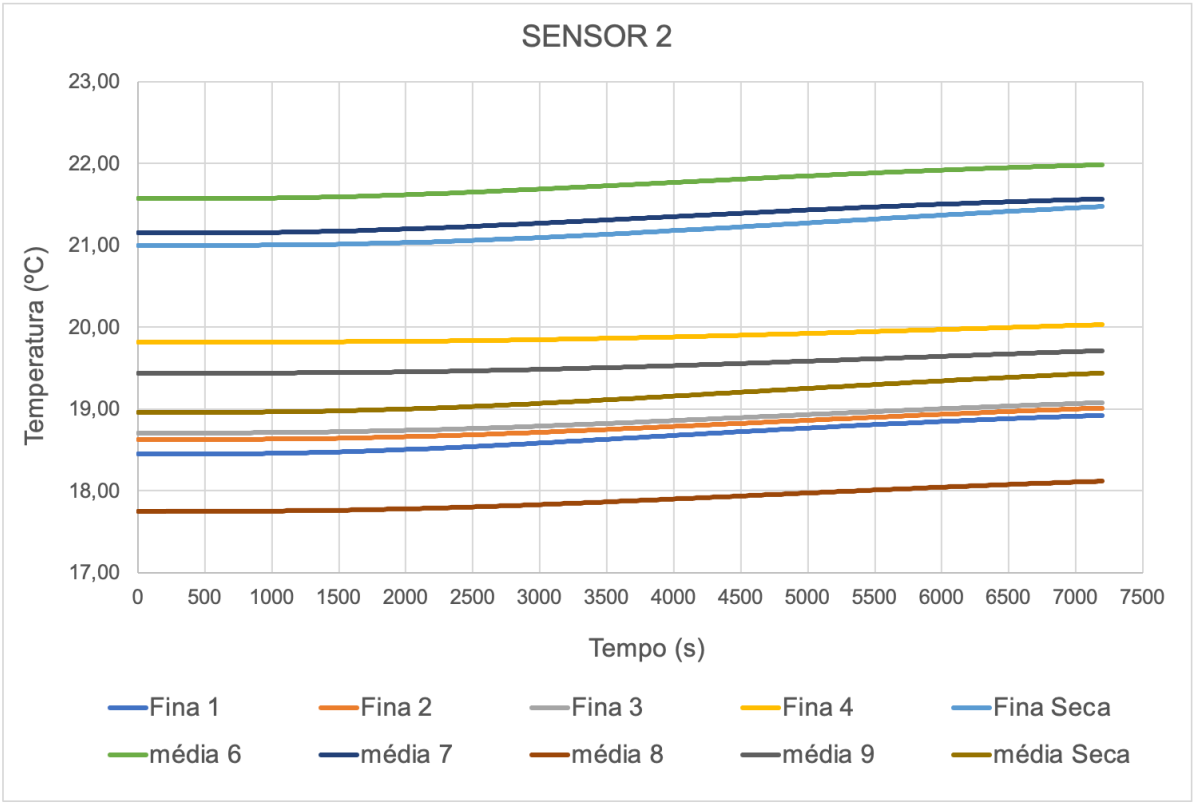


Figura 68 – Sensor 3 – modelo numérico

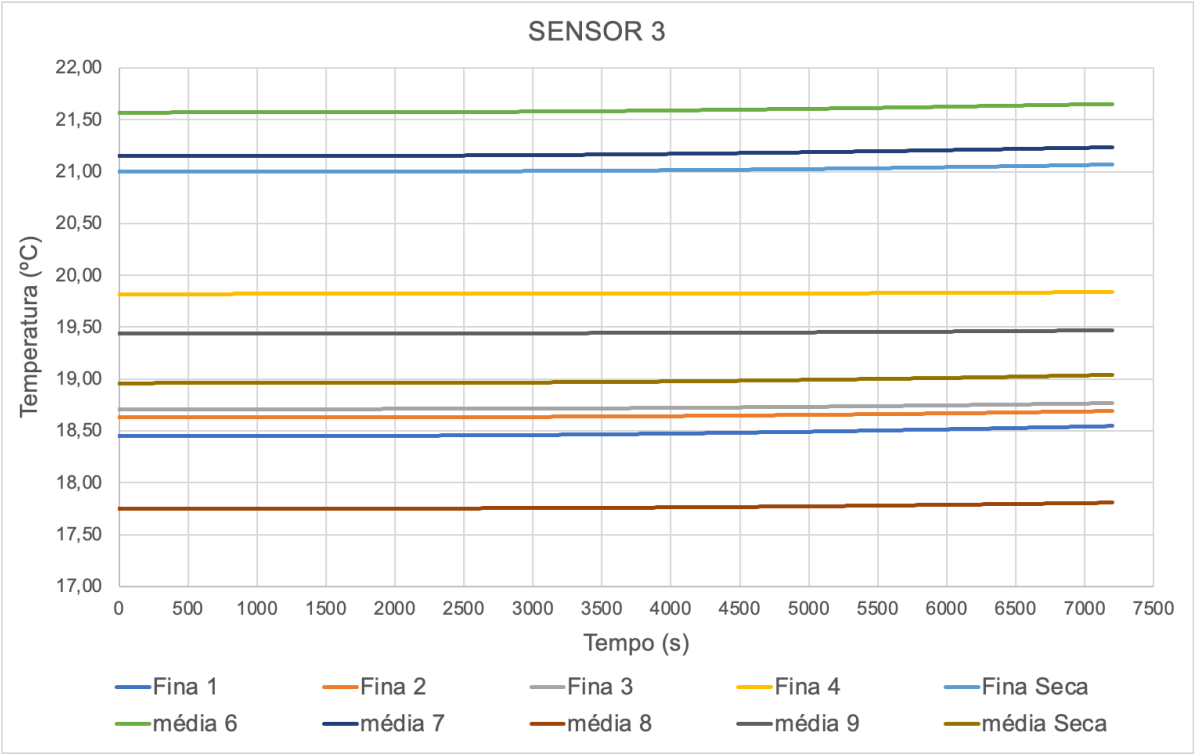


Figura 69 – Sensor 4 – modelo numérico

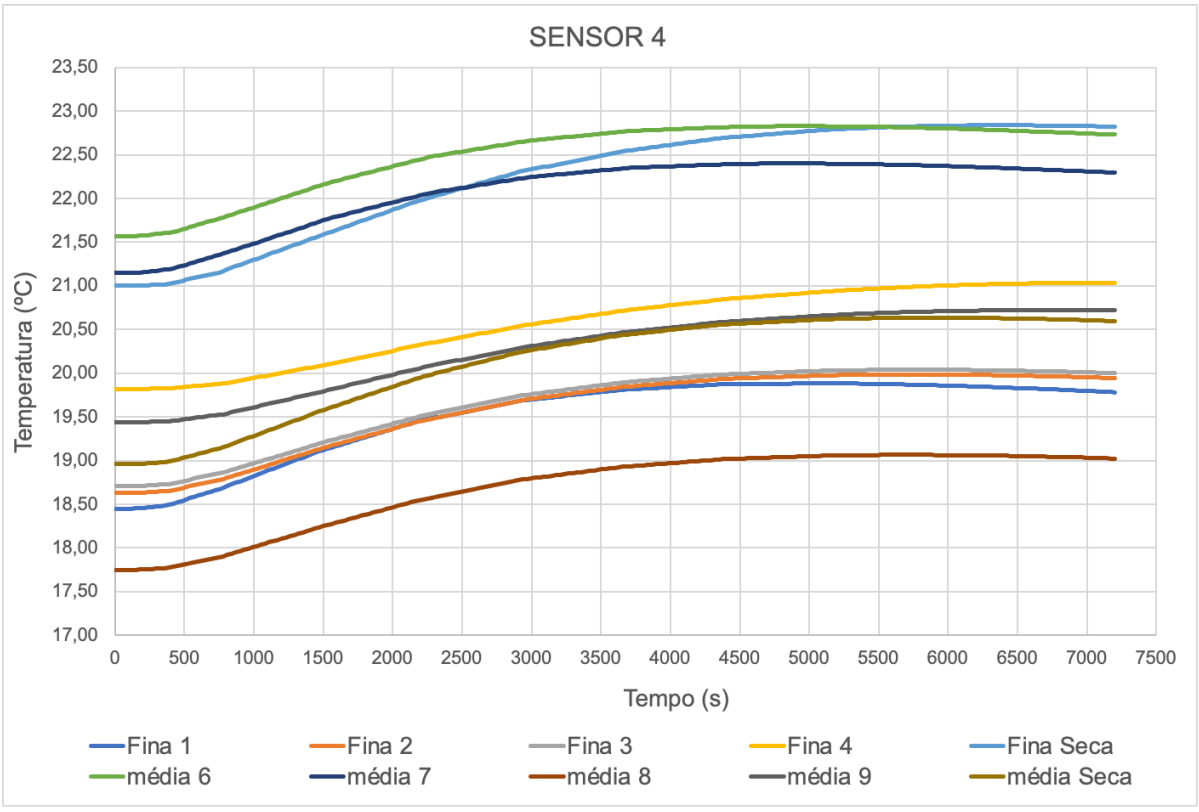


Figura 70 – Sensor 5 – modelo numérico

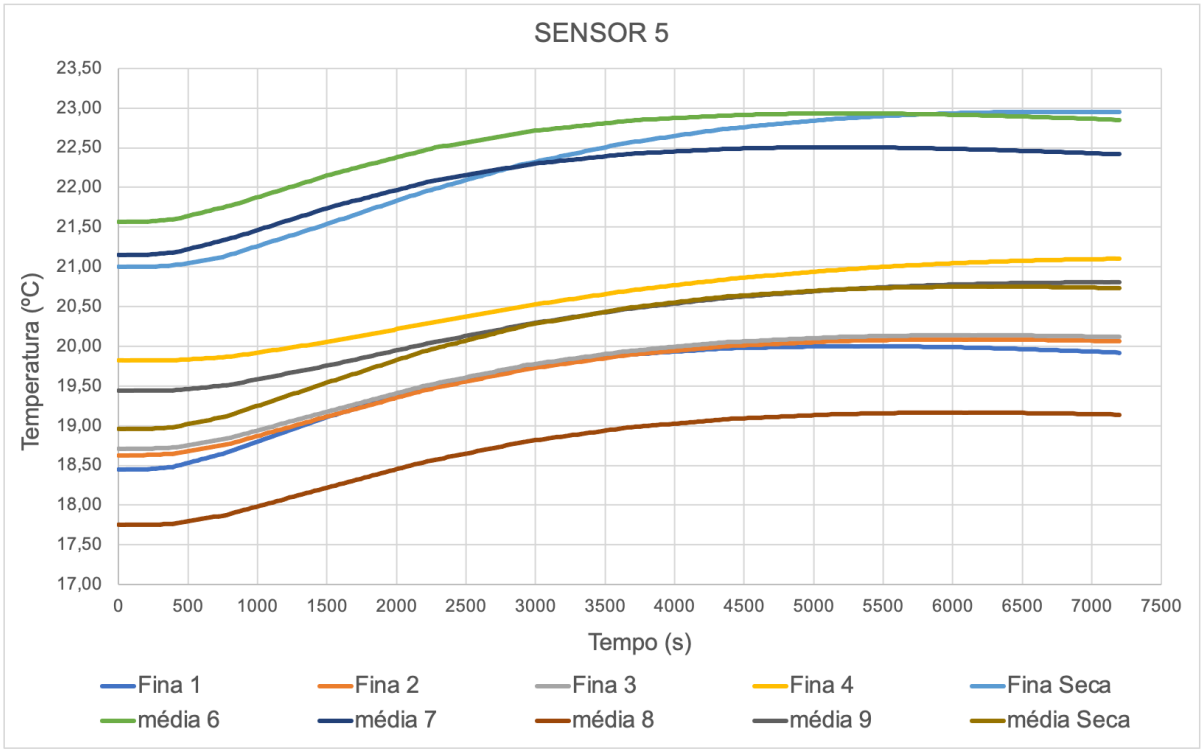
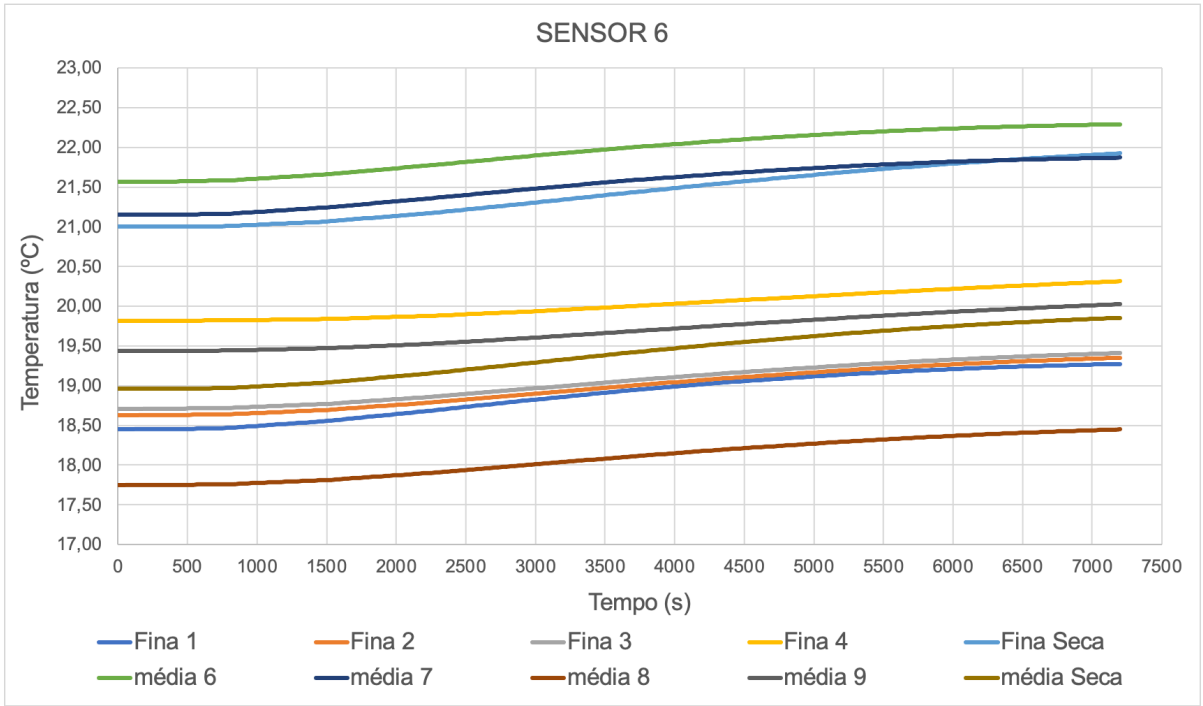


Figura 71 – Sensor 6 – modelo numérico

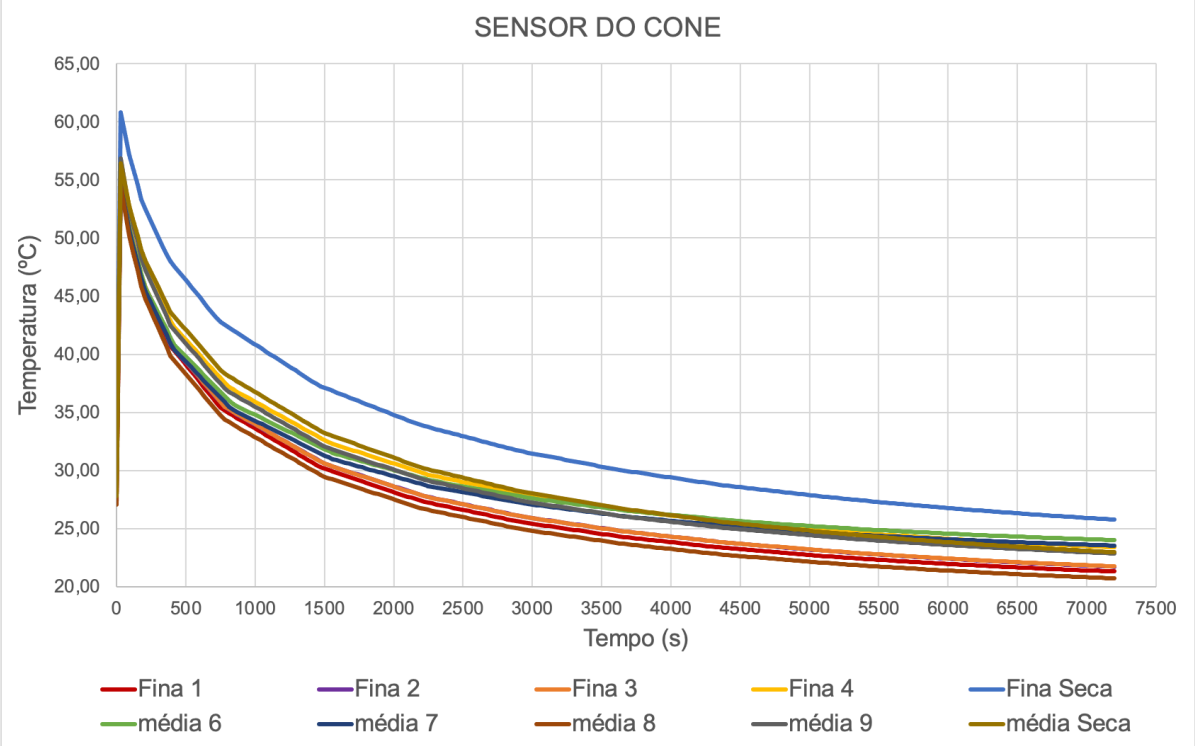


Novamente, é perceptível que os sensores próximos ao cone aquecem mais, entretanto, alguns pontos podem ser apontados, como a tendência da areia fina seca aquecer mais quando comparada à média seca, levando à interferência do tamanho

dos grânulos; as areias médias de baixa e alta compacidade com 5% de umidade (amostras 6 e 7) lideram o índice de aquecimento de maneira unânime. Já a granulometria fina com maior compacidade e umidade, 80% e 15% respectivamente, aquece mais (amostra 4), enquanto à medida que a compacidade e a umidade reduzem, a temperatura também decai, como visualiza-se nas amostras 1 a 3.

Para o sensor do cone, sinalizado na Figura 72, percebe-se que os modelos completamente secos tendem a efetuar um pico de temperatura e alcançam um valor constante superior quando comparado aos modelos úmidos. Além do mais, à medida que há uma elevação na compacidade para as amostras de mesma umidade, aumenta-se a temperatura, da mesma forma que, granulometrias mais finas aquecem mais em comparação com as médias.

Figura 72 – Sensor do Cone – modelo numérico



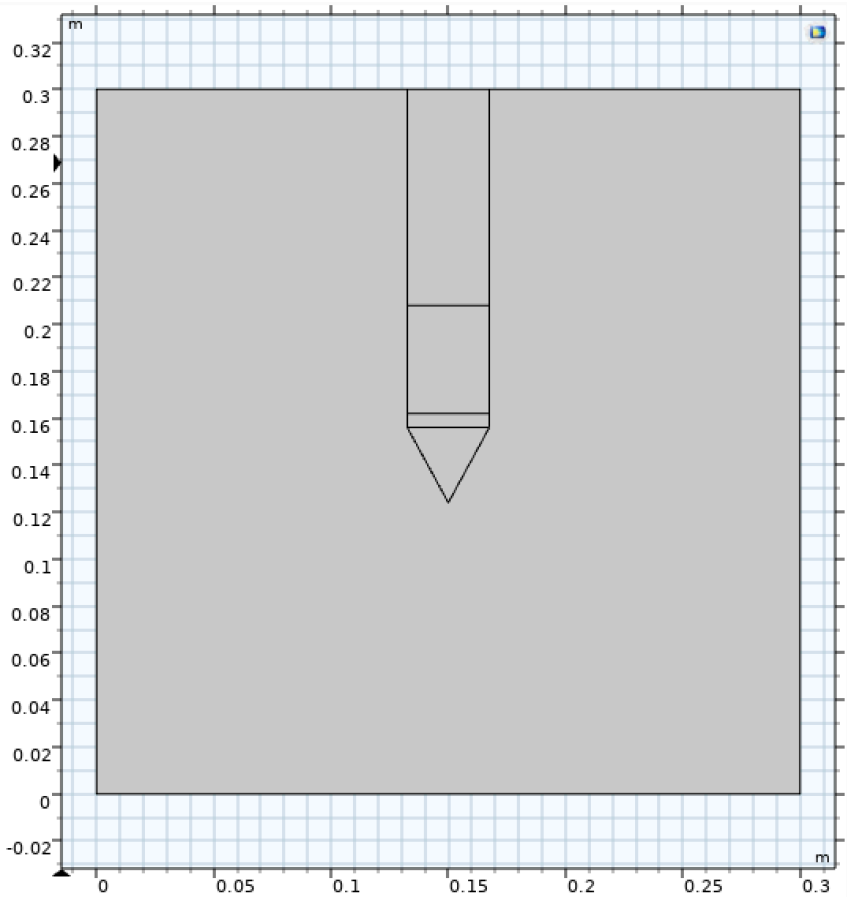
Com base nas informações, ao comparar os sensores de laboratório com os numéricos, tem-se uma similaridade comportamental, já que as curvas com temperaturas mais altas são provenientes de areias médias com baixa umidade. Na sequência, é observado areias médias com alta compacidade e umidade, seguida, por modelos médios completamente secos. As areias Finas são as próximas com um decaimento de temperatura à medida que há redução na umidade e na compacidade.

Por último, o modelo que menos aquece é o elaborado com areias médias, elevada umidade e baixa compacidade (média 8). O desempenho das curvas plotadas seguem este padrão por unanimidade. Assim, comprova-se que os sensores em laboratório aferiram seguramente os dados térmicos.

5.8 ENSAIOS NUMÉRICOS – MODELO PEQUENO

A simulação dos modelos pequenos segue o parâmetro 2D com a física selecionada para Transferência de Calor em Sólidos em atribuição à variação de tempo. O primeiro passo é a elaboração do modelo geométrico, representado mediante um plano longitudinal, seguindo as dimensões reais dos elementos, de acordo com a Figura 73.

Figura 73 – Modelo Geométrico no Programa Computacional



Para mais, adiciona-se os parâmetros de entrada para o modelo 1. O solo é composto por um material arenoso Fino completamente seco, por tal motivo, a condutividade térmica é baixa, de 0,38 W/m.K. Já, o calor específico é de 900 J/kg.K pelo fato do modelo não conter umidade, para modelos úmidos recomenda o uso de um calor específico de 1250 J/kg.K (ANDRADE, 2017). A densidade também, apresenta um valor reduzido quando comparado com os outros modelos. O aço e o isolante Celeron possuem propriedades previamente estabelecidas. Todas as informações são indicadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros de Entrada dos materiais

Parâmetro		Unidade de medida	Valor adotado
AREIA	Condutividade Térmica	W/m.K	0,38
	Calor específico	J/kg.K	900
	Densidade	kg/m³	1480
AÇO	Condutividade Térmica	W/m.K	44,5
	Calor específico	J/kg.K	475
	Densidade	kg/m³	7850
CELERON	Condutividade Térmica	W/m.K	0,3489
	Calor específico	J/kg.K	1465,38
	Densidade	kg/m³	1350

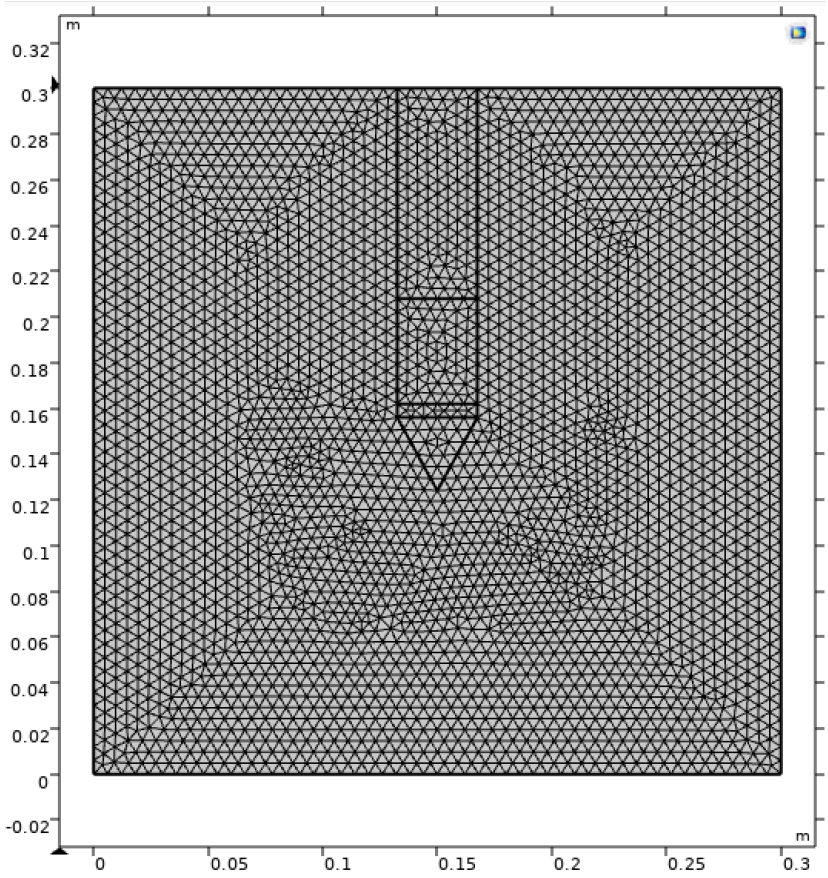
Ademais, as temperaturas iniciais do solo e do cone são inseridas na Tabela 17 conforme o alcançado pela coleta de dados do arduíno, de forma à minimizar as chances de incoerências do modelo e aproximá-lo da realidade.

Tabela 17 – Temperaturas iniciais do cone e do solo para cada modelo Pequeno

modelo		Temperatura inicial solo		Temperatura inicial cone	
		ºC	K	ºC	K
FINA	1	25,64	298,79	71,53	344,68
	2	23,11	296,26	70,25	343,40
	3	19,94	293,09	72,63	345,78
MÉDIA	4	25,63	298,78	74,30	347,45
	5	19,65	292,80	72,22	345,37
	6	18,16	291,31	72,66	345,81

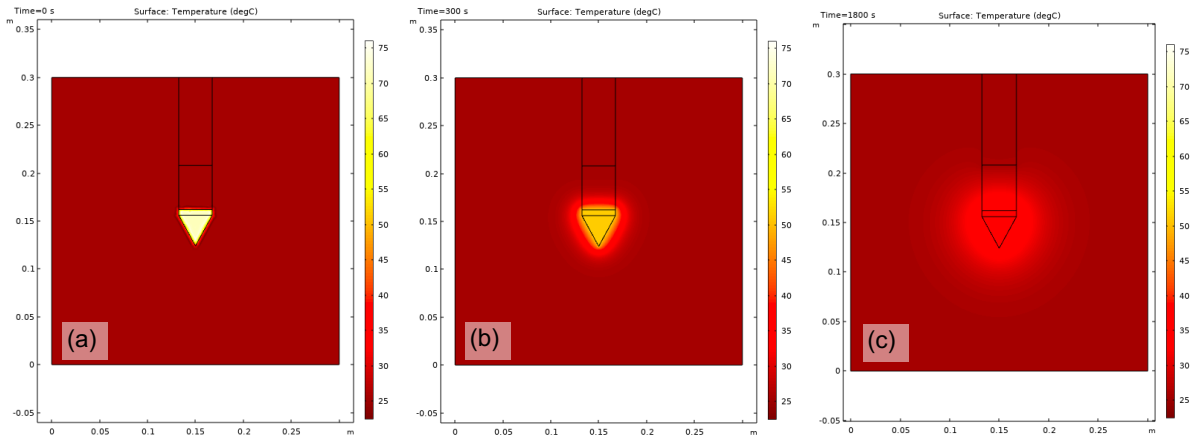
Assim, segundo a Figura 74, a malha determinada é Extra Fina, composta por 6644 elementos, buscando aperfeiçoar a análise do modelo.

Figura 74 – Malha Extra Fina para o modelo Pequeno



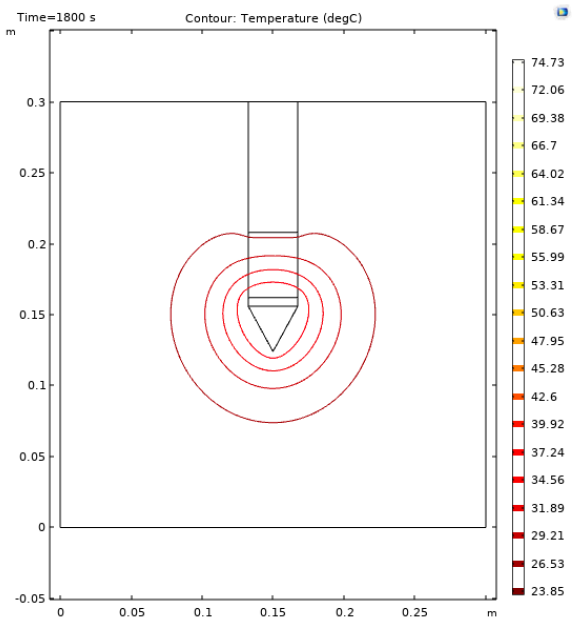
Ao computar a simulação, a amostra propende a expandir o calor proveniente do cone para as áreas de solo nas proximidades. A Figura 75 apresenta este comportamento em 0, 5 e 30 minutos após o início do ensaio, com variações térmicas de 71 à 37ºC. Compreende-se que para o modelo seco, a temperatura leva mais tempo para encontrar um patamar constante.

Figura 75 – Comportamento da Temperatura em (a) 0, (b) 5 e (c) 30 minutos para o modelo 1



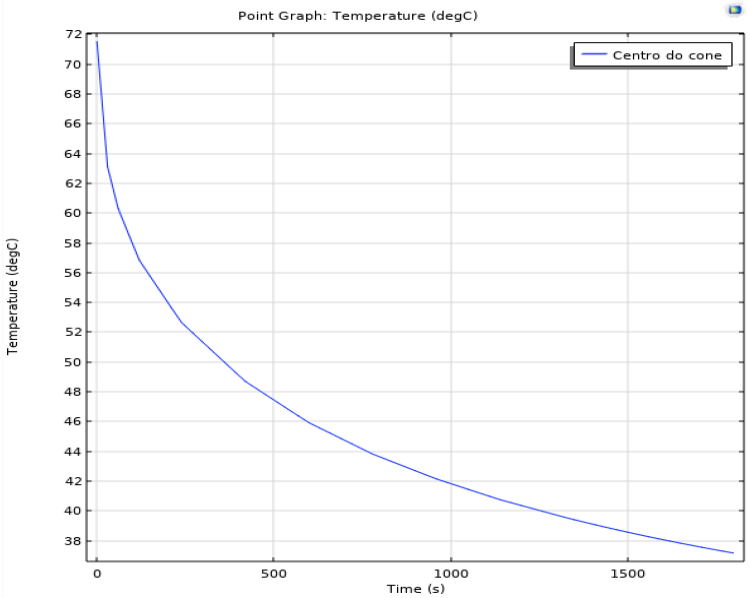
O bulbo de expansão do calor pode ser visualizado por meio dos contornos isotérmicos após 1800 segundos, com a presença de 4 linhas que representam as variações térmicas ainda recorrentes no modelo, pela Figura 76.

Figura 76 – Bulbo de Calor para o modelo pequeno 1 em 30 minutos



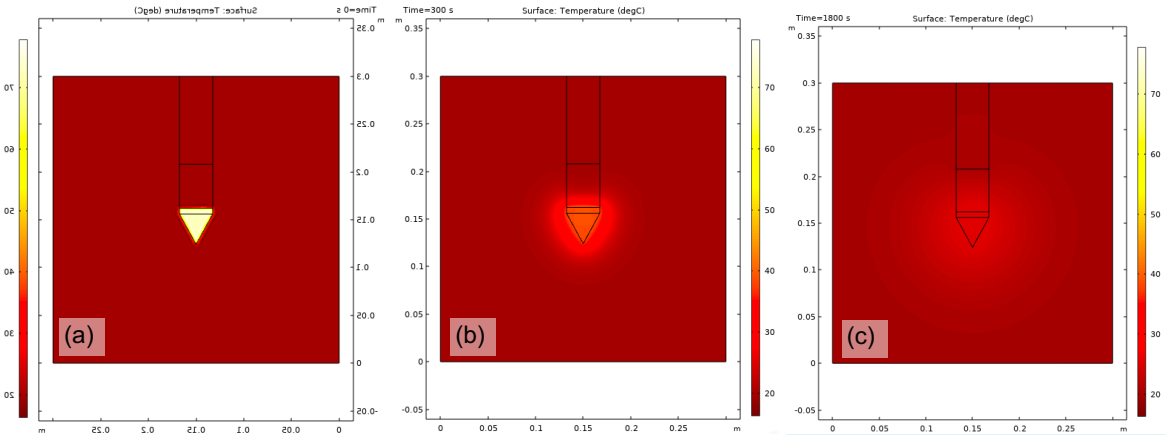
O programa computacional plota os dados calculados em gráficos, como o apresentando na Figura 77. Além do mais, os pontos que formam a curva podem ser exportados para o Excel, sendo assim, as simulações foram sobrepostas aos gráficos produzidos em laboratório com o intuito de analisar se ambas as curvas seguem o mesmo comportamento.

Figura 77 – Gráfico plotado no *Software* modelo 1 Fina



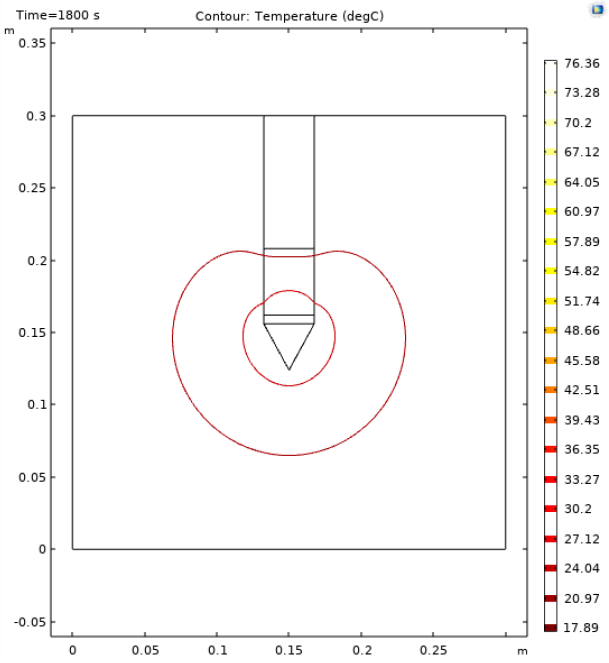
Em comparação, pode-se analisar o diferencial de aquecimento de uma areia Fina com 20% de umidade, como o simulado no modelo 3. Percebe-se a maior agilidade na expansão do calor, promovendo uma constância de temperatura depois de 30 minutos de ensaio, de acordo com a Figura 78.

Figura 78 - Comportamento da Temperatura em (a) 0, (b) 5 e (c) 30 minutos para o modelo 3



Já, quanto aos contornos isotérmicos, em 30 minutos, a variação térmica é reduzida, uma vez que a temperatura está próxima da temperatura ambiente, colaborando com um bulbo mais amplo, com apenas duas curvas isométricas, como na Figura 79.

Figura 79 – Bulbo de Calor para o modelo Pequeno 3 em 30 minutos

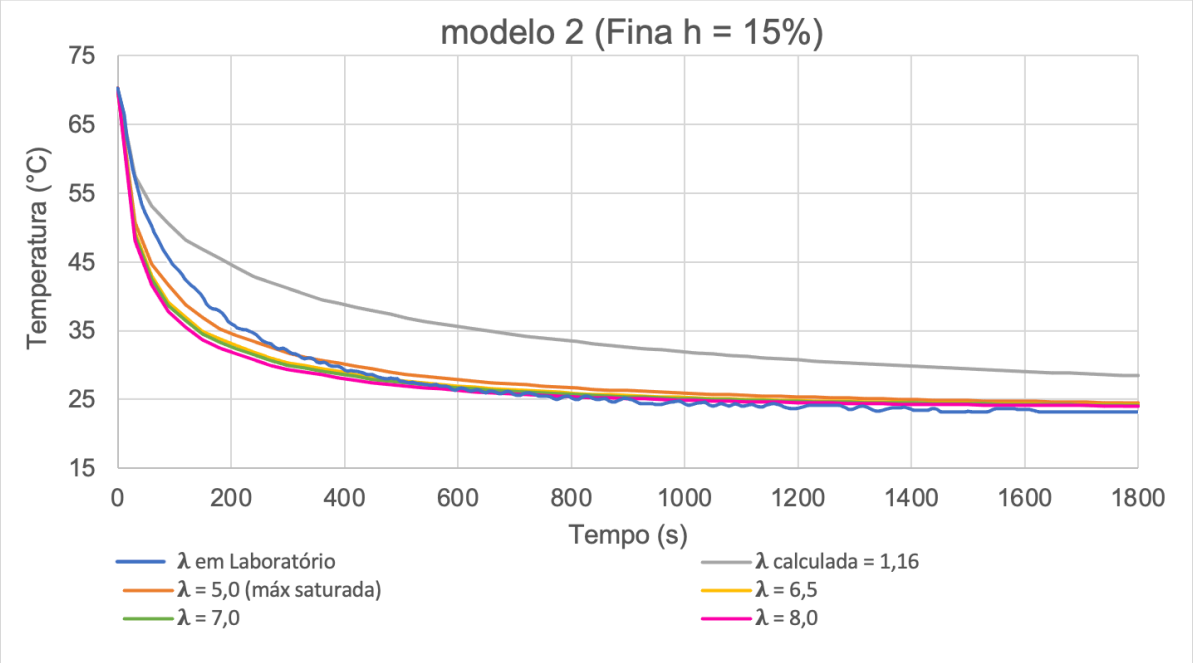


Ao sobrepor as curvas de laboratório com as obtidas por meio do *software*, houve um desencontro dos modos de comportamento destas, uma vez que, as condutividades simuladas permaneceram acima do encontrado em laboratório. Aliado à um desempenho não constante dos modelos laboratoriais, já que costumam apresentar um comportamento mais gradativo até os 600 segundos, seguido por um patamar constante até o término do ensaio.

Além do mais, realizou-se algumas tentativas de estimar valores superiores aos impostos por Laloui & Loria (2020) objetivando encontrar um valor de condutividade que se encaixasse nos modelos laboratoriais apresentados.

Cabe mostrar o exemplo da Figura 80 referente ao modelo 2, que à medida que havia um aumento da condutividade térmica, além dos limites impostos (**λ** para 6,5; 7,0 e 8,0) a curva modelava-se principalmente nos segundos iniciais, mostrando um decaimento mais acentuado, ultrapassando a curvatura desejada, e quanto ao longo do ensaio, a temperatura constante foi minimamente variável, na faixa de 25ºC, porém, não acompanhando a curva laboratorial almejada.

Figura 80 – Estimativa de Condutividades Térmicas superiores para o modelo Pequeno 2



Para mais, cabe comentar que os resultados encontrados pelos cálculos de Akrouch e Vardon foram muito semelhantes, porém, destoam de forma significativa dos modelos calculados pelo método numérico.

Assim, convencionou-se a simulação dos modelos no programa computacional, para outros coeficientes de condutividade térmica, explorando os valores sugeridos por Laloui & Loria (2020) como parâmetros limites máximo e mínimo, tanto para a areia em condições secas, como saturadas. A Tabela 18 é observada abaixo.

Tabela 18 – Parâmetros mínimos e máximos de Condutividade Térmica por Laloui & Loria

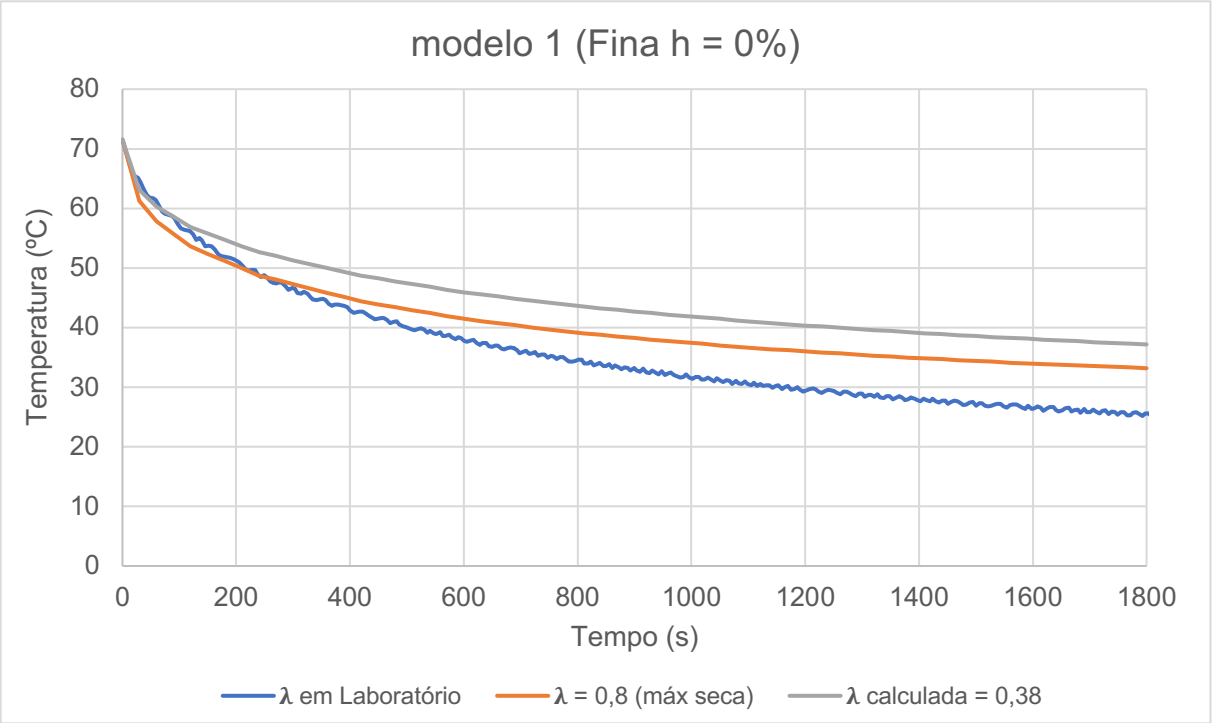
material	Condutividade Térmica, λ (W/m.ºC)	
	Seco	Saturado
Argila	0,4 - 1,0	0,9 - 2,3
Silte	0,4 - 1,0	0,9 - 2,3
Areia	0,3 - 0,8	1,7 - 5,0
Pedregulho	0,4 - 0,5	1,8
Turfa	0,2 - 0,7	0,2 - 0,7

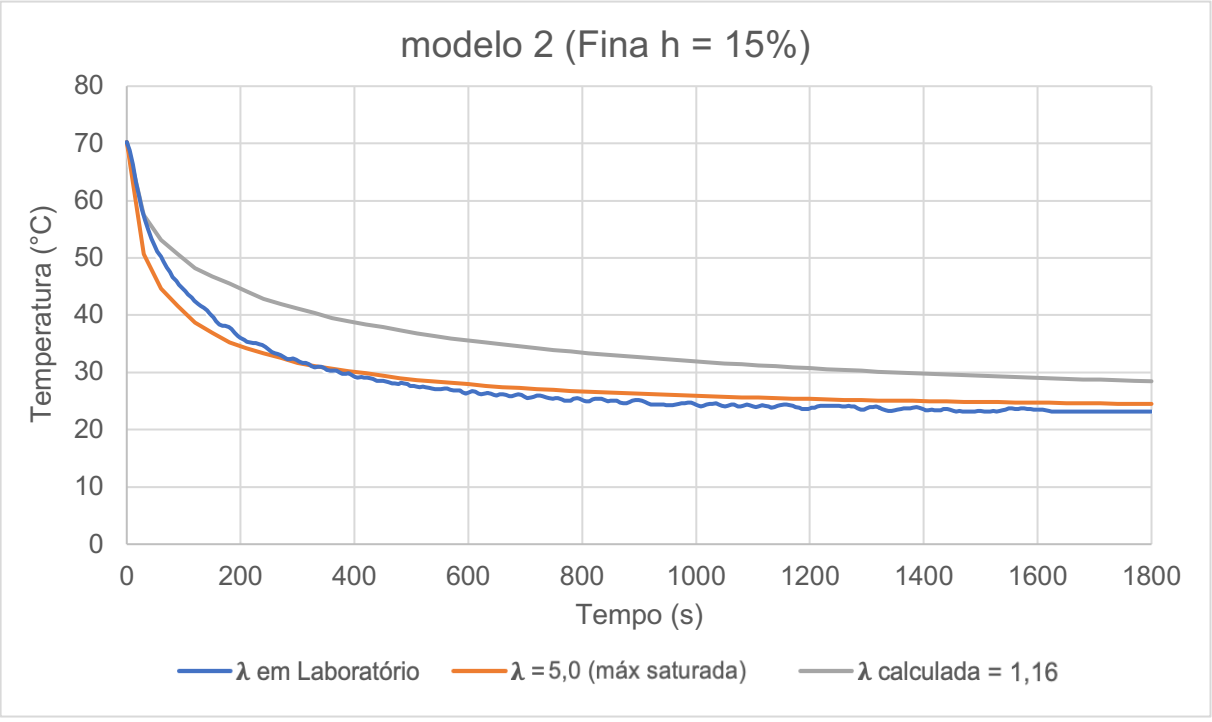
Partindo deste princípio, as curvas comparativas foram plotadas para os 6 modelos em estudo, segundo a sequência disposta na Figura 81. Nota-se que as curvas plotadas no sistema computacional apresentam um desempenho gradativo e sequencial, em condições ideais, enquanto, as curvas laboratoriais apresentam algumas inconstâncias, fato que se dá pela possibilidade de as amostras de solo sofrerem mudanças estruturais, decorrentes das alterações de tensões em virtude da penetração do cone no solo.

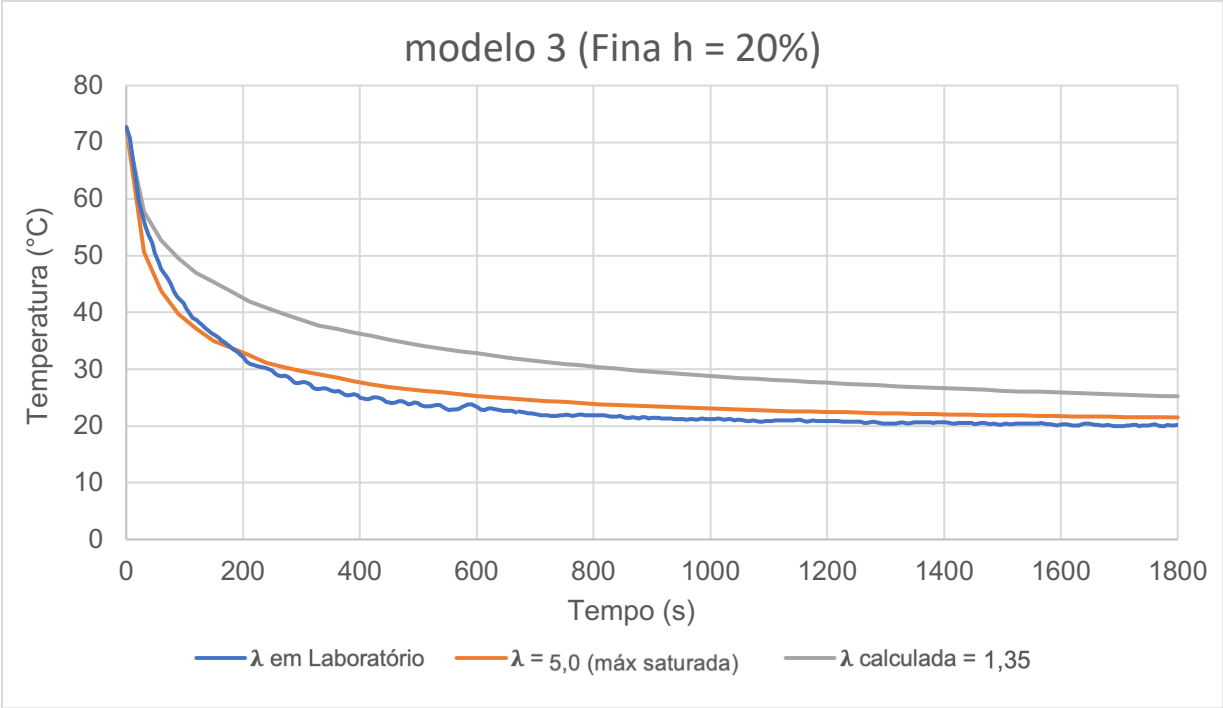
Visto o exposto, os modelos 1 e 4 referem-se às areias secas e possuem uma curva de decaimento lento, enquanto, os modelos úmidos se aproximam das curvas numéricas, com exceção do decaimento inicial, nos primeiros 600 segundos.

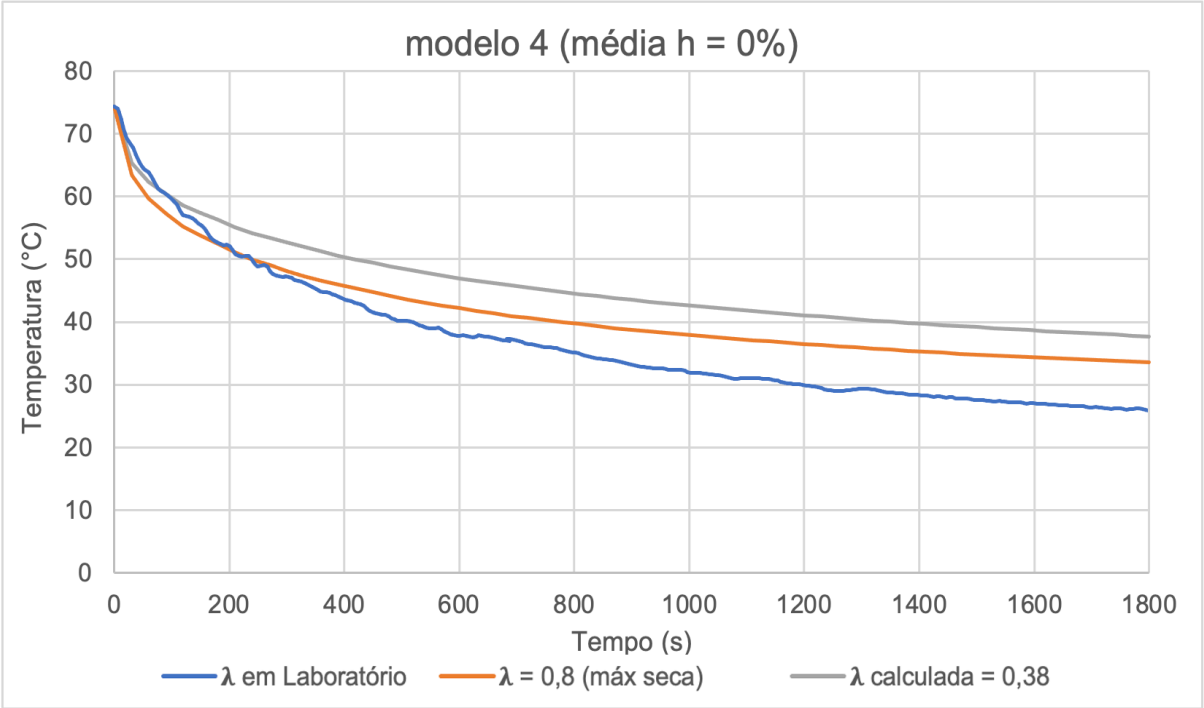
Assim, as curvas azuis representam o decaimento da temperatura plotadas em laboratório, enquanto, as cinzas informam a condutividade calculada por Akrouch plotada no modelo numérico, e por fim, a curva laranja, é a condutividade máxima imposta por Laloui e Loria (2020) com valores de 0,8 para modelos secos e 5,0 para modelos úmidos. Percebe-se que as curvas do modelo numérico não seguem o mesmo padrão comportamental das registradas em laboratório, estas, apresentam um decaimento mais acelerado, promovendo uma curva mais verticalizada.

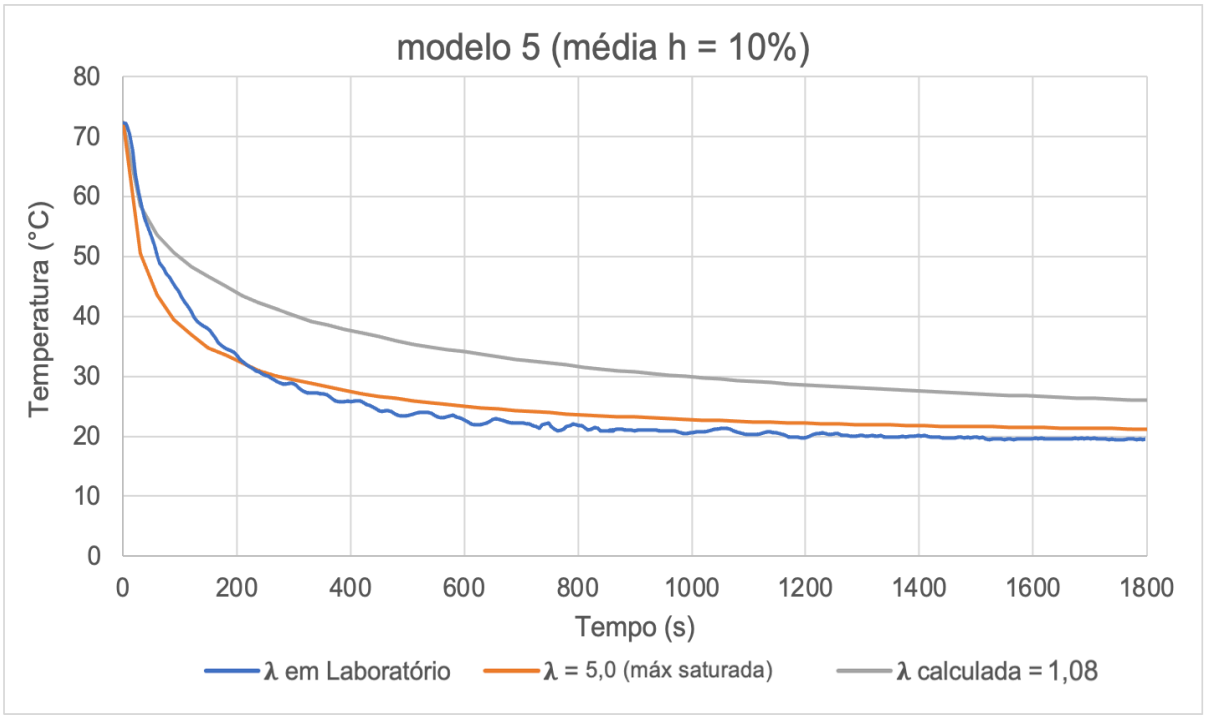
Figura 81 – Sobreposição das curvas de Condutividades Térmicas

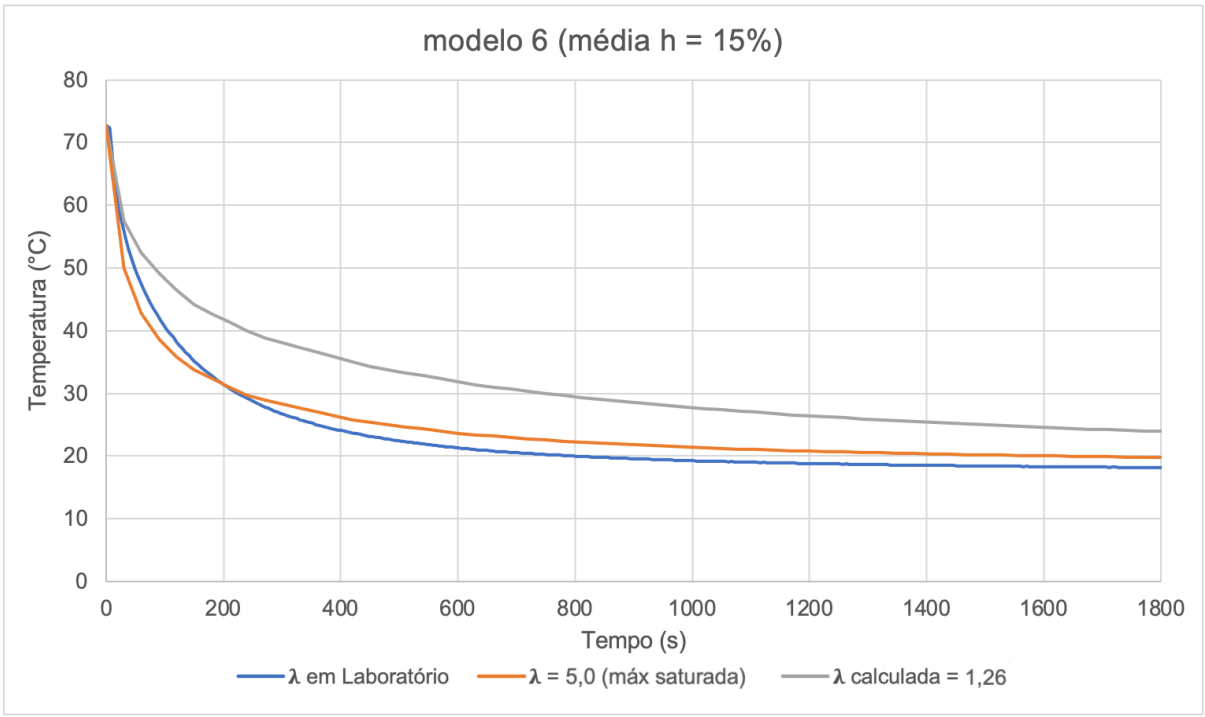





modelo 3 (Fina h = 20%)
Temperatura (°C)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
Tempo (s)
λ em Laboratório
λ = 5,0 (máx saturada)
λ calculada = 1,35


modelo 4 (média h = 0%)
Temperatura (°C)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
Tempo (s)
λ em Laboratório
λ = 0,8 (máx seca)
λ calculada = 0,38


modelo 5 (média h = 10%)
Temperatura (°C)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
Tempo (s)
λ em Laboratório
λ = 5,0 (máx saturada)
λ calculada = 1,08


modelo 6 (média h = 15%)
Temperatura (°C)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
Tempo (s)
λ em Laboratório
λ = 5,0 (máx saturada)
λ calculada = 1,26

6. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO

O ensaio do Cone Térmico foi replicado no campo experimental localizado na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Três furos foram realizados com 50 centímetros de profundidade da superfície do terreno. O cone aquecido é cravado e cada ensaio permaneceu rodando por aproximadamente 30 minutos, com o arduíno coletando os dados.

Vale comentar que por tratar-se de um ensaio em campo, o cone é aquecido com água quente armazenadas em recipientes térmicos e por sua vez, alcançou uma temperatura máxima de 57ºC.

Figura 82 – Ensaio em campo

No momento de cravação do cone no primeiro furo, o aparelho registrava 57,3ºC enquanto, ao término do ensaio, registrava 22,9ºC contribuindo com uma variação térmica de um pouco mais de 34ºC.

Dando continuidade, é conveniente aplicar a Equação 1 de Akrouch (2016) com o intuito de calcular a condutividade térmica do solo local. Vale salientar que a incógnita t_{50} é registrada em segundos, enquanto ΔV é o delta de variação térmica do solo em graus Celsius.

$$\lambda = \frac{77}{(t_{50})^{0,968}}$$

$$t^{50} = tempo\ inicial - (tempo\ da\ temperatura\ inicial - \frac{\Delta V}{2})$$

Para o primeiro furo, obtém-se uma condutividade de 1,0942 W/m.ºC.

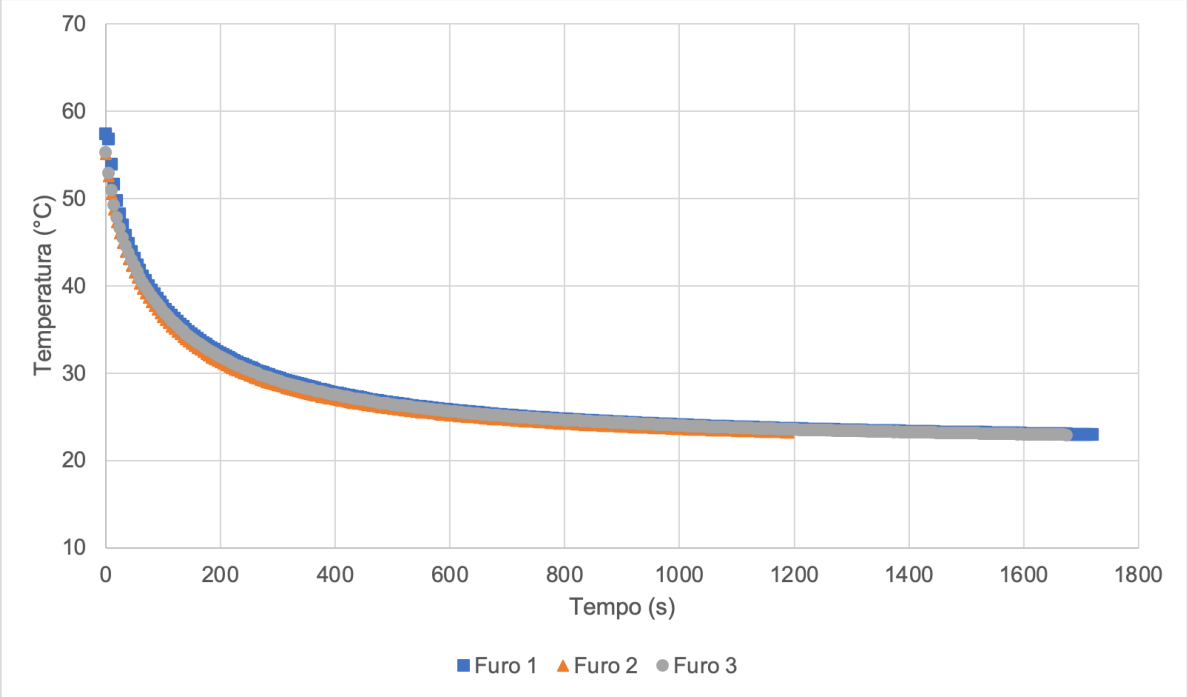
Antes de finalizar o procedimento, foram recolhidas amostras de solo para que a umidade seja avaliada em laboratório. A tabela resumo apresenta os principais dados extraídos do ensaio em campo, seguindo o mesmo princípio de funcionamento já comentado.

Tabela 19 – Dados do ensaio em campo

	Profundidade (cm)	Umidade (%)	Temperatura Inicial (ºC)	Temperatura Final (ºC)	λ (W/m.°C)
FURO 1	50	33,59	57,348	22,935	1,0942
FURO 2	50	34,30	55,057	23,222	1,1638
FURO 3	50	34,09	55,207	22,888	1,0942

Ademais, a Figura 83 expressa de forma gráfica a curva de decaimento da temperatura do cone, em graus Celsius, relacionada com o tempo, em segundos.

Figura 83 – Decaimento da Temperatura × Tempo



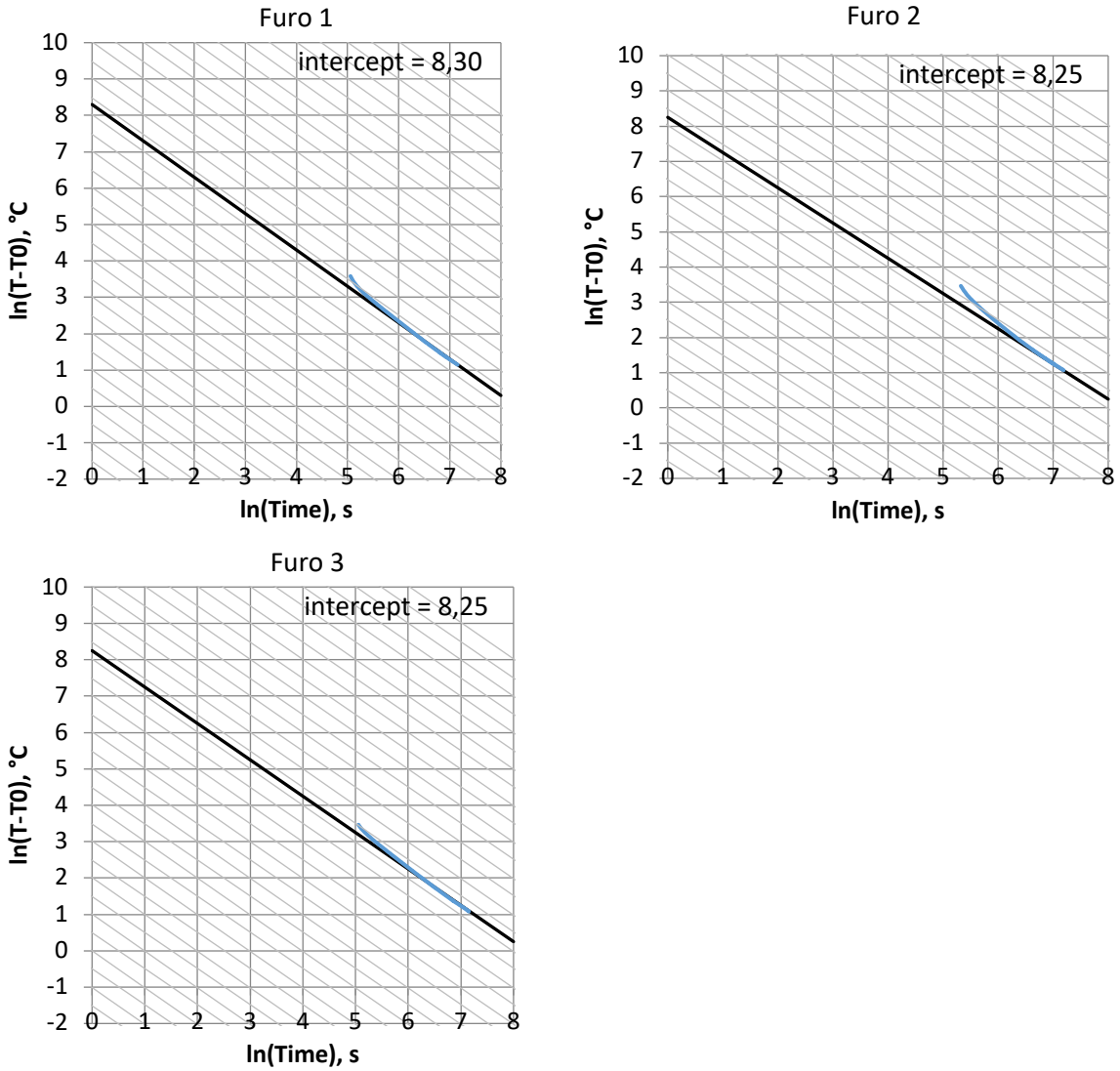
Os dados de campo foram também, simulados através do método de Vardon com o intuito de comparar as condutividades térmicas obtidas. Para mais, pode-se observar a semelhança existente entre os valores dos três furos em campo, conforme a Tabela 20.

Tabela 20 – Condutividade Térmica do Campo por Vardon

modelo de campo	λ calculado (W/m.°C)	λ gráfico (W/m.°C)
FURO 1	0,96	0,96
FURO 2	0,94	0,95
FURO 3	0,95	0,95

As interseções no eixo y foram plotadas na Figura 84 e comprovam visualmente a assertividade dos ensaios.

Figura 84 - Gráfico ln(T – T0) x Tempo para os furos do campo



Afirma-se que as condutividades calculadas por Vardon foram levemente menores quando comparadas com as condutividades alcançadas através das

equações de Akrouch, trazendo uma diferença de 0,14 W/m.ºC entre os dois métodos. Entretanto, pode-se dizer que os valores foram coerentes e aceitáveis.

7. CONCLUSÕES

O objetivo da pesquisa foi a determinação da condutividade térmica em materiais granulares ao variar os teores de umidade e compacidade através do ensaio TCT.

O levantamento do banco de dados promove uma visualização clara do crescimento de instalações geotérmicas com o passar dos anos. O EUA permaneceu o país líder em quantidade de instalações geotérmicas de 2004 e 2014. Além do mais, a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) salienta o EUA como o principal produtor de energia geotérmica produzida em 2020 com 18831 GWH de potência. Em outra linha de raciocínio, as condutividades térmicas pesquisadas nas referências de literatura, demonstram-se mais elevadas, variáveis de 1,99 à 3,10 W/m.K se comparadas com as condutividades obtidas por meio dos ensaios realizados neste trabalho.

Os modelos laboratoriais grandes apresentaram pouca sensibilidade em relação a condutividade térmica, uma vez que, quando o solo é submetido à locais amplos, a água tende a percolar para o fundo, levando em conta a permeabilidade das areias. Além disso, constatou dificuldade na cravação do cone durante o ensaio. Estes foram os principais motivos que levaram a elaboração de novos modelos com dimensões reduzidas.

Os modelos pequenos expostos à variações de umidade e compacidade, permitiram concluir que areias finas completamente secas possuem um decaimento lento da temperatura e como consequência, constam os menores índices de condutividade térmica. Em contraposição, o modelo com 20% de umidade, maior porcentagem estudada, dispõe da maior condutividade térmica para os dois métodos calculados.

O tamanho dos grãos das areias influencia na condutividade térmica, demonstrado de maneira clara nos modelos pequenos 2 e 6, levando em conta que estes tinham a mesma porcentagem de umidade e compacidade (15% e 5% respectivamente), a única variável foi a faixa granulométrica. Com isso, à medida que aumentam o tamanho dos grãos, há um aumento na condutividade térmica.

Os dois métodos de cálculo, foram validados, visto que compartilharam de valores similares. O método proposto por Akrouch é dado em função de uma equação empírica, entretanto, os valores comunicados foram mais conservadores, mesmo ao

aplicar o ajuste. Já, o método de Vardon demonstra-se mais visual, uma vez que possibilita ajustes e percepções manuais e promove uma conferência da assertividade de informações, ao estimar a condutividade térmica através do k calculado e do k gráfico. Ambos provaram a efetividade e competência de funcionamento.

De acordo com dados do Eurocode (CEN 341 N525 2011 *apud* BRUNELLI SANTOS, 2020) pode-se dizer que os modelos pequenos Fina 3 e média 5 e 6 possuem alta condutividade térmica, com números superiores à 1,70 W/m.K, visando um bom aproveitamento térmico para a instalação de estacas trocadoras de calor.

Para mais, ao analisar os sensores térmicos, do modelo do tanque cilíndrico, observa-se uma semelhança no comportamento térmico, relativo ao decaimento da temperatura. As areias médias de baixa umidade, produzem uma curva térmica com as maiores temperaturas registradas. O modelo com menor condição de aquecimento é a areia média com alta umidade (15%) e baixa compacidade (40%). Ainda, vale frisar que os sensores localizados nas regiões próximas ao cone, apresentam a tendência em aquecer mais, fato que deve-se a fonte primária de calor.

Os modelos numéricos elaborados por meio do programa computacional foram efetivos para a gama de condutividades estudadas, em atribuição à validação do programa computacional previamente proposto. Entretanto, apresentaram discrepância de comportamento térmico quando comparado aos métodos de cálculo por Akrouch e Vardon, impossibilitando o encontro de uma curva exata com uma condutividade estipulada, em função de uma tendência comportamental para os primeiros 600 segundos, seguido de um comportamento de temperatura mais constante até o término do ensaio. Esta diferença pode ser decorrente das alterações nas tensões e estruturas das amostras de solo, uma vez que apresentam mudanças comportamentais do solo em campo e testado em laboratório, bem como, pode-se exercer influência do vapor de água em modelos não saturados e possíveis alterações volumétricas, especialmente em solos arenosos.

O ensaio do índice de vazios contribui para a conclusão de que à medida que há aumento nas granulometrias, o material tende a possuir maior compactação, fato explicado devido a areia fina ser mais bem graduada em comparação com a média. Assim, a compacidade relativa do material fino é mais elevada em conferência à areia média ensaiada.

Por último, a aplicação do método em campo experimental foi efetiva, posto que os três furos ensaiados apresentaram aproximação de valores, convergindo em

aproximadamente 1,09 W/m.ºC para Akrouch e 0,95 para Vardon. A análise das medições de temperatura no campo experimental, comprovam um comportamento de acordo com o esperado por meio de estudos de literatura, identificando estações do ano bem definidas em atribuição a profundidade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKROUCH *et. al.* Thermal Cone Test to Determine Soil Thermal Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 142, n. 3, 2016.

ANDRADE, Yago Jonhs da Silva. **Análise numérica de estaca trocadora de calor.** Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12051: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12004: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos.** Rio de Janeiro, 1990.

BANDEIRA NETO, Luis A. **Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

BARCELOS, Roberto Hübner. **Viabilidade Técnica e Econômica do Condicionamento Geotérmico em Edificações no Rio Grande do Sul.** (Pós-Graduação). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

BRANDL, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. **Géotechnique**, v.56, n. 2, p. 81-122, 2006.

BRUNELLI SANTOS, Brunella Casagrande. **Avaliação termomecânica de uma estaca escavada submetida a gradientes térmicos.** Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2020.

CAMPOS, Adriana F.; SCARPATI, Cynthia B. L.; SANTOS, Luan T.; PAGEL, Uonis R.; SOUZA, Victor Hugo A. Um panorama sobre a energia geotérmica no Brasil e no mundo: Aspectos ambientais e econômicos**. Revista Espacios**. v. 38, n. 1, 2017.

CECINATO, F.; LOVERIDGE, F. A. Influences on the thermal efficiency of energy piles. **Energy**, v. 82, p. 1021–1033, 2015.

DICKSON, Mary H.; FANELLI, Mario. What is geothermal energy? **Istituto di Geoscienze e Georisorse**, Pisa: Italy, 2004.

IRENA, International Renewable Energy Agency. Renewable Capacity Statistics 2021 (country rankings). Abu Dhabi. Disponível em www.irena.org. Acesso em: 8 de Novembro de 2022.

LALOUI, L.; LORIA, A. F. R. **Analysis and Design of Energy Geostructures: Theoretical Essentials and Practical Application.** Reino Unido: Elsevier, 2020.

LOVERIDGE, Fleur. **Characterisation of Ground Thermal and Thermo-Mechanical Behaviour for Shallow Geothermal Energy Applications.** University of Southampton, 2012.

LOVERIDGE, Fleur; McCARTNEY, John S.; NARSILIO, Guillermo A.; SANCHEZ, Marcelo. Energy geostructures: A review of analysis approaches, in situ testing and model scale experiments. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 22, p. 1-30, 2020.

LUND, John W; BOYD, Tonya L. **Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. Geothermics.** v. 60, p. 66-93, 2016.

MORAIS, Thaise da S. O.; TSUHA, Cristina de Hollanda C. Efeito do Carregamento Térmico em Estaca Trocadora de Calor: Estudo de Caso em São Carlos – SP. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG).** Belo Horizonte, 2016.

MORAIS, Thaise da S. O.; TSUHA, Cristina de Hollanda C. Estacas Trocadoras de Calor no Brasil: Aspectos Executivos e de Desempenho Térmico. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG)**. São Carlos, São Paulo, 2019.

MORAIS, Thaise da S. O.; TSUHA, Cristina de Hollanda C.; NETO, Luis A. Bandeira.; SINGH, Rao M. Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil. **Journal Energy and Buildings**, v. 216, 2020.

OMIDO, Agleison R.; BARBOZA, Christian S.; JÚNIOR, Orlando M. Energia geotérmica: Uma aliada na busca da eficiência energética. **VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.** Campo Grande: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2017.

PARK, S. et. al. Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete energy pile: Coil-type GHEX (ground heat exchanger). **Journal Energy**, v. 81, p. 56-66, 2015.

PESSIN, Juliana. **Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado.** (Tese de doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

SARBU, Ioan; SEBARCHIEVICI, Calin. **General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings.** Energy and Buildings, v.70, p. 441-454, 2014.

SILVA PEREIRA, Álvaro José. **Análise das potencialidades da geotermia em Portugal para aproveitamento a baixa temperatura.** Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2019.

SOUSA JÚNIOR, Roberto Pimentel. **Estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em um solo tropical típico do DF.** Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

TARELOW, Luis A. Aragão.; NETO, Cyro A. Análise numérica de estacas geotérmicas em solos arenosos. **IX Simpósio de Iniciação Científica, Didática e Ações Sociais da FEI.** São Bernardo do Campo: Centro Universitário da FEI, 2019.

TONUS, Bianca Penteado de A.; LAUTENSCHLAGER, Carlos Emmanuel R.; VISINTIN, Amanda F.; FARO, Vítor P.; TSUHA, Cristina de Hollanda C. Site characterization for a study on shallow geothermal energy exploitation in Southern Brazil. **Soils and Rocks**, 2022.

VARDON, P. J. *et. al.* **Thermal Cone Penetration Test (T-CPT).** Netherlands: Delft University of Technology, 2018.

VARDON, P. J. *et. al.* **Interpreting and validating the thermal cone penetration test (T-CPT). Géotechnique**, v.69, n. 7, p. 580-592, 2019.

VICK Comércio de Plásticos. CELERON Datasheet. Revisão 2.3. São Paulo, 2017.