

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JESSICA LEINDORF DE ALMEIDA**

**DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO DA ÁGUA ATRAVÉS DE  
SENSORES TERMOPARES E DE CAPACITÂNCIA (FDR) EM UM SOLO ARENO-  
SILTOSO REMOLDADO EM LABORATÓRIO**

**CURITIBA**

**2022**

**JESSICA LEINDORF DE ALMEIDA**

**DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO DA ÁGUA ATRAVÉS DE  
SENSORES TERMOPARES E DE CAPACITÂNCIA (FDR) EM UM SOLO ARENO-  
SILTOSO REMOLDADO EM LABORATÓRIO**

**Determination of water infiltration rate through thermocouples and capacitance  
sensors (FDR) in a laboratory remolded sand-silty soil**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo.

**CURITIBA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



JESSICA LEINDORF DE ALMEIDA

**DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO DA ÁGUA ATRAVÉS DE SENSORES TERMOPARES E DE CAPACITÂNCIA (FDR) EM UM SOLO ARENO-SILTOSO REMOLDADO EM LABORATÓRIO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 08 de Março de 2022

Prof Ronaldo Luis Dos Santos Izzo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Matheus David Inocente Domingos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Sidnei Helder Cardoso Teixeira, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof.a Vanessa Correa De Andrade Torres, Mestrado - Université de Sherbrooke

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 08/03/2022.

Dedico este trabalho a todos os pesquisadores que lutaram para trazer conhecimento, tecnologia e desenvolvimento para a sociedade durante a pandemia do COVID-19.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por acreditarem que com a educação é possível chegar cada vez mais longe. São eles que sempre me apoiam em todas as minhas empreitadas, me dando a oportunidade de ser engenheira civil, de poder cursar a especialização e seguir minha carreira acadêmica no mestrado.

Agradeço aos meus demais familiares, por serem minha maior torcida e aos meus amigos, por estarem sempre dispostos a comemorar ou chorar comigo. Agradeço também ao Matheus, Mayconvorgel e Orley por todo o auxílio técnico com a programação e montagem dos meus sensores.

Aos meus colegas do Lab Geo, que estiveram presentes no meu dia a dia durante a execução desta dissertação, agradeço pelo auxílio com os ensaios e principalmente pela companhia nas incontáveis horas que passamos no laboratório.

Ao Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo pela orientação e atenção para com este trabalho. Agradeço também a todos os membros da banca avaliadora pelas suas valiosas contribuições.

A MSc. Vanessa Corrêa de Andrade Torres, pelo fornecimento de informações e fontes relevantes para a pesquisa desenvolvida neste trabalho e a Prof. Dra. Juliana Lundgren Rose (*in memoriam*) pela contribuição no início de minha pesquisa e pela aquisição dos meus sensores e Arduinos.

À Prof. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig pelos conselhos e recomendações durante o período em que fui representante discente do PPGEC e a Prof. Dra. Janine Nicolosi Corrêa por todas as contribuições para com este trabalho.

Agradeço ainda a Deus, por ser meu refúgio e meu descanso nos momentos que mais precisei.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Projeto 88882.461728/2019-01) pela bolsa de fomento de pesquisa, essencial para a condução desta dissertação.

Because nature is infinitely variable, the geological aspects of our profession assure us that there will never be two jobs exactly alike. Hence, we need never fear that our profession will become routine or dull. If it should, we can rest assured that we would not be practicing it properly.

(Ralph B. Peck, 1973)

## RESUMO

Os sistemas de medição de infiltração não são padronizados, sendo que os equipamentos tradicionais são fortemente influenciados por fatores que não podem ser controlados, além de demandarem mobilização do canteiro de obra e terem sua utilização em laboratório limitada. Já os equipamentos modernos de medição possuem custos elevados e normalmente fornecem dados indiretos que precisam ser interpretados para se obter a taxa de infiltração. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo a determinação da taxa de infiltração da água em um solo areno-siltoso remoldado em laboratório através de sensores termopares e de capacitância (FDR) compatíveis com o Arduino. O equipamento desenvolvido visa aprimorar a medição da infiltração para que ela seja obtida de forma direta, rápida e econômica. Para isso, utilizou-se um solo desenvolvido para essa pesquisa composto por 70% de areia média e 30% de um solo siltoso da Formação Guabirota, ambos secos, em que os finos foram excluídos a fim de se evitar a expansão. Foram conduzidos ensaios de granulometria, densidade real dos grãos (Gs), limites de Atterberg, Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX), Difractometria de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e compactação Proctor nas energias normal, intermediária e modificada para os materiais. Os ensaios de infiltração foram realizados em triplicata para cada ponto de umidade da curva Proctor com o solo areno-siltoso na energia modificada. Os cilindros utilizados para a moldagem dos corpos de prova (CPs) eram de acrílico, permitindo a visualização da frente de umedecimento. A infiltração no interior do CP foi determinada por um equipamento composto por um microcontrolador (Arduino), um dispositivo de conexão à internet (ESP 8266) e sensores de temperatura (termopar) e umidade (FDR) embarcados em uma placa de fibra de vidro. Com os dados do equipamento, foram traçadas as curvas de infiltração *versus* tempo para o solo areno-siltoso e foram encontradas equações capazes de determinar a taxa de infiltração deste solo em diferentes umidades de moldagem. Dos resultados encontrados, é possível destacar que o tempo para a água infiltrar no solo mais seco foi aproximadamente duas vezes menor que no solo mais úmido, levando 7,1 minutos e 14,1 minutos, respectivamente. Entretanto, a partir de uma certa umidade, pelo fato de o solo encontrar-se muito encharcado, sua capacidade de reter a água ficou comprometida, fazendo a infiltração voltar a ficar mais rápida mesmo com o solo estando mais úmido. Esse comportamento pode ser observado nos CPs moldados com 13,8% e 10,3% de umidade inicial. Os CPs mais úmidos tiveram taxa de infiltração mais alta ( $81,16 \text{ mm.h}^{-1}$ ) que os CPs com 10,3% ( $71,31 \text{ mm.h}^{-1}$ ). As equações encontradas empiricamente para a taxa de infiltração são de potenciação, tendo como base o tempo que a água leva para infiltrar. Ao compará-las com os demais métodos empíricos de determinação da taxa de infiltração já consolidados na literatura (Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton), o que melhor se ajustou aos ensaios realizados foi o modelo de Horton. Por fim, o equipamento foi validado através do sensor de capacitância (FDR) e de ensaio visual da frente de umedecimento.

**Palavras-chave:** Taxa de infiltração. Solo areno-siltoso. Sensores. Arduino.

## ABSTRACT

Infiltration measurement systems are not standardized. Traditional equipment is strongly influenced by factors that cannot be controlled, requires mobilization of the construction site, and has limited use in the laboratory. On the other hand, modern measuring equipment has high costs and usually provides indirect data that needs to be interpreted to obtain the infiltration rate. In this context, the present study aims to determine the water infiltration rate in a sandy-silty soil remolded in the laboratory through thermocouple and capacitance sensors (FDR) compatible with Arduino. The developed equipment will improve the infiltration measurement to obtain it in a direct, fast, and economical way. For this, a soil composed of 70% of medium sand and 30% of silty soil of the Guabirotuba Formation, both dry, where the fines were excluded to avoid expansion, was developed. Granulometry test, real grain density (Gs), Atterberg limits, X-ray Fluorescence Spectrometry (FRX), X-ray Diffractometry (DRX), Scanning Electron Microscopy (MEV), and Proctor compaction at standard, intermediate, and modified energy for the materials were carried out. The infiltration tests were performed in three replicates for each humidity point of the Proctor curve with the sandy-silty soil at the modified energy. The cylinders used for molding the samples were made of acrylic, thereby allowing the visualization of the wetting front. The infiltration inside the sample was determined by equipment composed of a microcontroller (Arduino), an internet connection device (ESP 8266), and temperature (thermocouple) and humidity (FDR) sensors embedded in a fiberglass board. With the equipment data, the infiltration per time curves were drawn for the sandy-silty soil created, and the infiltration rate of this soil at different molding moistures was fitted to mathematical equations. From the results, it is possible to highlight that the time for water to infiltrate in the driest soil was approximately twice as short as in the wettest soil, taking 7.1 minutes and 14.1 minutes, respectively. However, after a certain humidity where the soil was very wet, its ability to retain water was compromised, causing the infiltration to become faster. This behavior can be observed in the samples molded with 13.8% and 10.3% of initial moisture. The wetter samples had a higher infiltration rate (81.16 mm.h<sup>-1</sup>) than the samples with 10.3% (71.31 mm.h<sup>-1</sup>). The empirical equations developed to determine the infiltration rate were all powers with the base as the time it took to the water to infiltrate. When comparing them with the other empirical methods for determining the infiltration rate already consolidated in the literature (Kostiakov, Kostiakov-Lewis and Horton), the Horton model was the one that best fitted the tests performed. Finally, the equipment was validated through the capacitance sensor (FDR) and visual tests of the wetting front.

**Keywords:** Infiltration rate. Sandy-silty soil. Sensors. Arduino.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de abrangência da Formação Guabirota em Curitiba e Região Metropolitana.....	20
Figura 2 – Perfil Típico de Alteração da Formação Guabirota.....	22
Figura 3 – Processo de extração da areia: a) Margem do rio com os dutos de conexão para escoamento da areia; b) Pátio de secagem/estocagem na margem do rio.....	24
Figura 4 – Fases do solo: a) Solo no estado natural; b) Fases separadas em volume; c) Fases separadas em função do volume de sólidos.....	25
Figura 5 – Perfil de umidade do solo durante a infiltração.....	30
Figura 6 – Esquema de ensaio de um infiltrômetro de anel simples.....	35
Figura 7 – Esquema de ensaio de um infiltrômetro de anel duplo.....	35
Figura 8 – Infiltrômetro de pressão.....	36
Figura 9 – a) Permeômetro de perfuração; b) Permeômetro de <i>Guelph</i> .....	37
Figura 10 – Equipamento SATURO.....	37
Figura 11 – Mini Disk.....	39
Figura 12 – Arduino.....	41
Figura 13 – Módulo ESP 8266.....	41
Figura 14 – a) Sensor de umidade ECH2O modelo EC-20; b) Sensores instalados no solo a três profundidades diferentes.....	42
Figura 15 – a) Montagem interna do termopar; b) Termopar tipo K com módulo MAX 6675.....	44
Figura 16 – Sensor de umidade do solo HD-38.....	45
Figura 17 – Esquema detalhado da pesquisa.....	46
Figura 18 – Materiais que compõem a mistura desenvolvida para a pesquisa.....	49
Figura 19 – Localização da obra de onde o solo foi extraído.....	50
Figura 20 – Granulometria lavada.....	53
Figura 21 – Granulômetro <i>a laser (Bettersizer S3 Plus)</i> .....	54
Figura 22 – Ensaio da massa específica real dos grãos: a) Dessecador ligado à bomba de vácuo; b) Bolhas de ar saindo das amostras; c) Balança semi analítica para pesagem das amostras.....	55
Figura 23 – Extração do corpo de prova próximo à umidade ótima para o solo siltoso na energia modificada.....	56
Figura 24 –a) Difratômetro de Raio-X; b) Microscópio Eletrônico de Varredura.....	57
Figura 25 –a) Colarinhos retirados dos termopares; b) Sensores fixados com fita isolante.....	59
Figura 26 – Sensor de umidade usado na pesquisa.....	59
Figura 27 – Evolução das placas do equipamento: a) <i>Protoboard</i> + display de LED; b) <i>Protoboard</i> + computador; c) Placa de fibra de vidro com ESP 8266.....	61
Figura 28 – Gráfico gerado no KaaloT.....	62
Figura 29 – Dados armazenados no Arduino.....	62
Figura 30 – Evolução das pontas de prova.....	63
Figura 31 – Equipamento finalizado: a) Ponta de prova final e sensor de umidade; b) Equipamento montado; c) Placa armazenada na caixa de transporte.....	64
Figura 32 – Cilindros de acrílico utilizados nos ensaios.....	66
Figura 33 – Desenho esquemático com as dimensões do colarinho + cilindro.....	66

Figura 34 – a) Frasco Mariotte utilizado; b) Movimento da água na amostra ....	68
Figura 35 – Curva granulométrica do solo siltoso, da mistura e da areia.....	70
Figura 36 – Carta de Casagrande.....	72
Figura 37 – DRX do solo siltoso vermelho.....	73
Figura 38 – Imagens do MEV para o solo siltoso vermelho: a)500 X; b)2 kX.....	74
Figura 39 – Curva de compactação do solo siltoso .....	75
Figura 40 – Curva de compactação do solo areno-siltoso .....	76
Figura 41 – Gráficos de temperatura por tempo e umidade por tempo sem tratamento.....	79
Figura 42 – Gráfico de temperatura do Ensaio 1 com tratamento .....	80
Figura 43 – Curva dos valores médio da velocidade infiltração e infiltração acumulada medidas em campo na EMEPA, Paraíba.....	83
Figura 44 – Gráfico de infiltração acumulada por tempo para todas as umidades de moldagem.....	85
Figura 45 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo para todas as umidades de moldagem. ....	85
Figura 46 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiaikov, de Kostiaikov-Lewis e Horton para a umidade de 13,8%.....	87
Figura 47 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiaikov, de Kostiaikov-Lewis e Horton para a umidade de 10,3%.....	88
Figura 48 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiaikov, de Kostiaikov-Lewis e Horton para a umidade de 8, 7%.....	89
Figura 49 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiaikov, de Kostiaikov-Lewis e Horton para a umidade de 4,8%.....	89
Figura 50 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiaikov, de Kostiaikov-Lewis e Horton para a umidade de 1,8%.....	90
Figura 51 – Gráfico da temperatura por tempo para verificação da ponta de prova.....	92
Figura 52 – Frente de saturação atingindo o sensor 3 no ensaio de verificação. ....	92
Figura 53 – Umidade do solo antes e após o sensor 3 no ensaio de verificação. ....	93

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ensaio de expansão em solos da formação Guabirotuba .....	21
Quadro 2 – Locação dos termopares nas pontas de prova.....	77
Quadro 3 – Taxa de infiltração definida através da interpretação dos dados dos termopares.....	83
Quadro 4 – Análise estatística para a umidade de 13,8% .....	87
Quadro 5 – Análise estatística para a umidade de 10,3% .....	88
Quadro 6 – Análise estatística para a umidade de 8,7% .....	88
Quadro 7 – Análise estatística para a umidade de 4,8% .....	89
Quadro 8 – Análise estatística para a umidade de 1,8% .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limite das frações de solo de acordo com o tamanho dos grãos ....	19
Tabela 2 – Modelos empíricos para determinar a infiltração da água no solo ..	33
Tabela 3 – Modelos teóricos para determinar a infiltração da água no solo .....	33
Tabela 4 – Programa experimental .....	48
Tabela 5 – Resumo dos dados dos ensaios de caracterização dos materiais ..	71
Tabela 6 – Elementos químicos identificados no solo siltoso vermelho no ensaio de MEV .....	74
Tabela 7 – Peso específico seco máximo e umidade ótima do solo siltoso e do solo areno-siltoso nas três energias .....	75
Tabela 8 (início) – Tempo necessário para a água atingir cada sensor .....	80
Tabela 8 (continuação) – Tempo necessário para a água atingir cada sensor..	81
Tabela 8 (conclusão) – Tempo necessário para a água atingir cada sensor .....	82
Tabela 9 – Parâmetros de Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton para o solo areno-siltoso .....	86
Tabela 10 – Prós e contras da utilização da ponta de prova na medição da infiltração .....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMCM	Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais
Cc	Coefficiente de curvatura
Cu	Coefficiente de uniformidade
D10	Diâmetro efetivo
D30	Diâmetro em que 30% do material passa no peneiramento
D60	Diâmetro em que 60% do material passa no peneiramento
DRX	Difratometria de Raios-X
EN	Energia Normal
EI	Energia Intermediária
EM	Energia Modificada
EQM	Erro Quadrático Médio
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X
Gs	Massa Específica Real dos Grãos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MH	Silte de alta compressibilidade
PP	Ponta de prova
SEE	Erro Padrão da Estimativa
SM	Areia siltosa
SW	Areia bem graduada
Ti	Taxa de infiltração

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Delimitação</b> .....	<b>17</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização da pesquisa</b> .....	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Solos</b> .....	<b>19</b>
2.1.1	Solo argiloso e a Formação Guabirotuba.....	20
2.1.2	Areia.....	23
2.1.3	Propriedades do solo.....	24
<u>2.1.3.1</u>	<u>Teor de umidade gravimétrico (<math>\omega</math>)</u> .....	<u>25</u>
<u>2.1.3.2</u>	<u>Índice de vazios (<math>e</math>)</u> .....	<u>26</u>
<u>2.1.3.3</u>	<u>Porosidade (<math>n</math>)</u> .....	<u>26</u>
<u>2.1.3.4</u>	<u>Grau de saturação (<math>S</math>)</u> .....	<u>26</u>
<u>2.1.3.5</u>	<u>Determinação dos índices físicos</u> .....	<u>27</u>
2.1.4	Propriedades hidráulicas do solo.....	28
<b>2.2</b>	<b>Infiltração</b> .....	<b>29</b>
2.2.1	Fatores que interferem na capacidade de infiltração.....	31
2.2.2	Modelos de infiltração.....	32
2.2.3	Tipos de ensaios de infiltração disponíveis no mercado.....	34
<b>2.3</b>	<b>Avanços tecnológicos na determinação da infiltração</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4</b>	<b>Equipamento desenvolvido</b> .....	<b>45</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>Etapas da pesquisa</b> .....	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>49</b>
3.2.1	Solo vermelho siltoso.....	49
3.2.2	Areia.....	51
3.2.3	Água destilada.....	51
<b>3.3</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>51</b>
3.3.1	Preparação da mistura.....	51
3.3.2	Ensaio de caracterização do solo siltoso, do solo areno-siltoso e da areia.....	52
<u>3.3.2.1</u>	<u>Granulometria por peneiramento</u> .....	<u>52</u>
<u>3.3.2.2</u>	<u>Granulometria a laser</u> .....	<u>54</u>
<u>3.3.2.3</u>	<u>Massa específica real dos grãos</u> .....	<u>54</u>
<u>3.3.2.4</u>	<u>Limites de Atterberg</u> .....	<u>55</u>
<u>3.3.2.5</u>	<u>Compactação</u> .....	<u>55</u>

3.3.2.6	<u>Fluorescência de Raio-X, Difractometria de Raio-X e Microscopia Eletrônica de Varredura .....</u>	<u>56</u>
3.3.3	Desenvolvimento do equipamento para medição da taxa de infiltração	57
3.3.3.1	<u>Sensores embarcados no equipamento .....</u>	<u>58</u>
3.3.3.2	<u>Montagem da placa de fibra de vidro.....</u>	<u>60</u>
3.3.3.3	<u>Programação dos dispositivos .....</u>	<u>61</u>
3.3.3.4	<u>Desenvolvimento da ponta de prova.....</u>	<u>63</u>
3.3.4	Modelagem dos corpos de prova .....	65
3.3.5	Ensaio de infiltração.....	67
3.3.6	Análise estatística .....	68
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização dos materiais sólidos .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de compactação .....</b>	<b>75</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de infiltração .....</b>	<b>76</b>
4.3.1	Tratamento dos dados .....	78
4.3.2	Infiltração acumulada e taxa de infiltração para o solo areno-siltoso....	83
4.3.3	Comparação da infiltração para as diferentes umidades de moldagem	84
4.3.4	Determinação da equação de taxa de infiltração para o solo areno-siltoso e comparação com outras equações definidas por métodos empíricos	86
4.3.5	Ensaio de verificação da funcionalidade da ponta de prova .....	91
4.3.6	Prós e contras da ponta de prova .....	94
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>96</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE A - Gráficos para determinar o tempo que a água levou para atingir cada sensor nas diferentes umidades de moldagem..</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE B - Gráficos de infiltração acumulada por tempo e taxa de infiltração por tempo para as diferentes umidades de moldagem .</b>	<b>113</b>
	<b>APÊNDICE C - Gráficos dos sensores de capacitância (FDR) .....</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE D - Tabela de custos para a produção da ponta de prova.....</b>	<b>123</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é o principal elemento estudado na engenharia geotécnica e possui grande relevância nos projetos de construção civil, pois apresenta características variáveis e complexas, principalmente quando se encontra em condição não-saturada, ou seja, quando seus vazios não estão totalmente preenchidos por água.

A definição de solo, segundo Das e Sobhan (2016), é o agregado não-cimentado de grãos minerais e matéria orgânica em decomposição com a presença de líquidos e gases nos vazios gerados entre as partículas sólidas. O solo pode ser utilizado como material de construção em diversos projetos de engenharia e serve de suporte para as fundações, sendo imprescindível que os engenheiros conheçam suas propriedades mecânicas e químicas.

Entretanto, o comportamento dos maciços não é função apenas das propriedades dos solos que os compõem, mas também das pressões com que são solicitados, bem como o tempo pelo qual permanecem recebendo as pressões e do meio físico ao qual estão inseridos (CAPUTO, 1988).

Neste contexto, conhecer as propriedades hidráulicas de um solo se torna relevante, pois muitas vezes os engenheiros se defrontam com situações onde é preciso controlar o movimento da água no solo, haja vista que estes movimentos poderão afetar as suas propriedades e seu uso (MARANGON, 2018; CARVALHO, 2002).

Segundo Caputo (1988), a água contida nos vazios do solo pode ser classificada em: água de constituição, água adesiva ou adsorvida, água livre, água higroscópica e água capilar.

Dentro do contexto da água livre presente nos solos, a infiltração é a maior responsável pela sua existência. A infiltração consiste em um processo físico em que a água entra no solo pela superfície, podendo ser influenciada por alguns fatores, como: condições da superfície do solo, umidade inicial do perfil, topografia do terreno, propriedades físicas do solo, modo como a água atinge o solo e característica da água que infiltra (LIMA, 2010).

Para Marangon (2018), entender o fluxo da água dentro do solo pode ser aplicado nos seguintes problemas de engenharia: perda de água nos reservatórios de barragens de terra; problemas de colapso e expansão em solos não saturados; dimensionamento de sistemas de drenagem; dimensionamento de *liners* que sirvam

como barreira horizontal impermeável em sistemas de contenção de rejeitos; adensamento de solos moles; estabilidade de taludes e análise da possibilidade da infiltração gerar erosões e arraste de materiais sólidos no interior do maciço, conhecido como *piping*.

Carvalho e Silva (2006) afirmam que, quando a infiltração cessa, ou seja, quando o solo já está completamente inundado, as camadas superiores apresentam elevados teores de umidade e as camadas mais profundas apresentam teores mais baixos. Este comportamento pode ser observado em ensaios experimentais, porém somente esta informação não permite obter parâmetros relevantes do solo inundado para as condições de campo. Isto levou alguns pesquisadores a desenvolverem modelos empíricos e físicos capazes de simplificar o estudo desta infiltração.

Os modelos empíricos são válidos apenas para as condições em que foram calibrados, porém necessitam de informações simples, como é o caso dos modelos de Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton e Holtan. Já os modelos físicos são embasados em teorias físicas de fluxo em meios porosos, podendo ser aplicados em diversos tipos de solo com diferentes usos e manejos, sendo os mais usuais descritos pelas equações de Darcy e de Richards. Ainda abordando o modelo físico, é necessário o conhecimento das características específicas de cada situação para utilizá-los, destacando-se os modelos de Philip, Green-Ampt e de Green-Ampt modificado por Mein e Larson (LIMA, 2010).

A utilização dos modelos físicos é baseada em uma série de aproximações que desconsideram diversas condições de contorno experimentais, além de serem mais complexos de se aplicar (LIMA, 2010). Desta forma, os modelos empíricos são utilizados com mais frequência. Entretanto, não há padronização nos sistemas de medição da infiltração, sendo que ela normalmente é obtida através de ensaios indiretos. Isso significa que os equipamentos disponíveis no mercado fornecem dados de umidade, temperatura, condutividade elétrica ou fornecem o coeficiente de permeabilidade do solo e posteriormente esses dados são interpretados e utilizados para se obter a taxa de infiltração (OLIVEIRA, SOARES e HOLANDA, 2018; TEIXEIRA *et al.*, 2010; PAIXÃO *et al.*, 2004).

Ademais, o custo dos equipamentos disponíveis no mercado para realizar as medições através de sensores é elevado e os ensaios que não utilizam tecnologias de ponta são fortemente influenciados por fatores que não podem ser controlados, além de demandarem mobilização do canteiro de obra e não serem

passíveis de serem realizados em laboratório, limitando os estudos científicos (OLIVEIRA, SOARES e HOLANDA, 2018).

Alguns pesquisadores têm tentado desenvolver equipamentos tecnológicos de *hardware* livre ou adaptar sondas já comercializadas para obter informações do solo ligados as suas propriedades (ANDRADE, CARVALHO e RODRIGUES, 2014; CRUZ, 2013; LIMA, 2010). Porém, o foco dessas pesquisas não foram medir a taxa de infiltração com equipamentos de *hardware* livre e com custo reduzido.

Na tentativa de suprir essa lacuna na medição da taxa de infiltração de forma acurada e com baixo custo, tanto em laboratório quanto em campo, esta pesquisa propõe a criação de um sistema baseado em sensores para Arduino que propiciem a obtenção da infiltração em função do tempo em um solo desenvolvido em laboratório.

Os dispositivos eletrônicos (Arduino e ESP 8266) foram embarcados em uma placa de fibra de vidro, a fim de permitir a realização de três ensaios simultâneos, utilizando 15 termopares e 3 sensores de umidade. Para respeitar a integridade deste solo e evitar ao máximo perturbações, os sensores de temperatura foram alocados em uma ponta de prova com distâncias pré-determinadas.

Para avaliar a eficiência do sistema desenvolvido, equações que estimam a taxa de infiltração da água no solo estudado para diferentes umidades de moldagem foram encontradas em função do tempo e da infiltração, para então serem comparadas com as equações empíricas já consolidadas na literatura e que também estão em função do tempo e das características do solo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é determinar a taxa de infiltração da água em um solo areno-siltoso remoldado em laboratório, através de sensores de temperatura e de capacitância, com a finalidade de se obter parâmetros do solo inundado relevantes para as condições de campo da engenharia civil, como no dimensionamento de sistemas de drenagem, barragens, cortinas, taludes e pavimentos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um sistema que propicie a realização das medições de infiltração ao longo do tempo por meio de sensores de temperatura e capacitância conectados ao Arduino;
- Verificar se a percolação da água no solo registrada pelos sensores é a mesma que a visualizada através de uma fita métrica embarcada nos cilindros de ensaio;
- Definir, através de ensaios laboratoriais, equações que sejam capazes de determinar a taxa de infiltração da água no solo quando a umidade inicial do perfil é variada;
- Comparar as diferenças entre as equações de taxa de infiltração encontradas neste trabalho com modelos matemáticos encontrados na literatura e que se adequem ao solo estudado.

## 1.2 Justificativa

A engenharia geotécnica tem por objetivo estudar o solo e suas propriedades. Em 1925, quando Karl Terzaghi publicou seu livro (*Erdbaumechanik*), ele introduziu o conceito da Mecânica dos Solos e definiu uma nova orientação a ser seguida no estudo dos solos. Desde então, diversos pesquisadores têm se dedicado a entender o comportamento do solo e todas as suas facetas. Muitos estudos foram desenvolvidos para compreender o funcionamento do solo em dois principais estados, na condição natural e na condição saturada. Entretanto, o entendimento do processo de infiltração da água no solo e da ascensão capilar, os dois principais fatores a levarem um solo ao estado de saturação na natureza, ainda são pouco entendidos e estudados.

Segundo José *et al.* (2013), o conhecimento do movimento da água no solo é de grande importância para o homem, principalmente no que tange à infiltração, haja vista que a mesma é responsável por inundações, poluição de águas

superficiais e do solo e sistemas ineficientes de irrigação, drenagem e manejo de solo.

Alguns pesquisadores já estudaram o movimento da água no solo através da infiltração, seja definindo a taxa, a velocidade ou discorrendo sobre as consequências do mal dimensionamento da infiltração (CALHEIROS *et al.*, 2009; LIMA, 2009; FIORIN, 2008).

Contudo, conforme José *et al.* (2013), a determinação das variáveis hidráulicas do solo são difíceis de serem obtidas devido ao elevado tempo de execução, além da necessidade de equipamentos grandes e pesados.

Além disso, a Geotecnia apresentou desenvolvimento tecnológico mais recentemente, a partir dos anos 60, o que faz com que os equipamentos usados como facilitadores tenham custo elevado e impossibilitem a sua utilização em obras de menor porte. As características incertas do solo acabam gerando problemas futuros nas obras pelo fato de ser um material complexo e que apresenta características variáveis de um local para o outro, tendo diferenças desde sua composição até sua formação geológica.

Desta forma, justifica-se a elaboração desta pesquisa como uma contribuição para o desenvolvimento de um equipamento mais economicamente viável e tecnologicamente eficaz para a correta medição da taxa de infiltração da água no solo, favorecendo o dimensionamento de sistemas de drenagem, barragens, cortinas, taludes, pavimentos, dentre outros. Já no aspecto ambiental e social, obras bem dimensionadas, reduzem o impacto gerado por construções mal projetadas.

### **1.3 Delimitação**

A presente investigação foi realizada com um solo areno-siltoso desenvolvido em laboratório para que não apresentasse expansão, haja vista que ela afetaria a leitura da infiltração. O solo consiste em uma mistura pré-estabelecida de 70% da massa de areia média e 30% de solo vermelho, pertencente à Formação Geológica Guabirota.

Os ensaios foram realizados no laboratório de geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, entre março de 2020 e janeiro de 2022. As variáveis controladas da pesquisa foram o peso específico do solo, o teor de umidade de

moldagem e a coluna d'água acima do CP, definida através da utilização do Frasco Mariotte.

Pelo fato de a visualização do interior do CP ficar limitada a partir de um certo grau de umidade (acima da umidade ótima) e não ser possível observar a infiltração por meio da fita métrica, um equipamento foi desenvolvido. Este equipamento era composto por sensores termopares e de capacitância (FDR) ligados a um Arduino e a um ESP 8266 para que a infiltração de 3 CPs pudesse ser realizada simultaneamente.

O equipamento foi programado na própria interface do Arduino em linguagem C/C++ e os sensores de temperatura foram alocados em uma ponta de prova com distâncias pré-determinadas para que a taxa de infiltração pudesse ser calculada.

#### **1.4 Organização da pesquisa**

A presente pesquisa foi subdividida em cinco capítulos para facilitar a forma de apresentação dos conceitos, dados, metodologias de ensaio, resultados e conclusões que foram obtidos através dela. Segue abaixo a divisão adotada:

O capítulo 1 contextualiza a pesquisa através da introdução, trazendo o cenário científico no qual ela está inserida, sua relevância, o objetivo geral e os objetivos específicos, assim como a justificativa para realizá-la.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, elucidando todos os conceitos necessários para se compreender o tema deste trabalho, assim como as equações que serão utilizadas e imagens que esboçam a pesquisa.

No capítulo 3 abordam-se os materiais utilizados e a metodologia definida no desenvolvimento do equipamento eletrônico.

Já o capítulo 4 discute os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e de infiltração conduzidos, comparando-se estes resultados com os de outros pesquisadores da área.

Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões que foram passíveis de serem alcançadas após o desenvolvimento da pesquisa e faz sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Solos

As origens dos solos provêm da decomposição física e química das rochas que inicialmente compunham a crosta terrestre. Com as variações de temperatura, as rochas começaram a apresentar trincas, por onde a água foi capaz de penetrar e atacar quimicamente os minerais. Com o congelamento da água dentro de suas trincas, assim como outros fatores, as tensões no interior das rochas geraram a fragmentação dela que, atrelado à presença da fauna e flora gerando ataques químicos, resultaram na formação de solos. Esse conjunto de processos, mais atuante em climas quentes, gerou a mistura de pequenas partículas que se diferenciam umas das outras pelo seu tamanho e composição química, sendo que a maior ou menor concentração de um determinado tipo de partícula depende da composição química da rocha que lhe deu origem (PINTO, 2006).

A principal característica que diferencia os solos é o tamanho das partículas que os compõe. A NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995) define terminologias para cada tipo de solo de acordo com a fração passante nas peneiras de mesmo diâmetro, conforme discriminado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Limite das frações de solo de acordo com o tamanho dos grãos**

Fração	Limites definidos pela ABNT
Matacão	25 cm < $\Phi$ < 1 m
Pedra	7,6 cm < $\Phi$ < 25 cm
Pedregulho	4,8 mm < $\Phi$ < 7,6 cm
Areia grossa	2 mm < $\Phi$ < 4,8 mm
Areia média (usada nesta pesquisa)	0,42 mm < $\Phi$ < 2 mm
Areia fina	0,05 mm < $\Phi$ < 0,42 mm
Silte	0,005 mm < $\Phi$ < 0,05 mm
Argila	$\Phi$ < 0,005 mm

**Fonte: adaptado da NBR 6502 (ABNT, 1995).**

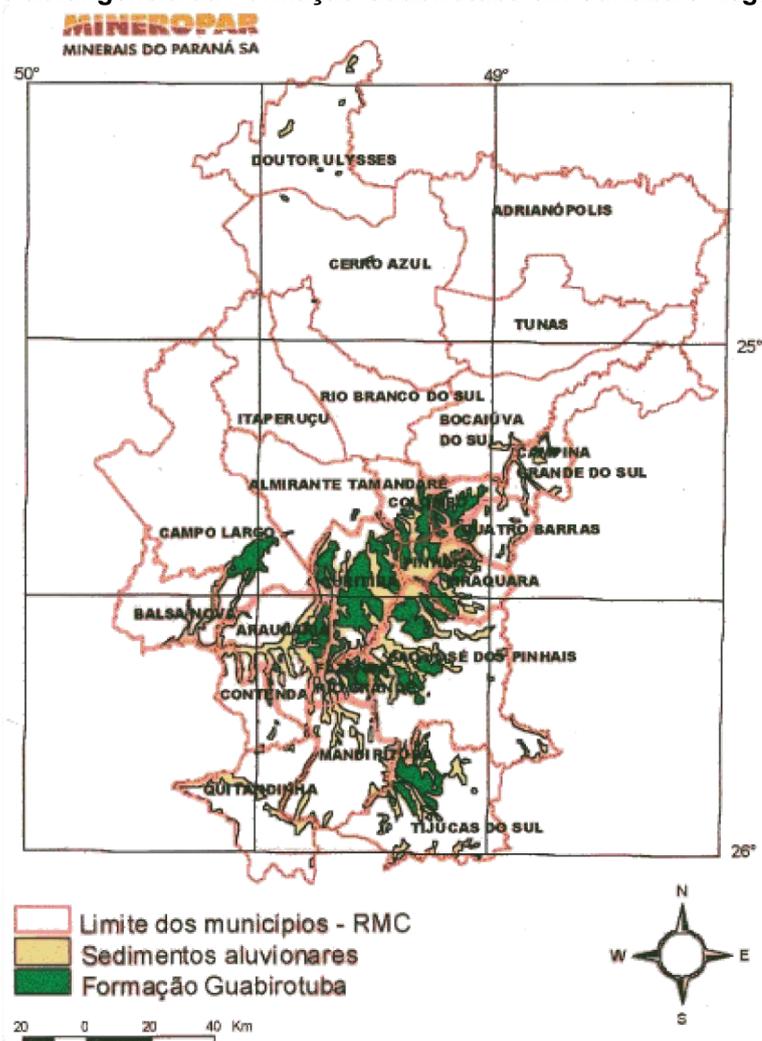
Os solos tropicais podem ser subdivididos em duas grandes classes: os solos saprolíticos e os solos lateríticos. Os saprolíticos provêm da alteração *in situ* da rocha após avançados estágios de degradação, possuindo estruturas originais da rocha. Já os lateríticos, mais comuns em climas quentes e úmidos, são solos que

possuem uma fração argilosa constituída principalmente de minerais de caulinita, óxido de ferro e alumínio, além de serem bem agregados, ou seja, de apresentarem partículas individuais ligadas umas às outras por agentes cimentantes ou forças de coesão e adesão (TEIXEIRA, 2019; ABNT, 1995).

### 2.1.1 Solo argiloso e a Formação Guabirotuba

A Formação Guabirotuba é a principal formação geológica da Bacia Sedimentar de Curitiba, compreendendo uma área de cerca de 3000 km<sup>2</sup> e abrangendo Curitiba e seis municípios da Região Metropolitana, como pode ser visto na Figura 1 (PEREIRA, 2004).

Figura 1 – Área de abrangência da Formação Guabirotuba em Curitiba e Região Metropolitana



Fonte: Mapa Geológico do Estado do Paraná DNPM/MINEROPAR (1989) *apud* Felipe (2011).

De acordo com Salamuni *et al.* (1999), a Formação Guabirotuba pode ser dividida em quatro litologias principais: as argilas inconsolidadas e depósitos de lamias, que possuem coloração cinza-esverdeada a esbranquiçada com granulometria fina ou coloração rosada a ocre quando alteradas pela laterização; os depósitos carbonáticos (caliches), que possuem cores branca a creme; os depósitos arcossianos e areias arcossianas, que apresentam minerais de quartzo, quartzito e feldspato em sua composição, tendo cores variadas e os depósitos rudáceos, que são compostos por seixos de quartzo, com granulometria irregular.

O perfil típico de alteração da Formação Guabirotuba pode ser observado na Figura 2, sendo que o principal grupo litofaciológico são as argilas ou argilitos. O solo de coloração vermelha faz parte do grupo dos solos lateríticos, presente na segunda camada da formação geológica (FELIPE, 2011; KORMANN, 2002).

As argilas são caracterizadas por possuírem a predominância de esmectitas, além de grãos de feldspatos caulinizados ou não, apresentando partículas siltosas ou arenosas em meio aos seus grãos (KORMANN, 2002).

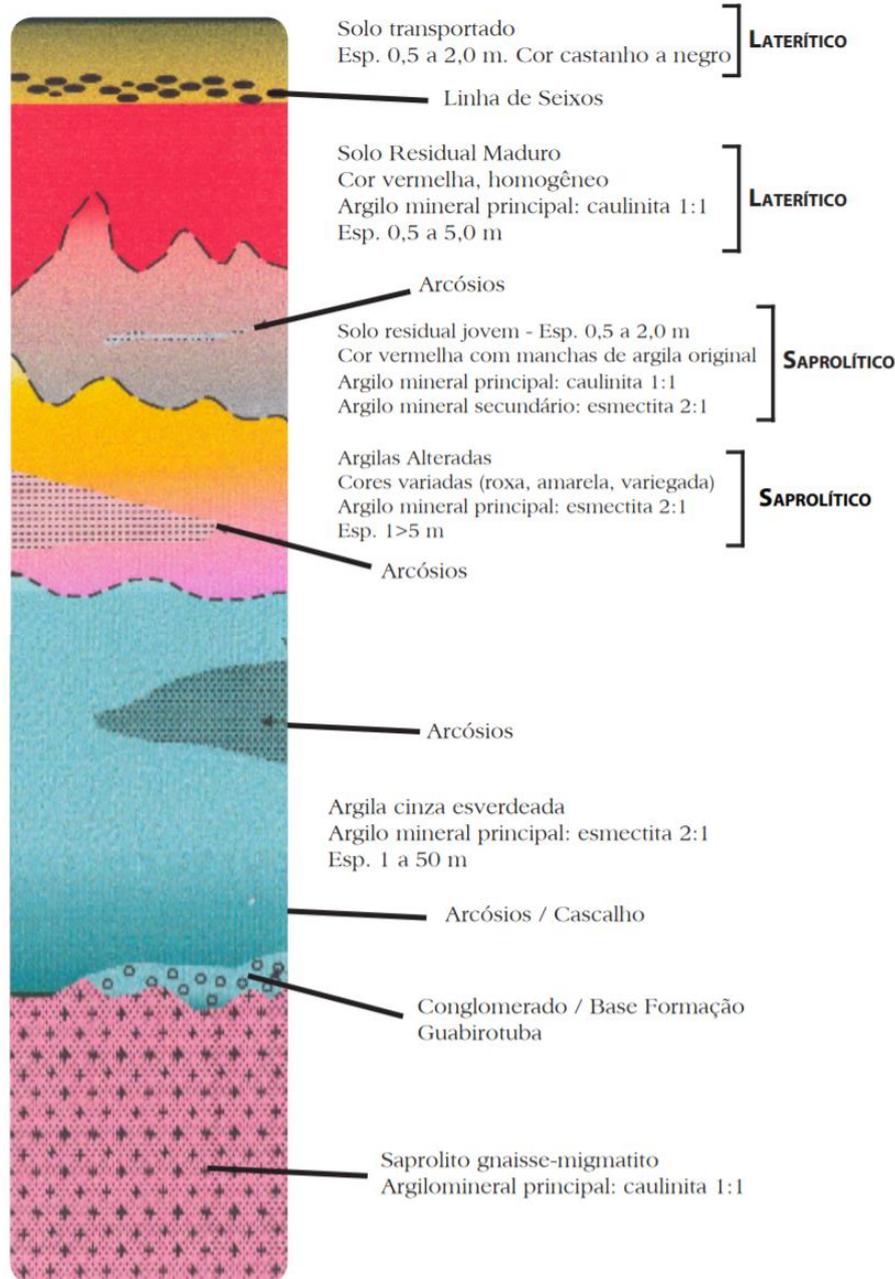
Pela grande presença de esmectitas, os solos argilosos e siltosos da formação acabam possuindo comportamento expansível, como pode ser percebido no Quadro 1. Do quadro nota-se que ao se confinar lateralmente as amostras de solo natural da Formação Guabirotuba e aplicar-se cargas, mesmo que muito baixas, as amostras tendem a expandir verticalmente.

**Quadro 1 - Ensaio de expansão em solos da formação Guabirotuba**

CORPO DE PROVA	AMOSTRA NA UMIDADE NATURAL, CONFINADA EM ANEL METÁLICO	
	EXPANSÃO LIVRE (%)	PRESSÃO DE EXPANSÃO (kPa)
7	2,42	29,1
12	1,19	25,7
14	0,16	13,6
18	0,24	34,2
22	0,48	11,8
24	0,64	20,7
25	0,51	24,6
30	0,53	4,5
37	0,44	11,9
46	0,28	17,6
51b	0,25	1,6

Fonte: Pereira (1999) *apud* Kormann (2002).

**Figura 2 – Perfil Típico de Alteração da Formação Guabirotuba**



Fonte: Felipe (2011).

A expansibilidade é causada pela entrada de água no solo, causando mudanças em seu volume através de movimentos de expansão e contração. A expansão pode ter uma origem mecânica e/ou físico-química, a primeira ocorre devido às forças de descompressão elástica e está vinculada ao tempo, já a segunda ocorre devido à atração superficial das partículas, à repulsão osmótica e à hidratação dos cátions nas partículas dos argilominerais. (MAHLER, 1994; TAYLOR e SMITH, 1986; SNETHEN, JOHNSON e PATRICK, 1977).

Além das origens citadas acima, há outros fatores que podem influenciar a expansão de um solo: o tipo e teor dos argilominerais; o tipo e a concentração de cátions adsorvidos nas partículas dos argilominerais; o tipo de resistência à cimentação; a densidade seca; a macroestrutura do material; o histórico de tensões; a temperatura; a química da água no solo; a sucção do solo; a plasticidade; a microestrutura do material; o clima; lençol freático; vegetação; permeabilidade; carregamento; perfil do solo; umidade natural; espessura da camada expansiva e profundidade da camada expansiva (PEREIRA, 2004).

### 2.1.2 Areia

As areias apresentam partículas arredondadas ou com formas poliédricas, apresentando grande quantidade de mica e, desta forma, comportando-se de forma elástica. Possuem granulometria entre 4,8 e 0,05 mm e são classificadas como: fofas, medianamente compactas e compactas, de acordo com seu grau de compactação (CAPUTO, 1988).

Os solos arenosos e as areias são formadas principalmente de duas formas: através de rochas sedimentares e transportadas ou através de alúvios, ou seja, materiais que foram recentemente depositados por inundações de rios, por exemplo (FINCH, SAMUEL e LANE, 2014).

Segundo Vieira e Rezende (2015), a areia e a pedra britada são os produtos mais minerados no Brasil em volume, correspondendo a aproximadamente 623 milhões de toneladas/ano.

A areia é comumente extraída de várzeas, leitos de rios, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, pegmatitos e arenitos, sendo que 90% da areia produzida no Brasil é extraída de leito de rios, pelo processo que pode ser observado na Figura 3 (VALVERDE, 2001).

A areia proveniente da extração de rios, pode ser usada *in natura* pelo fato de ser um bem mineral, não necessitando, assim, de qualquer tipo de tratamento ou adição de componentes ou substâncias químicas. Por esse motivo, ela é largamente utilizada na construção civil, com seu preço variando de R\$17,10 a R\$79,80 o m<sup>3</sup> em diferentes estados do Brasil no ano de 2013 (DNPM, 2014).

**Figura 3 – Processo de extração da areia: a) Margem do rio com os dutos de conexão para escoamento da areia; b) Pátio de secagem/estocagem na margem do rio**



Fonte: Santos (2013) *apud* Santos, Saad e Stevaux (2015).

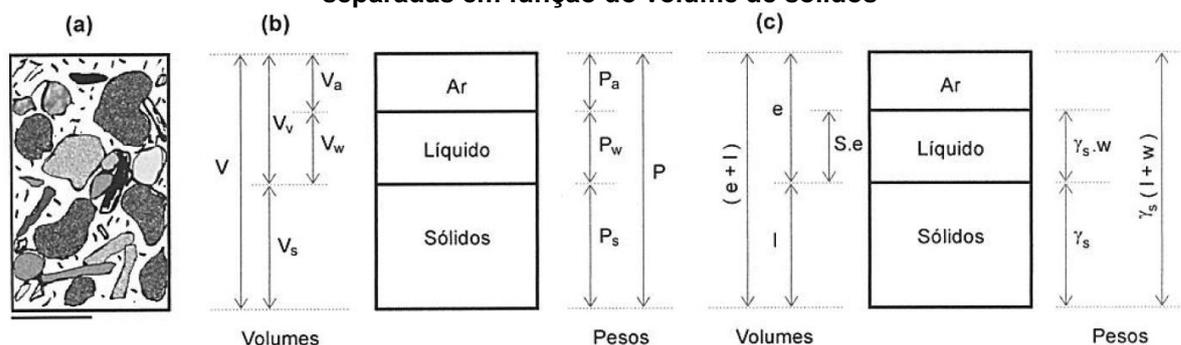
### 2.1.3 Propriedades do solo

O solo é constituído por uma série de partículas sólidas e, por esse motivo, normalmente entre as partículas são gerados vazios que podem ser parcialmente ou totalmente preenchidos com água. Desta forma, o solo nada mais é que um sistema disperso formado por três fases: a sólida, a líquida e a gasosa (FINCH, SAMUEL e LANE, 2014; CAPUTO, 1988).

Segundo Pinto (2006), a forma como o solo se comportará depende diretamente da quantidade relativa de cada uma dessas fases. Diversas relações foram encontradas para expressar as proporções entre as fases, como pode ser visto na Figura 4, onde a representação mostra as três fases que normalmente ocorrem no solo, já que em alguns casos há a possibilidade de que os vazios estejam completamente preenchidos por água.

Os maciços de solo têm seu comportamento baseado em alguns fatores externos como as pressões a que são submetidos, o clima a que estão sujeitos, a cobertura vegetal presente sobre eles e o nível do lençol freático, dentre outros (CAPUTO, 1988). Entretanto, os fatores internos como a constituição mineralógica, o tamanho das partículas e dos poros (vazios) também são fundamentais para caracterizar o comportamento do maciço (PINTO, 2006).

**Figura 4 – Fases do solo: a) Solo no estado natural; b) Fases separadas em volume; c) Fases separadas em função do volume de sólidos**



Fonte: Pinto (2006).

Finch, Samuel e Lane (2014) afirmam que o tamanho dos poros e a quantidade deles é relevante para determinação do teor de água presente no solo, ressaltando ainda que solos arenosos possuem grandes porções de macroporos, apresentando em seu interior mais ar do que água. Já nos solos finos acontece o inverso, com a presença de grandes quantidades de pequenos poros. Ainda segundo os mesmos autores, os vazios podem ser alterados devido à estrutura do maciço, à quantidade de matéria orgânica presente e à compactação do solo.

Os índices físicos são os responsáveis por correlacionar o peso e o volume de uma determinada massa do solo e fornecer valores para umidade ( $\omega$ ), índice de vazios ( $e$ ), porosidade ( $n$ ) e grau de saturação ( $S$ ), como será visto a seguir.

### 2.1.3.1 Teor de umidade gravimétrico ( $\omega$ )

O teor de umidade gravimétrico é a razão entre a massa de água ( $P_w$ ) e a massa de sólidos ( $P_s$ ) contidos em um determinado volume de solo expresso em porcentagem, conforme demonstrado na Equação 1 (DAS e SOBHAN, 2016).

$$\omega = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

De acordo com Caputo (1988), a determinação do teor de umidade em laboratório é feita através da determinação da massa da amostra natural e da massa da amostra após ter sido seca em uma estufa a  $105^\circ\text{C}$  ou  $110^\circ\text{C}$  até sua constância

de massa. Já em campo, o método mais utilizado consiste no emprego do aparelho de *Speedy*, que possui um reservatório metálico fechado e em comunicação com um manômetro capaz de medir a pressão interna. Dentro desse reservatório é colocado o solo úmido e uma ampola de carbureto de cálcio ( $\text{CaC}_2$ ), então agita-se o reservatório e a água do solo reage com o carbureto, gerando o acetileno que causará uma variação da pressão interna, obtendo-se assim, a quantidade de água existente no solo.

#### 2.1.3.2 Índice de vazios (e)

O índice de vazios é a razão entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume de sólidos ( $V_s$ ), vide Equação 2 (DAS e SOBHAN, 2016). Este índice não pode ser diretamente calculado, normalmente ele provém da determinação de outros índices. Ele é adimensional e costuma estar situado entre 0,5 e 1,5 na maioria dos solos (PINTO, 2006).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2)$$

#### 2.1.3.3 Porosidade (n)

A porosidade é a razão entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume total ( $V$ ), dado pela Equação 3 (DAS e SOBHAN, 2016). É expressa em porcentagem e tem valores usuais entre 30 e 70% (PINTO, 2006).

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (3)$$

#### 2.1.3.4 Grau de saturação (S)

O grau de saturação é definido como a razão entre o volume de água ( $V_w$ ) e o volume de vazios ( $V_v$ ) conforme a Equação 4 (DAS e SOBHAN, 2016). É expressa

em porcentagem e, assim como o índice de vazios, não é determinado diretamente, variando de 0 (seco) a 100% (saturado) (PINTO, 2006).

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (4)$$

#### 2.1.3.5 Determinação dos índices físicos

Apenas três índices físicos são determinados facilmente em laboratório, sendo eles: a umidade, o peso específico dos grãos e o peso específico natural. Os demais necessitam de correlação entre os outros índices para serem calculados (PINTO, 2006).

Neste contexto é necessário compreender o conceito dos pesos específicos, que são:

- *Peso específico dos sólidos ou dos grãos ( $\gamma_s$ ):* Corresponde à relação entre o peso das partículas sólidas e seu volume. É calculado através do ensaio de determinação da massa específica do solo, normatizado pela NBR 6458 (ABNT, 2016) e pelo DNER-ME 093/94 (BRASIL, 1994), e posteriormente multiplicado pela aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ );
  - *Peso específico da água ( $\gamma_w$ ):* Adota-se  $10 \text{ kN/m}^3$ ;
  - *Peso específico natural ( $\gamma_n$ ):* É a relação entre o peso total de solo e o volume total. Este peso é determinado pelo ensaio de compactação, mais conhecido como ensaio Proctor e normatizado pela NBR 7182 (ABNT, 2016b) e pelo DNER-ME 162/94 (BRASIL, 1994b);
    - *Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ):* Relação entre o peso dos sólidos e o volume total, calculado através do peso específico natural e da umidade;
    - *Peso específico aparente saturado ( $\gamma_{sat}$ ):* Corresponde ao peso do solo quando este se encontra completamente saturado, sem variação de volume;
    - *Peso específico submerso ( $\gamma_{sub}$ ):* É o peso efetivo do solo quando está totalmente submerso, sendo calculado através do peso específico natural subtraído do peso específico da água.

Através do entendimento destes conceitos e fazendo algumas simplificações, é possível encontrar correlações que permitiram calcular todos os índices físicos (PINTO, 2006), como mostrado nas equações 5 a 11:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (5)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1+w} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_s(1+w)}{1+e} \quad (6)$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (10)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} \quad (7)$$

$$S = \frac{\gamma_s \cdot w}{e \cdot \gamma_w} \quad (11)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + (e \cdot \gamma_w)}{1+e} \quad (8)$$

#### 2.1.4 Propriedades hidráulicas do solo

Os solos são permeáveis devido à existência dos vazios entre as partículas, como já visto anteriormente. A água frequentemente ocupa a maior parte ou a totalidade dos vazios no solo e, quando ela é submetida a diferenças de potenciais, ocorre o seu deslocamento no interior do solo (DAS e SOBHAN, 2016; PINTO, 2006).

De acordo com Caputo (1988), a água contida nos vazios do solo pode ser classificada da seguinte forma: água de constituição, ou seja, aquela que compõe a estrutura molecular da partícula sólida; água adesiva ou adsorvida, que corresponde à película de água que envolve e se adere à partícula sólida; água livre, que preenche todos os vazios do maciço e seu estudo é regido pelas leis da hidráulica; água higroscópica, que é a umidade residual que permanece no solo após este ter sido seco ao ar livre; e a água capilar, que é aquela que ascende pelos vasos capilares gerados pelas partículas sólidas nos solos de grãos finos.

Das e Sobhan (2016) deixam claro a importância do estudo do fluxo da água na mecânica dos solos para estimar a quantidade de água que infiltra no maciço sobre diversas condições hidráulicas, sendo possível, investigar problemas envolvendo o bombeamento de água do subsolo de construções e realizar análises de estabilidade de barragens de terra e contenções sujeitas à infiltração.

Pinto (2006) ressalta ainda que o estudo da percolação intervém em muitos problemas práticos, citando os mesmos trazidos por Das e Sobhan (2016) e acrescentando ainda o auxílio na análise de recalques, pois normalmente o recalque está relacionado com o índice de vazios que, conseqüentemente, está ligado à expulsão de água dos vazios.

## **2.2 Infiltração**

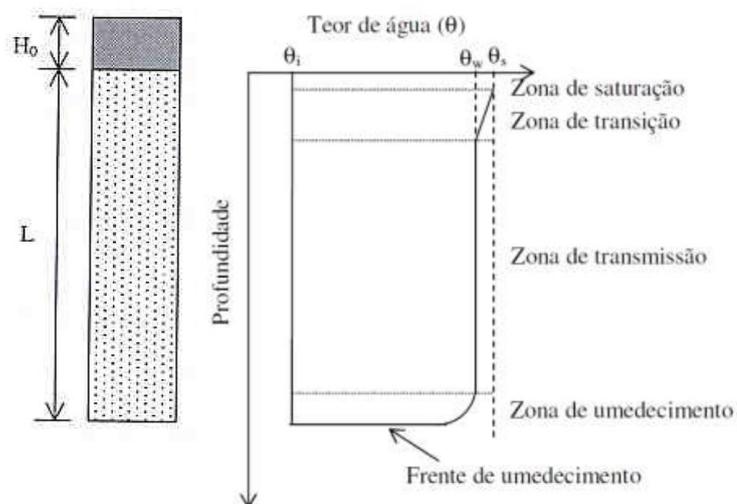
A infiltração, conforme definido por Lima (2010), é o processo físico no qual a água atravessa verticalmente a superfície do solo. Ela está diretamente ligada ao ciclo hidrológico, pois afeta o escoamento superficial que é responsável pelas inundações e erosões (CARVALHO e SILVA, 2006).

Durante um evento chuvoso, a água poderá escoar sobre a superfície do solo ou infiltrar. Entretanto, quando a chuva é muito forte, observa-se a formação de um fluxo superficial hortoniano, que poderá culminar na formação de fendas que podem evoluir até se tornarem voçorocas. Contudo, quando a infiltração ocorre, a água percola no solo por várias direções até o nível freático (COELHO NETTO, 1994).

A velocidade de infiltração tende a ser mais rápida em solos mais secos, pois, à medida que ele vai umedecendo, a capacidade de infiltração reduz até se alcançar uma velocidade de equilíbrio onde a absorção de água é pequena ou quase nula. A velocidade de equilíbrio está condicionada a algumas características do solo como a textura, a estrutura e a porosidade (LEPSCH, 2010).

O perfil típico de umidade do solo durante o processo de infiltração está presente na Figura 5. A zona de saturação corresponde à zona onde o solo está com um teor de umidade igual ao teor de saturação e corresponde a uma camada de cerca de 1,5 cm. A zona de transição possui aproximadamente 5 cm e o teor de umidade decresce rápido com a profundidade. Na zona de transmissão é onde ocorre uma pequena variação de umidade em relação ao tempo. E, por fim, a zona de umedecimento é a região onde há um grande gradiente hidráulico, variando abruptamente a umidade e sendo o limite visível da movimentação da água no solo (LIMA, 2010).

**Figura 5 – Perfil de umidade do solo durante a infiltração**



Fonte: Carvalho e Silva (2006).

A taxa de entrada da água no solo tende a diminuir com o tempo devido ao umedecimento do perfil, sendo que atinge um valor mínimo constante denominado velocidade de infiltração básica (VIB) (GONDIM *et al.*, 2010; POTT e MARIA, 2003).

Mensurar a taxa de infiltração permite saber quanto efetivamente infiltra no solo e quanto passa a ser escoamento superficial (FIORIN, 2008). Coelho Netto (1994) menciona em sua publicação o trabalho de Child [s.d.] que afirma que a taxa de infiltração pode ser tanto consequência da condutividade hidráulica e do gradiente de sucção, conforme a lei de Darcy, quanto um aumento do teor de umidade no perfil do solo.

Para Hillel (1980) e Villela e Mattos (1975), a capacidade de infiltração representa a vazão máxima por unidade de área e por unidade de tempo capaz de atravessar a superfície do solo, no caso de um excesso de água ter sido aplicado. A taxa de infiltração pode ser dada pela Equação 12:

$$T_i = \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

Onde:

$T_i$  = taxa de infiltração, em mm.h<sup>-1</sup>;

$I$  = infiltração acumulada, em mm;

$t$  = tempo, em h.

## 2.2.1 Fatores que interferem na capacidade de infiltração

Alguns fatores que interferem na capacidade de a água infiltrar no solo, de acordo com Carvalho e Silva (2006), são:

- *Condição da superfície:* áreas urbanizadas apresentam menores velocidades de infiltração que áreas agrícolas;
- *Tipo de solo:* a textura e a estrutura influenciam diretamente na infiltração;
- *Condição do solo:* o preparo e o manejo do solo tendem a aumentar a capacidade de infiltração;
- *Umidade inicial do solo:* a capacidade de infiltração é maior em solos inicialmente secos.
- *Carga hidráulica:* quanto maior for a carga hidráulica, ou seja, a espessura da lâmina de água sobre a superfície de solo, maior será a taxa de infiltração;
- *Temperatura:* quanto maior for a temperatura, maior a velocidade de infiltração devido à diminuição da viscosidade da água;
- *Presença de fendas, rachaduras e canais biológicos originados por raízes decompostas ou pela fauna:* atuam como caminhos preferenciais, aumentando a capacidade de infiltração;
- *Compactação do solo por máquinas e animais:* reduzem a capacidade de infiltração;
- *Compactação do solo por ação das chuvas:* também reduzem a capacidade de infiltração, sendo que a intensidade dessa ação varia de acordo com a quantidade de cobertura vegetal, com a energia cinética da precipitação e com a estabilidade dos agregados do solo; e
- *Cobertura vegetal:* as raízes das plantas criam caminhos preferenciais, aumentando a  $T_i$  e reduzindo os impactos das gotas de chuva, favorecendo a atividade microbiana, de insetos e animais, o que também aumenta a infiltração.

### 2.2.2 Modelos de infiltração

Como já visto anteriormente, diversos fatores podem influenciar a infiltração da água no solo, o que torna difícil caracterizar todas as variáveis que interferem no processo. Neste contexto, alguns modelos foram propostos com o objetivo de simplificar o estudo da infiltração, sendo eles empíricos ou teóricos (LIMA, 2010).

De acordo com Brandão *et al.* (2006), os modelos empíricos têm como principal vantagem relacionar de forma simplificada os parâmetros do modelo com as características do solo, englobando fatores que são difíceis de serem considerados nos modelos teóricos, como, por exemplo, a heterogeneidade do solo. Já a principal limitação se deve ao fato de que os dados ajustados nas equações são válidos apenas nas condições para as quais foram delimitados. Os principais modelos empíricos utilizados são os de Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton e Holtan.

Dentre os modelos empíricos, Cunha *et al.* (2009) afirmaram que, para determinar a velocidade de infiltração da água em um Latossolo Amarelo, o modelo de Kostiakov foi o que melhor representou os resultados obtidos. Já Teixeira *et al.* (2010) estudaram um Argissolo Vermelho Amarelo de Pelotas, Rio Grande do Sul, e o modelo que melhor se ajustou aos dados obtidos por eles foi o modelo de Kostiakov-Lewis, seguido pelo de Kostiakov e de Horton, nessa ordem.

Na Tabela 2 é possível ver as equações de infiltração definidas por cada pesquisador e suas hipóteses.

Os modelos teóricos, por sua vez, são fundamentados na teoria física do fluxo em meios porosos, descrito pela equação de Darcy. Esses modelos delimitam condições de contorno específicas e requerem dados de entrada detalhados. Destacam-se os modelos de Philip, Green-Ampt e o de Green-Ampt modificado por Mein e Larson.

Dentre esses modelos, o mais utilizado é o de Green-Ampt. Entretanto, quando os parâmetros de entrada desse método são adequados através de equações empíricas, ou seja, utilizando-se as características do solo, os resultados obtidos para a infiltração acumulada não são satisfatórios (LIMA, 2010).

A Tabela 3 apresenta um resumo das equações de infiltração definidas por cada pesquisador para os modelos teóricos e suas hipóteses.

**Tabela 2 – Modelos empíricos para determinar a infiltração da água no solo**

Modelo	Taxa de infiltração*	Hipótese
Kostiakov (1932)	$i = k.a.t^{a-1}$	Os parâmetros não têm significados físicos próprios e são avaliados a partir de dados experimentais, podendo ser determinados estatisticamente.
Kostiakov-Lewis (1945)	$i = k.a.t^{a-1} + i_f$	Introduziu-se um termo de infiltração constante na equação de Kostiakov para descrever a infiltração de forma adequada quando os tempos forem longos.
Horton (1940)	$i = i_f + (i_i - i_f)e^{-\beta.t}$	A equação foi estabelecida considerando que a redução da taxa de infiltração com o tempo é fortemente controlada por fatores que ocorrem na superfície do solo, durante a redução a taxa de infiltração se aproxima de um valor constante.
Holtan (1967)	$i = i_f + a(M - i)^n$	A equação parte da premissa de que a umidade, a porosidade e as fendas criadas no solo pelo sistema radicular são os principais fatores que afetam a infiltração.

**Nota:** Nas equações de Kostiakov e Kostiakov-Lewis:  $k$  e  $a$  são constantes que dependem do solo e determinados através do método gráfico (usando papel log-log) ou do método analítico (por regressão linear);  $t$  é o tempo de infiltração (em minutos) e  $i_f$  é a infiltração básica da água no solo (CARVALHO e SILVA, 2006). Na equação de Horton:  $i_f$  é a capacidade de infiltração final;  $i_i$  é capacidade de infiltração inicial;  $t$  é o tempo de infiltração (em horas) e  $\beta$  é um parâmetro de decaimento (RASOOL, DAR e WANI, 2021; WANG e CHU, 2020). Na equação de Holtan:  $i_f$  é a capacidade de infiltração;  $a$  e  $n$  são parâmetros que dependem do solo e da sua cobertura;  $M$  é o armazenamento potencial do solo acima da camada impermeável e  $i$  é a infiltração acumulada (AGUIAR et al., 1998).

Fonte: adaptado da Lima (2010).

**Tabela 3 – Modelos teóricos para determinar a infiltração da água no solo**

Modelo	Taxa de infiltração	Hipótese
Green-Ampt (1911)	$i = K_0 \cdot \left[ \frac{(\psi_o - \psi_f)}{L} \right]$	Modelo derivado da equação de Darcy desenvolvido para estimar a infiltração de água em solos homogêneos submetidos a uma carga hidráulica constante. Por exprimir a infiltração em função de parâmetros físicos do solo e não do tempo de ocorrência do processo, destaca-se dos demais.
Green-Ampt- Mein-Larson (1973)	$Ti = K_0 \cdot \left[ 1 + \frac{\psi_f(\theta_s - \theta_i)}{1} \right]$	A modificação feita por Mein e Larson (1973) permitiu que a equação de Green-Ampt também pudesse ser aplicada no período de tempo durante o qual não ocorre o empoçamento de água na superfície do solo, passando a ser aplicável para condições de infiltração durante a precipitação.
Philip (1957)	$i = \frac{S}{2\sqrt{t}}$	Equação derivada de Richards e solucionada a partir da consideração da condição de contorno de saturação permanente na superfície do solo.

**Nota:** Das equações de Green-Ampt e Green-Ampt modificada por Mein-Larson:  $K_0$  é a condutividade hidráulica do solo saturado (em mm.h-1);  $\psi_o$  é o potencial matricial inicial;  $\psi_f$  é o potencial matricial na frente de umedecimento;  $L$  é a profundidade da frente de umedecimento;  $\theta_s$  é a umidade do solo correspondente à saturação e  $\theta_i$  é a umidade inicial do solo (LIMA, 2010). Na equação de Philip:  $t$  é o tempo de infiltração e  $S$  é um coeficiente que depende da difusividade e da capacidade de retenção da água no solo (AGUIAR et al., 1998).

**Fonte: adaptado da Lima (2010).**

A taxa de entrada da água no solo tende a diminuir com o tempo, devido ao umedecimento do perfil, sendo que atinge um valor mínimo constante denominado velocidade de infiltração básica (VIB) (GONDIM *et al.*, 2010; POTT e MARIA, 2003).

### 2.2.3 Tipos de ensaios de infiltração disponíveis no mercado

Paixão *et al.* (2004) afirmam que a gestão das águas e dos sais nas camadas superficiais do solo foi, durante muito tempo, uma preocupação exclusiva das ciências agrárias.

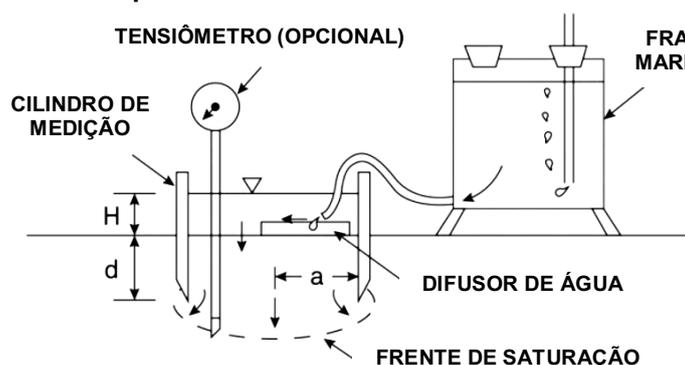
Entretanto, recentemente os ensaios de infiltração têm sido realizados também em projetos de Geologia, de engenharia e ambientais, com o objetivo de determinar o coeficiente de permeabilidade dos terrenos para futura implantação de obras civis, como por exemplo: a implantação de barragens e túneis; a investigação de áreas contaminadas; a implantação de aterros sanitários e cemitérios; dentre outros (GÓES, 2021).

Por esse motivo, a maioria dos procedimentos de ensaios que medem infiltração provém de estudos realizados para o cultivo de plantações. A Meter Group é uma das empresas responsáveis por desenvolver tecnologias de ponta para a medição da infiltração no aspecto agrônomo. Em um artigo técnico publicado no site da empresa por alguns autores (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]) é possível elencar os seguintes ensaios como sendo os mais frequentemente utilizados para a medição da infiltração em campo para solos saturados:

- *Infiltrômetro de anel simples:* consiste em um único cilindro de extremidades abertas e paredes finas que é inserido no solo a uma profundidade específica, normalmente em torno de 5 cm, onde se utiliza a técnica de carga constante ou carga variável. No caso de carga constante, utiliza-se um reservatório denominado Frasco Mariotte para controlar o fluxo e o nível de água dentro do anel.

A água infiltra através do anel e se move horizontal e verticalmente pelo solo, sendo possível medir a condutividade hidráulica. Pelo fato de a água se mover em diversas direções, é necessário realizar a correção para escoamento tridimensional (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]). A Figura 6 apresenta um modelo do equipamento;

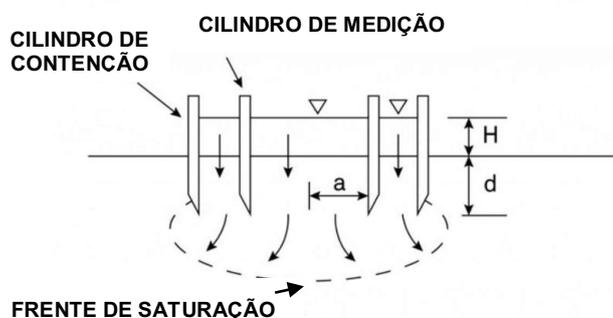
Figura 6 – Esquema de ensaio de um infiltrômetro de anel simples



Fonte: Adaptado de Meter Group, [s.d.].

- *Infiltrômetro de anel duplo*: consiste em dois cilindros iguais ao utilizado no ensaio de infiltração de anel simples, porém há apenas um cilindro de medição que é colocado dentro de um cilindro maior que serve apenas para evitar divergências de fluxo do cilindro de medição e assim, simplificar as análises. Neste ensaio há apenas o fluxo vertical da água, porém, para que isso aconteça, o nível de água precisa ser mantido igual em ambos os cilindros para se ter o mesmo gradiente de pressão, requerendo uma grande quantidade de água já que o cilindro de medição tem de 10 a 50 cm (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]). A Figura 7 apresenta um modelo esquemático desse método;

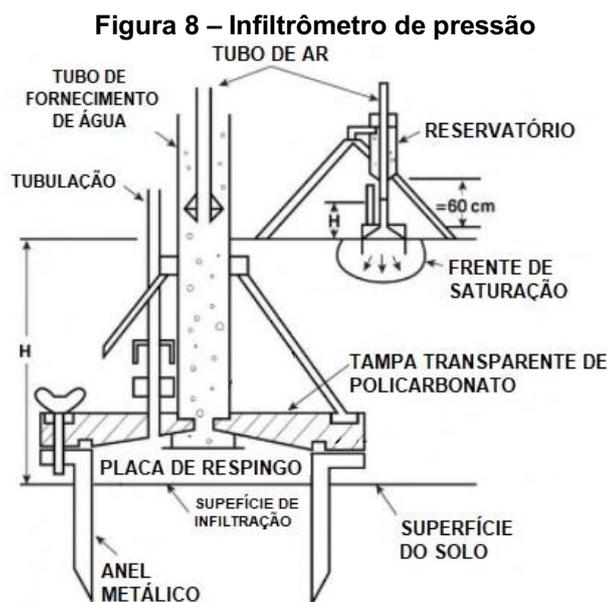
Figura 7 – Esquema de ensaio de um infiltrômetro de anel duplo



Fonte: Adaptado de Meter Group, [s.d.].

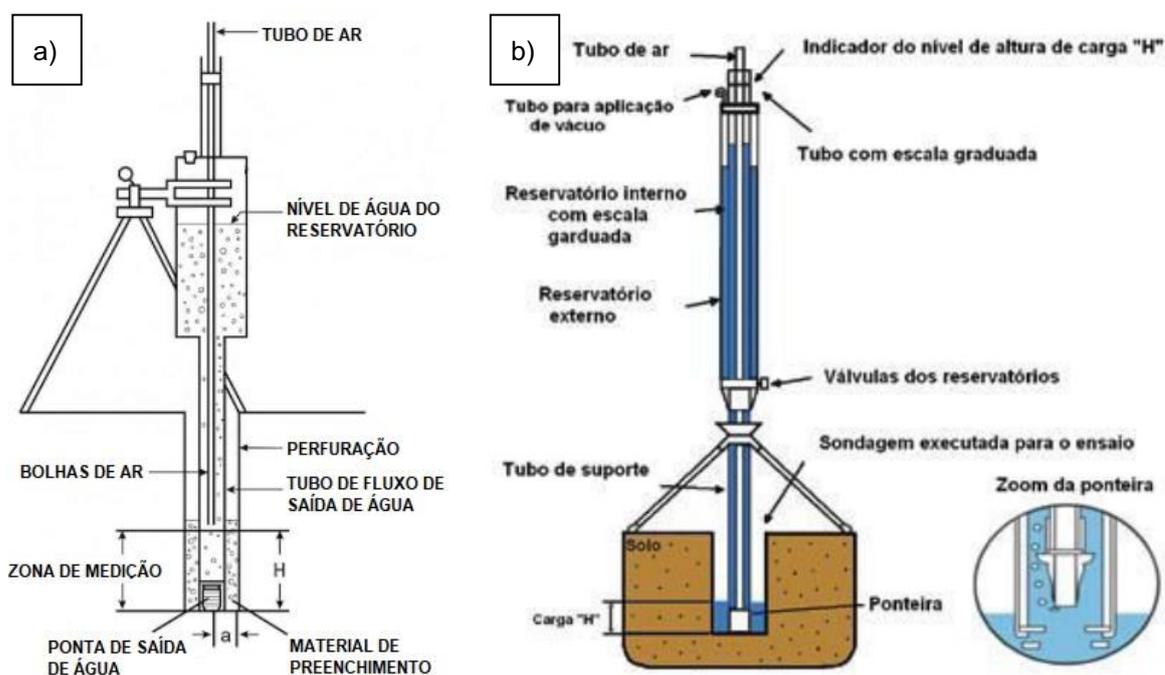
- *Infiltrômetro de pressão*: este equipamento é similar ao infiltrômetro de anel simples, porém possui um dispositivo na parte superior do anel que permite o

controle da pressão aplicada. O executor do ensaio aplica uma pressão única por um certo período, depois sobe a pressão por um tempo determinado e desce novamente, repetindo o processo até que a taxa de infiltração esteja praticamente constante. Através desse ensaio, também é possível obter o fator de comprimento capilar macroscópico do solo (fator Alpha) para a correção do fluxo tridimensional e a sorptividade do solo (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]). A Figura 8 esboça o equipamento;



- *Permeâmetro de perfurações*: esse método utiliza carga constante para evitar erros de verificação da água dentro do furo. Uma perfuração é executada no solo até a profundidade desejada, o permeâmetro é então montado sobre o furo e o Frasco Mariotte é utilizado para manter a altura de água constante dentro da perfuração. Calcula-se o afluxo e espera-se até o equilíbrio para posteriormente usar esses valores no cálculo da condutividade hidráulica, a qual deverá ser corrigida para o fluxo tridimensional (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]). Há ainda o permeâmetro de *Guelph*, que possui o mesmo aspecto de montagem e funcionalidade, sendo capaz de medir a condutividade hidráulica saturada e o potencial mátrico do solo *in situ* (RIBEIRO, PEREIRA e IWASHITA, 2009). Na Figura 9a é demonstrada um permeâmetro básico e na Figura 9b é apresentado um permeâmetro de *Guelph*.

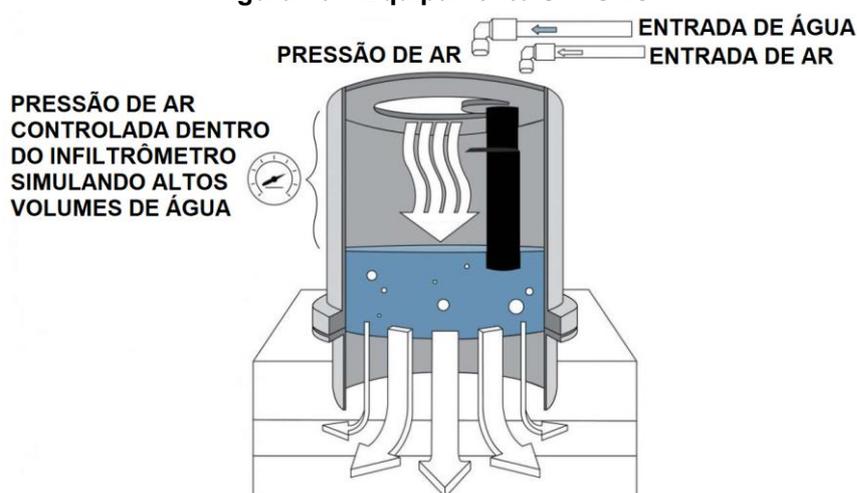
Figura 9 – a) Permeâmetro de perfuração; b) Permeâmetro de *Guelph*



Fonte: Adaptado de Meter Group, [s.d.] e Ribeiro, Pereira e Iwashita, 2009 *apud* Soto, 1999.

- **SATURO**: é um equipamento desenvolvido pela Meter que automatizou a obtenção da condutividade hidráulica em campo com a aplicação de duas pressões diferentes, apresentando automaticamente o valor da condutividade e evitando erros humanos. O equipamento funciona com a inserção de água em seu topo e o sistema usa a pressão do ar para criar diferenças de pressões, sendo que uma bomba mantém o nível correto de água dentro do cilindro, como pode ser visto no esquema da Figura 10 (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]).

Figura 10 – Equipamento SATURO



Fonte: Adaptado de Meter Group, [s.d.].

Além desses equipamentos para medir a infiltração de solos saturados em campo, existem os equipamentos disponíveis para medir a condutividade hidráulica de solos não saturados em laboratório de forma a se obter coeficientes que podem ser utilizados nos modelos teóricos e empíricos da determinação da infiltração. Os coeficientes estão citados abaixo:

- *Células de fluxo*: necessitam de tensiômetros por onde a água passa enquanto percola o solo e os tensiômetros monitoram o potencial da água, sendo que o usuário controla o fluxo de entrada até que ambos estejam com o mesmo potencial (sucção) (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]);
- *Método da evaporação*: também consiste na instalação de tensiômetros em diferentes profundidades do solo em um tubo, sendo que uma das extremidades é fechada para permitir a evaporação apenas pela superfície, aumentando o potencial matricial no tubo. A massa de solo e o gradiente matricial são medidos ao longo do tempo enquanto a água evapora, permitindo o cálculo do fluxo matricial potencial ou a condutividade hidráulica do solo não-saturado (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]);
- *HYPROP*: é um equipamento desenvolvido pela Meter que possui dois tensiômetros em diferentes alturas, dentro de uma amostra de solo que é aberta em apenas em um dos lados. O equipamento precisa ficar sobre uma balança para que a massa da amostra seja medida conforme a água evapora. Essas informações permitem a determinação das propriedades de absorção do solo e da condutividade hidráulica não-saturada (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]).

É possível obter ainda a taxa de infiltração em campo de solos não saturados através de infiltrômetros de tensão. Um dos equipamentos muito utilizado para esse fim é o Infiltrômetro *Mini Disk* da Meter, pois ele permite obter informações da infiltração e da condutividade hidráulica dos solos testados de forma rápida, simples e econômica, já que para funcionar o equipamento precisa de pouca água (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]). A Figura 11 apresenta o Mini Disk.

**Figura 11 – Mini Disk**

**Fonte: Meter Group, [s.d.].**

Os métodos para se medir infiltração onde não há emprego de tecnologia eletrônica são arcaicos, demandando grandes quantidades de água, mobilização de canteiros de obra e mais tempo para serem executados. Já os métodos eletrônicos de medição, que permitiriam um menor desperdício de tempo e recursos naturais, não fornecem de forma direta a infiltração, sendo necessário encontrar parâmetros por meio dos ensaios como a condutividade hidráulica, para posteriormente se obter o valor da taxa de infiltração, além de possuírem custos elevados (CAMPBELL *et al.*, [s.d.]; JOHNSON, 1991).

Além disso, nenhum dos ensaios de campo permite que a frente de infiltração possa ser identificada, ou seja, é possível obter o valor da taxa de infiltração, mas o caminho e a velocidade que essa água percola no solo não são passíveis de serem obtidos empiricamente. Segundo Johnson (1991), nenhum método de ensaio para se obter infiltração é satisfatório para todas as condições de campo. Os problemas que se deseja resolver, o orçamento destinado a solução e a disponibilidade de equipamentos e materiais auxiliam a ditar o melhor método a se utilizar para medir a infiltração.

Na tentativa de agilizar a obtenção de dados e aprimorar o estudo do movimento da água no solo, que como já explicado anteriormente neste trabalho, ainda é um assunto pouco estudado. Diversos pesquisadores têm desenvolvido equipamentos tecnológicos de *hardware* livre ou adaptado sondas já disponíveis no

mercado para medição de temperatura, umidade e condutividade elétrica do solo, para encontrar os dados que precisam ou obter dispositivos com custo acessível.

É o caso do estudo de Lima (2010), que será apresentado a seguir; da pesquisa de Cruz (2013), que desenvolveu um sensor de umidade para o solo em um *hardware* livre para a determinação da frente de molhamento; ou ainda do trabalho de Andrade, Carvalho e Rodrigues (2014), que utilizaram três estações tensiométricas para obter a tensão da água no solo através do Sensor Matricial Granular (GMS) conectado a um *datalogger* que também media temperatura, para assim, monitorarem a variação da disponibilidade de água superficial.

### **2.3 Avanços tecnológicos na determinação da infiltração**

Os microcontroladores têm sido desenvolvidos e utilizados em diversos setores do mercado nos dias de hoje como: equipamentos educacionais, eletrodomésticos, brinquedos infantis, equipamentos de suporte automotivo, industrial, de telecomunicação e médico, além de serem empregados no controle de robôs e para armamento militar (GRIDLING e WEISS, 2007).

O Arduino é um tipo de placa microcontroladora que pode ser programada e possui *hardware* livre, ou seja, permite que os usuários possam montar, modificar, melhorar e personalizar o seu dispositivo. A plataforma do Arduino possui um número crescente de novos usuários e tem se tornado cada vez mais popular pela facilidade de usar e escrever o código no programa, além de ser barato e funcional (YUSRO, GUNTORO e RIKAWARASTUTI, 2021).

Adilson Thomsen (2014) destaca em seu artigo para a página *FilipeFlop*, que é um dos maiores portais *maker* do Brasil, o fato de o Arduino possuir um microcontrolador da série AVR ATmega 328 produzido pela Atmel, com circuitos de entrada/saída e que pode ser conectado facilmente ao computador via cabo USB e programado via ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) utilizando a linguagem C/C++, sem necessitar de nenhum dispositivo extra. A Figura 12 mostra o Arduino.

**Figura 12 – Arduino**

Fonte: Thomsen (2014).

Segundo Yusro, Guntoro e Rikawarastuti (2021), este dispositivo é capaz de interagir com botões, diversos sensores, motores, alto-falantes, GPS, câmeras, telas LCD e atualmente, é possível até usar *smartphones* como controle remoto.

Juntamente com o avanço dos microcontroladores, viu-se a necessidade de se desenvolver também dispositivos que conectassem à internet, porém essa tecnologia ainda está em desenvolvimento e hoje recebe o nome de *Internet of Things* (IoT). O IoT visa expandir os benefícios de se estar constantemente conectado à internet para poder controlar alimentos, eletrônicos, coleções e qualquer equipamento que esteja conectado as redes globais através de sensores. Em síntese, o IoT se refere a objetos que podem ser identificados como representações virtuais em estruturas baseadas na Internet (YUSRO, GUNTORO e RIKAWARASTUTI, 2021; LOKHANDE e MOHSIN, 2017; LUETH, 2015; GSM ASSOCIATION, 2014).

O módulo ESP 8266 é um dos componentes utilizados para permitir que os dados armazenados pelo Arduino sejam transferidos para a rede via *wi-fi*. Ele foi projetado pela empresa *Espressif Systems* e é fabricado pela AI-Thinker. A Figura 13 mostra o módulo.

**Figura 13 – Módulo ESP 8266**

Fonte: Vidal (2017).

De acordo com Vidal (2017), este módulo ficou popular rapidamente por ser fácil e prático na integração de redes *wi-fi* e conexões TCP/IP. O ESP também possui baixo custo e a sua placa vem integrada a um MCU (placa de desenvolvimento ou SoC – *System-on-a-Chip* - Sistema em um Chip), permitindo que sejam embarcados códigos que possibilitam o controle de seus pinos e seu funcionamento sem ser necessário um MCU externo. Sendo assim, o Arduino é usado apenas para a etapa de programação, não havendo necessidade de que o ESP esteja conectado a ele ou a outras placas para funcionar.

Tanto o Arduino como o módulo ESP 8266 são utilizados apenas para programar, armazenar informações e conectar à rede os equipamentos a que são ligados. No estudo da infiltração, ambos os dispositivos podem ser usados juntamente com sensores disponíveis no mercado e que podem, de alguma forma, fornecer informações necessárias para quantificar a taxa de infiltração, para quando a visualização da matriz de solo não for possível.

Lima (2010) utilizou em sua tese diversos sensores de umidade ECH<sub>2</sub>O (Decagon Devices, Inc.) do modelo EC-20 colocados em profundidades específicas para poder acompanhar o deslocamento da frente de umedecimento no comprimento do perfil de solo, como pode ser visto na Figura 14.

**Figura 14 – a) Sensor de umidade ECH<sub>2</sub>O modelo EC-20; b) Sensores instalados no solo a três profundidades diferentes**



Fonte: Lima (2010).

Ainda segundo Lima (2010), as leituras dos sensores foram feitas a cada minuto e armazenados em um *datalogger* específico para posteriormente serem compilados e assim, ser possível determinar o tempo gasto para que a frente de umedecimento atingisse a profundidade pré-determinada onde os sensores estavam, sendo que as leituras indicaram os momentos iniciais e finais da passagem da água pelos sensores e o tempo foi definido como a média entre as leituras.

O estudo de Lima (2010) é apenas um exemplo de utilização de sensores para acompanhar a infiltração, pois o sistema utilizado nesta pesquisa possui um custo elevado e é comumente utilizado na agricultura, para determinar a umidade dos solos para a irrigação e manejo.

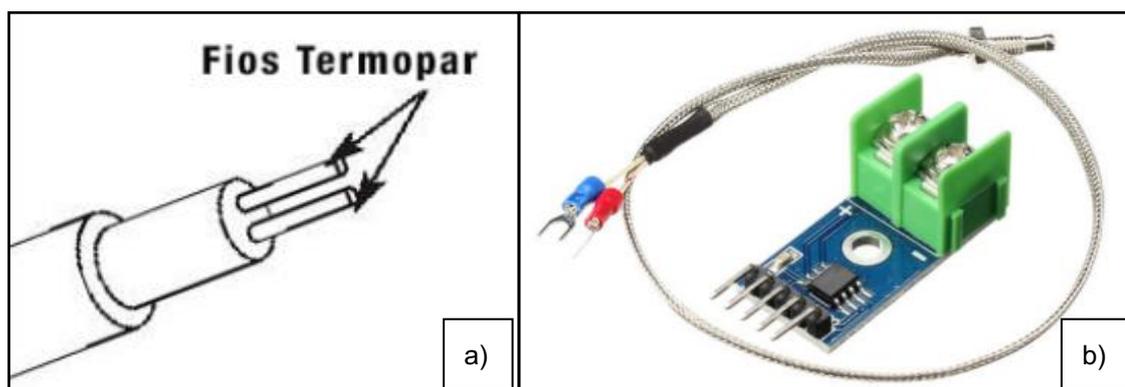
Para realizar a mesma função do sensor da Decagon, porém com menor custo e que permita a alteração do código de programação para inserir variáveis relevantes para os solos compactados e usuais da Geotecnia, é possível integrar sensores compatíveis com o Arduino e o ESP, obtendo-se funcionalidades muito semelhantes ao da EC-20. Alguns exemplos de sensores que podem substituir o EC-20 e se conectam facilmente aos microcontroladores são os termopares e os sensores de capacitância (FDR), capazes de medir umidade.

Os termopares são sensores utilizados para medir temperatura, normalmente constituídos de dois metais que estão unidos em uma de suas extremidades (Figura 15a) e na outra estão ligados a um termômetro termopar. Esses fios compostos por metais diferentes, quando aquecidos, tendem a gerar uma corrente contínua que flui no circuito termoelétrico, ou seja, ao aquecer uma das extremidades até que uma tensão seja gerada, é possível correlacioná-la com a temperatura. Os termopares são classificados de acordo com a combinação de metais ou a calibração, sendo que as calibrações mais comuns são a J, K, T e E. Cada calibração possui diferentes intervalos de temperatura e pode ser operada em ambientes específicos, sendo que o intervalo máximo de temperatura é limitado pelo diâmetro do fio do termopar (OMEGA ENGINEERING BRASIL, [s.d.]).

Este tipo de sensor pode ser utilizado para determinar a frente de umedecimento da infiltração da mesma forma que os sensores ECH<sub>2</sub>O foram utilizados por Lima (2010), pois quando a água encontra o sensor, ela gera uma alteração na temperatura registrada por ele, permitindo assim, identificar o exato momento em que a água atingiu a profundidade pré-determinada.

O termopar tipo K com módulo MAX 6675 (Figura 15b) é o mais indicado para essa função, por já vir com o módulo que mede a tensão do termopar e envia (via SPI – *Serial Peripheral Interface* – Método de Comunicação Serial) o valor medido com seu sinal tratado, facilitando seu uso. Ele possui temperatura de operação de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$  e possui faixa de medição de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $+600^{\circ}\text{C}$  (FILIFEFLOP, [s.d.]).

**Figura 15 – a) Montagem interna do termopar; b) Termopar tipo K com módulo MAX 6675**



Fonte: a) Omega Engineering Brasil ([s.d.]); b) Filipeflop ([s.d.]).

Já o sensor de capacitância (FDR), capaz de medir umidade, foi desenvolvido com a finalidade de detectar e medir a variação de umidade em um solo, principalmente em vasos de plantas. Através de suas hastes ele mede a resistividade do meio e retorna valores altos quando o solo estiver seco e valores baixos quando o solo estiver úmido (OLIVEIRA, [s.d.]).

Para determinar a taxa de infiltração, é possível utilizar o sensor de umidade do solo HD-38 (Figura 16), pois ele é o que apresenta maior qualidade e confiabilidade dos dados dentre os sensores de umidade presentes no mercado hoje. A sonda do sensor é feita de aço inoxidável e possui terminais metálicos com 85 mm de comprimento em forma de duas hastes cilíndricas, o que facilita a introdução no solo. Além disso, já vem acompanhado de um módulo capaz de realizar a leitura dos dados gerados pela sonda e os encaminha para o microcontrolador (USINAINFO, [s.d.]).

**Figura 16 – Sensor de umidade do solo HD-38**



**Fonte: Usinainfo ([s.d.]).**

Com o sensor HD-38, é possível obter a resistividade do solo antes de ele ser inundado, podendo-se então acrescentar a água e acompanhar a alteração dos valores ao longo do tempo até que se estabilize novamente, quando o solo ao redor da sonda estiver completamente encharcado.

## **2.4 Equipamento desenvolvido**

Ao unir os diferentes dispositivos eletrônicos presentes no mercado em um único sistema, têm-se um novo equipamento capaz de utilizar sensores de temperatura alocados em uma pequena ponta de prova a distâncias pré-determinadas e sensores de umidade, para medir a taxa de infiltração da água em solos compactados e resistentes da Engenharia Geotécnica.

O Arduino, o ESP 8266, os termopares e os sensores HD-38 ligados por diversos componentes eletrônicos em uma placa de fibra de vidro formam um equipamento inovador e que pode contribuir significativamente para o estudo do comportamento que leva os solos de seu estado natural para o estado saturado.

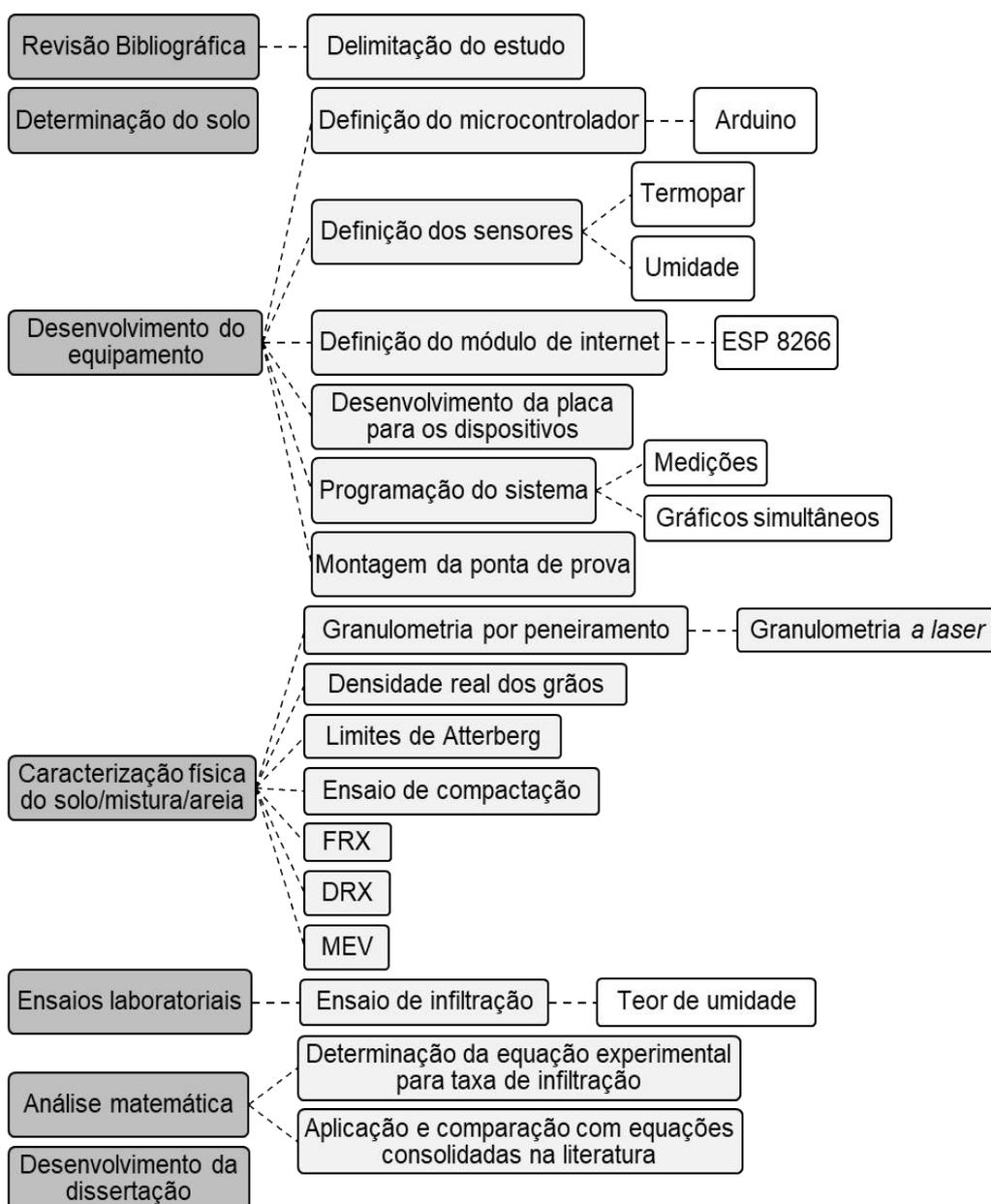
Além disso, o custo desse equipamento para realizar três ensaios simultâneos é de aproximadamente 720 reais, o que é um grande diferencial ao compará-lo com os demais equipamentos eletrônicos que tem o mesmo objetivo.

O baixo custo, atrelado a possibilidade de reprogramá-lo para as necessidades particulares de cada pesquisa faz com que este equipamento tenha um alto potencial de aplicação, principalmente na pesquisa laboratorial.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação é caracterizada por ser indutiva, sendo classificada como um estudo experimental laboratorial com o objetivo de se desenvolver uma pesquisa exploratória acerca das incertezas sobre a infiltração da água no solo (GIL, 2002; MARCONI e LAKATOS, 2003). A Figura 17 traz um esquema detalhado das sete etapas da pesquisa.

**Figura 17 – Esquema detalhado da pesquisa**



Fonte: A autora (2022).

### 3.1 Etapas da pesquisa

A primeira etapa constituiu-se de uma ampla pesquisa bibliográfica para delimitar o estudo e definir as variáveis independentes e dependentes. As variáveis independentes são todas aquelas que podem causar efeitos sobre as variáveis dependentes, sendo divididas em controláveis, constantes e de ruído (JOHANN, 2013). Nessa pesquisa tem-se a seguinte classificação:

- *Fatores controláveis:*
  - Peso específico do solo: obtido através do ensaio de compactação;
  - Teor de umidade do solo: encontrado através da Equação 1 apresentada no Capítulo 2;
  - Coluna d'água acima do CP: definida através da utilização do Frasco Mariotte.
- *Fatores constantes:*
  - Tipo de solo: solo areno-siltoso produzido em laboratório;
  - Altura do CP: 11,12 cm  $\pm$  0,01 cm;
  - Diâmetro do CP: 15,16 cm  $\pm$  0,03 cm.
- *Fatores de ruído:*
  - Temperatura da água e do solo: variável de acordo com a temperatura externa;
  - Velocidade de moldagem do CP: processo manual;
  - Tempo de infiltração: sujeito a variações de segundos.

Já as variáveis dependentes são aquelas em que as respostas provêm dos experimentos e, no caso da presente pesquisa, tem-se apenas a taxa de infiltração (*i*), calculada pela Equação 12 do Capítulo 2.

Na segunda etapa foram realizados estudos para encontrar um solo que pouco expandisse na presença de água, já que na região de Curitiba predominam-se solos da Formação Guabirotuba caracterizados por serem expansíveis. Para solucionar este problema, foram adicionadas porcentagens de areia em um processo iterativo até que a expansão fosse imperceptível, chegando-se a uma

mistura composta de 70% de areia e 30% de solo siltoso antes dos finos serem excluídos.

A terceira etapa abrangeu o desenvolvimento do equipamento, definindo-se o microcontrolador, o módulo de internet e os sensores a serem utilizados. Depois projetou-se uma placa em fibra de vidro para embarcar todos os dispositivos e desenvolveu-se o programa capaz de ler e armazenar os dados e executar os gráficos em tempo real de cada sensor. Com a placa finalizada, os sensores foram alocados em uma ponta de prova feita em resina epóxi para facilitar a inserção no solo compactado.

A Tabela 4 mostra o programa experimental realizado nas etapas subsequentes.

**Tabela 4 – Programa experimental**

ENSAIOS		Solo	Areia	Mistura
Caracterização física e mecânica	Granulometria lavada	*	*	*
	Granulometria <i>a laser</i>	*	*	*
	Massa específica dos grãos (Gs)	*	*	*
	Limite de liquidez (LL)	*		*
	Limite de plasticidade (LP)	*		*
	Índice de plasticidade (IP)	*		*
	Compactação normal	*		*
	Compactação intermediária	*		*
	Compactação modificada	*		*
Caracterização química e mineralógica	Difração de Raio-X (DRX)	*		
	Fluorescência de Raio-X (FRX)	*	*	*
	Microscopia eletrônica (MEV)	*		
Infiltração	Ensaio de infiltração			*

\* Ensaio realizado

**Fonte: A autora (2022).**

Na quarta etapa foram realizados os ensaios de caracterização do solo vermelho, da areia e da mistura desenvolvida em laboratório. Definiu-se a granulometria, a massa específica real dos grãos (Gs), os limites de *Atterberg*, a composição mineralógica por Fluorescência de Raio-X (FRX), a massa específica e a umidade ótima nas três energias de compactação do solo e da mistura. Também foram feitas a granulometria, a massa específica real dos grãos e a composição mineralógica por Fluorescência de Raio-X da areia e os ensaios de Difractometria de Raio-X (DRX) e Microscopia Eletrônica (MEV) do solo.

A quinta fase consistiu na execução dos ensaios de infiltração em si, onde os CPs foram moldados na energia modificada e nas mesmas umidades definidas para o ensaio de compactação e tendo os sensores alocados no interior de cada CP.

Foi optado pela moldagem na energia modificada, pois a maioria das máquinas disponíveis comercialmente para compactação de solos atingem facilmente essa energia, dando maior aplicabilidade para os avanços encontrados com a pesquisa. Com os resultados gerados nessa fase, foi possível desenvolver equações para a determinação da taxa de infiltração do solo areno-siltoso com as diferentes umidades iniciais e, na sexta fase, compará-las com as equações presentes na literatura e que possuem o mesmo objetivo.

### 3.2 Materiais

Os materiais utilizados para a execução dos ensaios consistem basicamente em: solo siltoso, areia média e água destilada que, combinadas, formam a mistura, também chamada de solo areno-siltoso, como mostra a Figura 18.

**Figura 18 – Materiais que compõem à mistura desenvolvida para a pesquisa**



**Fonte: A autora (2022).**

#### 3.2.1 Solo vermelho siltoso

O solo utilizado foi obtido durante o processo de escavação de uma obra em Curitiba, Paraná, Brasil (-25.442425, -49.352530), no dia 16/09/2021 às 14 horas, conforme pode ser visto na Figura 19.

**Figura 19 – Localização da obra de onde o solo foi extraído**



Fonte: Google Maps (2022).

O solo foi extraído no estado deformado e possui majoritariamente a coloração avermelhada, correspondendo à primeira camada da Formação Guabirotuba. Ele foi retirado após aproximadamente 1 metro de escavação, com umidade higroscópica de 43,84%.

Como já visto anteriormente, as argilas e siltes são os materiais mais abundantes desta formação, possuindo predominância de esmectitas em sua composição mineralógica. A coloração avermelhada do solo está presente nas camadas mais superficiais dessa formação, chamada de laterítica. Nela há a predominância da caulinita e, em menor quantidade, de hematita e gibbsita. Devido a esta composição mineralógica, os solos são caracterizados como expansivos.

Como o objetivo deste trabalho é identificar a frente de saturação nas amostras, ter um solo que expande ao ser inundado não permitiria a obtenção de resultados satisfatórios. Para isso, viu-se a necessidade de tornar o solo mais grosso, menos expansivo e mais fácil de infiltrar em um primeiro momento e, assim, ser possível realizar a verificação das equações.

Para se chegar à mistura correta e ter um solo com pouca expansibilidade e granulometria adequada, uma série de ensaios foram realizados, descartando-se outros tipos de solos de diferentes colorações da mesma formação geológica, materiais de maior granulometria como os cascalhos e diversas dosagens que não atingiram as características almejadas. Por fim, chegou-se ao solo criado que é uma

mistura entre a areia (a ser especificada na sequência) e o solo siltoso vermelho com as características supracitadas.

### 3.2.2 Areia

Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), a granulometria da areia pode ser dada de acordo com os limites apresentados na Tabela 1, Item 2.1.

Com base nesta informação e das necessidades já descritas no item imediatamente anterior, optou-se pela areia média, com grãos de 0,2 a 0,6 mm.

A areia foi adquirida em uma loja de material de construção da cidade de Curitiba, comprada em sacos de 20 kg e produzidas e embaladas pela BRIFORTE, que também está localizada em Curitiba.

### 3.2.3 Água destilada

Para a homogeneização do solo e a inundação dos corpos de prova, foi utilizada água destilada, livre de impurezas.

## 3.3 Métodos

Os métodos de trabalho foram divididos em: preparação da mistura (solo + areia); ensaios de caracterização do solo siltoso, do solo areno-siltoso (mistura) e da areia; desenvolvimento do equipamento para medição da taxa de infiltração; moldagem dos corpos de prova; ensaios de infiltração e análise estatística. Cada uma dessas etapas está descrita a seguir.

### 3.3.1 Preparação da mistura

Primeiramente o solo e a areia média foram secos em estufa a  $(100\pm 5)$  °C. Mesmo após alguns dias na estufa, os materiais continuam com uma umidade residual ( $\approx 1\%$ ) que deve ser levada em consideração na hora da homogeneização. Após a secagem, o solo siltoso foi destorroado e passado da peneira #4 (4,76 mm). O solo passante foi misturado com a areia, de forma que 70% da massa da mistura

correspondesse à areia média e os outros 30% da massa fosse composta pelo solo siltoso passante na peneira #4. Por fim, a mistura foi peneirada na #200 (0,074 mm) para excluir os finos.

### 3.3.2 Ensaios de caracterização do solo siltoso, do solo areno-siltoso e da areia

Para a caracterização do solo siltoso, do solo areno-siltoso e da areia, foram realizados ensaios de granulometria (peneiramento e *a laser*), massa específica real dos grãos (Gs) e a Fluorescência de Raio-X (FRX). Para o solo siltoso e o solo areno-siltoso, foram realizados ainda os ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e compactação nas três energias (normal, intermediária e modificada) e somente para o solo siltoso foram realizados o DRX e o MEV para se observar com mais detalhes as características que tornam este solo expansível.

#### 3.3.2.1 Granulometria por peneiramento

O ensaio de granulometria foi realizado seguindo as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016). Para o solo siltoso, o peneiramento ocorreu por meio da lavagem do material, isso porque os solos da Formação Guabirotuba são muito finos e é muito difícil caracterizá-los mediante apenas o peneiramento. A norma recomenda que o solo fino seja lavado e, como ele compõe uma pequena fração do solo areno-siltoso desenvolvido na presente pesquisa, optou-se por realizar o peneiramento das duas formas (com e sem lavagem). A Figura 20 mostra o processo de lavagem para o solo areno-siltoso em uma das peneiras.

**Figura 20 – Granulometria lavada**

Fonte: A autora (2022).

Foi realizada a granulometria sem lavagem do solo areno-siltoso, pois os finos foram descartados a fim de se evitar a expansão. Entretanto, quando a amostra foi lavada devido ao fato de também apresentar partículas finas em sua composição, o solo que antes formava pequenos aglomerados que ficavam retidos nas peneiras superiores a #200, ao serem lavados acabavam passando.

A água com finos que passou pela peneira de 0,075 mm foi colocada dentro de um recipiente para que todas as partículas decantassem. Então, retirou-se cuidadosamente a água de cima e os finos foram passados para uma cápsula que foi seca em estufa a  $(100\pm 5)$  °C, e posteriormente levada para a granulometria a *laser* juntamente com as amostras de solo siltoso e areia passantes na peneira #200.

Contudo, como o processo de preparação do solo areno-siltoso influenciava diretamente a granulometria dele, a porcentagem de solo que passou na peneira de 0,075 mm foi incompatível com o restante da curva, pois, em tese, esses finos teriam sido descartados para prepará-la. Por esse motivo, a curva granulométrica do solo areno-siltoso lavado, apresentou uma descontinuidade entre as parcelas grossa e fina do solo e a granulometria sem lavagem não apresentou quaisquer finos.

### 3.3.2.2 Granulometria a laser

A análise granulométrica da parte fina das amostras, que anteriormente era determinada no ensaio de sedimentação, foi substituída pelo granulômetro a laser. O equipamento que realiza o procedimento é da marca *Battersizer S3 Plus – Particle Size Analysis Report*, conforme mostra a Figura 21.

**Figura 21 – Granulômetro a laser (Battersizer S3 Plus)**



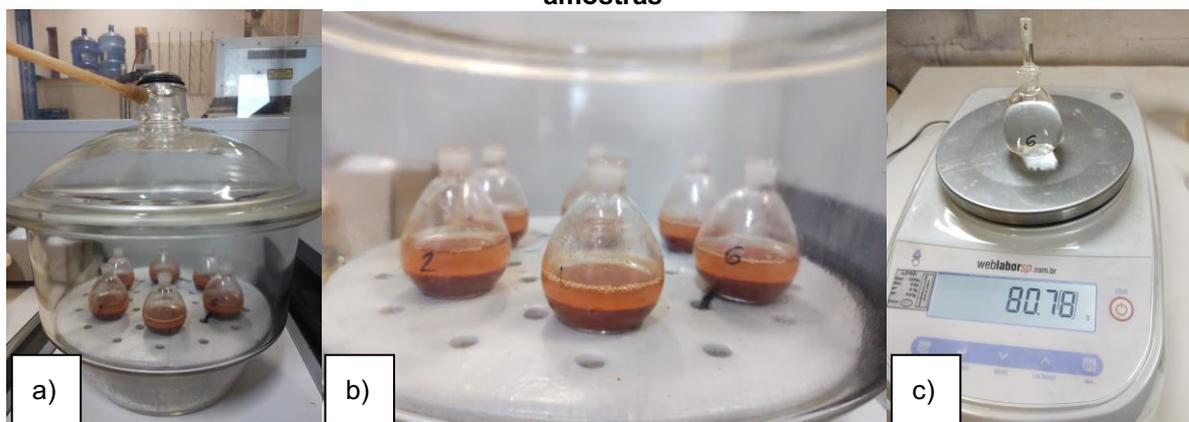
Fonte: A autora (2022).

Através de um sistema peristáltico de circulação e dispersão por ultrassom, o granulômetro consegue preparar amostras homogêneas e elimina os erros analíticos provocados por quebra de partículas, material aglomerado ou bolhas. Suas leituras vão de 0,01  $\mu\text{m}$  até 3500  $\mu\text{m}$ , com rotação de até 1600 rpm.

### 3.3.2.3 Massa específica real dos grãos

A determinação da massa específica real dos grãos seguiu a DNER-ME 093/94 (BRASIL, 1994). A Figura 22 traz imagens do processo de execução do ensaio.

**Figura 22 – Ensaio da massa específica real dos grãos: a) Dessecador ligado à bomba de vácuo; b) Bolhas de ar saindo das amostras; c) Balança semi analítica para pesagem das amostras**



Fonte: A autora (2022).

O ensaio foi feito em quatro amostras para que duas pudessem ser excluídas e a média fosse composta pelas outras duas, sendo que essas variaram no máximo 0,009 uma da outra.

#### 3.3.2.4 Limites de Atterberg

Para realizar a determinação dos limites de Atterberg, foram observadas as normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016) para a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, respectivamente. O índice de plasticidade, por sua vez, foi calculado através da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

#### 3.3.2.5 Compactação

Foram realizados ensaios de compactação segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016) para se obter a umidade ótima ( $w_{óti}$ ) e a massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{dmáx}$ ). O solo silto e o solo areno-silto foram compactados nas três energias Proctor, a normal (EN), a intermediária (EI) e a modificada (EM) em cilindros com diâmetro de 10,00 cm  $\pm$  0,04 cm e altura de 12,7 cm  $\pm$  0,05 cm. A Figura 23 demonstra a extração de um dos corpos de prova próximo da umidade ótima na energia modificada para o solo silto.

**Figura 23 – Extração do corpo de prova próximo à umidade ótima para o solo siltoso na energia modificada.**



**Fonte: A autora (2022).**

Foram realizadas as curvas nas três energias para que posteriormente as condições de contorno da pesquisa fossem estabelecidas, já tendo-se acesso a todos os dados de caracterização.

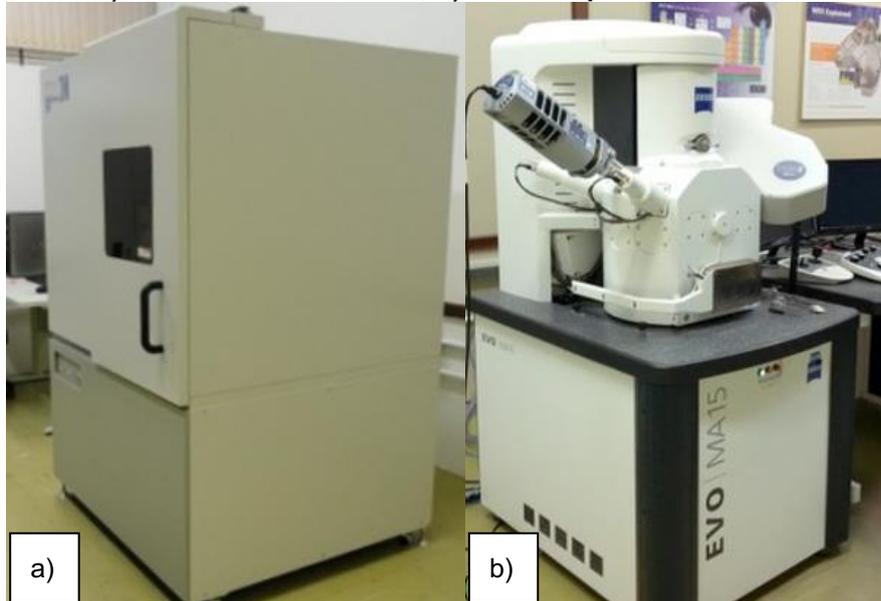
### 3.3.2.6 Fluorescência de Raio-X, Difratomia de Raio-X e Microscopia Eletrônica de Varredura

A Fluorescência de Raio-X (FRX) combina análise qualitativa e quantitativa das amostras através do método dos parâmetros fundamentais. O espectrômetro EDX-720/800HS utiliza a energia dispersiva para identificar esses parâmetros, sendo possível determinar a composição química do solo, da areia e da mistura.

Já os ensaios de Difratomia de Raio-X (DRX) e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados apenas para o solo vermelho no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR. O DRX é uma técnica semi-quantitativa que caracteriza a estrutura cristalina dos materiais através do equipamento XRD-7000 da Shimadzu (Figura 24a). Já o MEV produz imagens de

alta resolução das estruturas superficiais de amostras através do equipamento EVO MA 15 da Zeiss (Figura 24b).

**Figura 24 –a) Difratormetro de Raio-X; b) Microscópio Eletrônico de Varredura.**



**Fonte: A autora (2022).**

Os dados e imagens fornecidos por estes equipamentos para as amostras desta pesquisa serão apresentados no capítulo subsequente.

### 3.3.3 Desenvolvimento do equipamento para medição da taxa de infiltração

Inicialmente tentou-se conduzir os ensaios de infiltração apenas utilizando cilindros de acrílico e fazendo a medição da infiltração com um cronômetro e a visualização do CP por uma fita métrica anexa ao cilindro. Entretanto, logo nos primeiros ensaios já foi possível perceber que a confiabilidade deste processo era reduzida. Além disso, as bordas mais externas do CP tendiam a encharcar antes de seu meio, devido ao fato de as paredes de acrílico formarem um caminho preferencial, dando uma falsa impressão de que a infiltração havia sido concluída, quando na verdade o seu meio ainda se encontrava seco.

Para mitigar esses erros, foi necessária a busca por dispositivos que pudessem informar as condições do interior do solo de tempos em tempos e em determinadas profundidades, sem que a integridade deste fosse demasiadamente afetada.

Os equipamentos encontrados no mercado e que retornam informações de infiltração estão mais presentes na área de Agronomia e, em sua maioria, precisam ser calibrados para serem usados na Geotecnia, pois o solo orgânico e fofo normalmente presente na agricultura é substituído por solos bem compactados e que apresentam maior resistência e densidade na Engenharia Civil. Além disso, o custo desses equipamentos costuma ser alto. Hoje sondas como a TEROS 12 (*Meter Group*), uma das melhores do mercado no que tange à determinação da umidade e temperatura dos solos por utilizar a constante dielétrica para fornecer os dados, custa em média 450 dólares, ou seja, em torno de 2300 reais (com base no dólar de 20/06/2021 e não considerando os impostos).

Nesse contexto, viu-se a necessidade de se desenvolver um novo dispositivo que fosse mais economicamente viável e pudesse ser empregado em solos bem compactados, como é o caso do solo usado na pesquisa aqui descrita. Para isso, encontrou-se através de uma extensa busca bibliográfica os sensores que podem ser embarcados em Arduinos e retornam informações que podem ser interpretadas para fornecer a infiltração no interior do solo.

No Capítulo 2, as especificações técnicas de todos os componentes do equipamento desenvolvido para realizar a medição da taxa de infiltração desta pesquisa já foram especificadas, logo, neste item só serão abordados a montagem e integração de todos esses componentes e o funcionamento do equipamento como um todo.

### 3.3.3.1 Sensores embarcados no equipamento

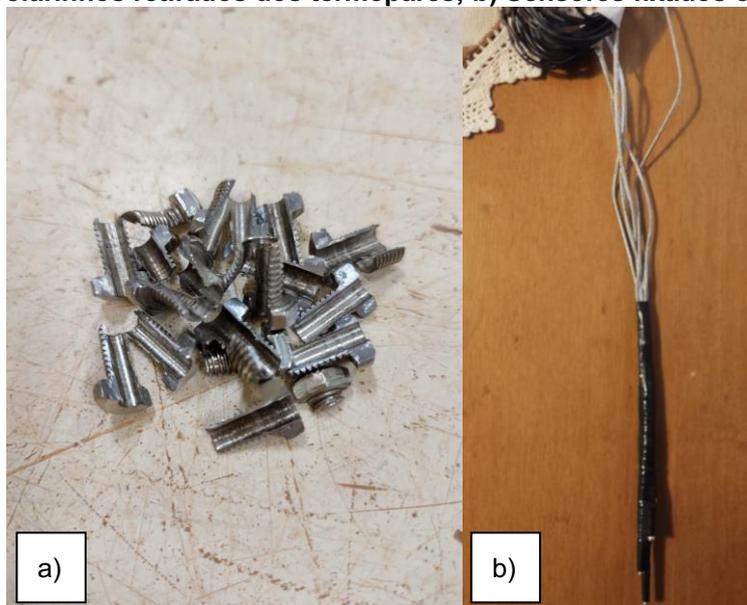
Foram utilizados 15 sensores termopares e 3 sensores de umidade para que fosse realizada a infiltração em 3 CPs simultaneamente.

Os termopares vinham com um colarinho ao redor do sensor para serem empregados mais facilmente na indústria. No caso desta pesquisa, o objetivo é reduzir o atrito dos sensores com o solo e para solucionar esse problema, os colarinhos foram retirados (Figura 25a) e posteriormente os sensores foram fixados com fita isolante em distâncias pré-determinadas, de forma que cada conjunto tivesse 5 termopares a 2 cm de distância uns dos outros (Figura 25b).

A ideia de ligar os sensores desta forma foi baseado em uma sonda desenvolvida pela Meter conhecida como TEROS 06. Essa sonda mede e registra

com precisão de ( $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ) a temperatura do solo ao longo do tempo em seis profundidades (-5, -10, -20, -30, -50 e -100 cm), sendo usada regularmente no campo e em lisímetros.

**Figura 25 –a) Colarinhos retirados dos termopares; b) Sensores fixados com fita isolante.**



Fonte: A autora (2022).

Já os sensores de umidade não precisaram de nenhuma alteração ou fixação em material rígido, pois já vinham de forma a serem facilmente inseridos no solo devido ao formato de garfo, como pode-se ver na Figura 26.

**Figura 26 – Sensor de umidade usado na pesquisa.**



Fonte: A autora (2022).

A princípio, cada conjunto de sensores (5 termopares + 1 de umidade) seria ligado a um Arduino e cada CP funcionaria como um equipamento isolado. Contudo, durante os testes iniciais, foi possível perceber a necessidade de se acompanhar em tempo real as variações em cada sensor, para que o processo fosse ainda mais preciso.

Para que esse controle pudesse ser feito, decidiu-se realizar os gráficos de cada um dos sensores simultâneos ao ensaio, porém para isso foi necessário a utilização de um módulo *wi-fi* que pudesse transmitir os dados do Arduino para o programa que gera os gráficos a cada segundo.

Ao embarcar o ESP 8266, o sistema acabou sem entradas suficientes para embarcar todos os sensores, os Arduinos e o ESP. Desta forma, optou-se então por se desenvolver uma placa de fibra de vidro com uma série de componentes eletrônicos que, por fim, permitisse a programação do equipamento e o sistema funcionasse efetivamente.

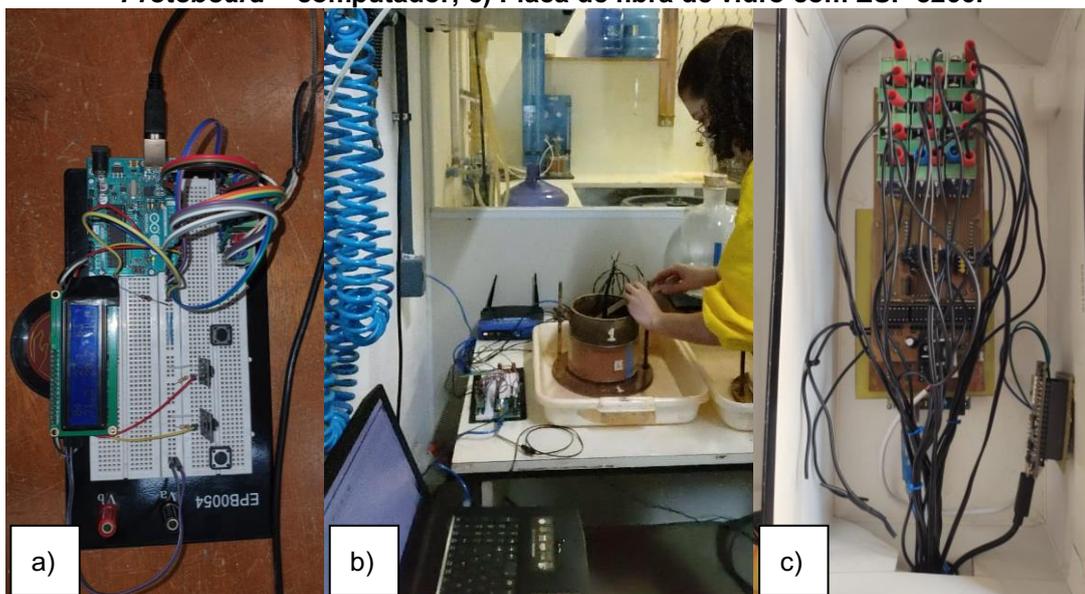
### 3.3.3.2 Montagem da placa de fibra de vidro

Com o arranjo para se testar 3 CPs simultaneamente, foi necessário o desenvolvimento de uma placa de fibra de vidro onde foram embarcados apenas um Arduino e um ESP 8266 para se armazenar os dados dos 18 sensores.

Na placa foram fixados uma série de componentes eletrônicos que permitiram que os três equipamentos isolados formassem apenas um único equipamento que recebesse as informações dos 3 CPs e enviasse tudo via *wi-fi* para o computador e assim, os gráficos fossem gerados com um *delay* de segundos.

A Figura 27 traz a evolução da placa onde todos os dispositivos foram embarcados. Inicialmente usou-se uma *proto-board*, que já é comumente utilizada para esse fim na eletrônica, e um display de LED que dava os resultados a cada minuto para ser anotado. Depois continuou-se a usar a *proto-board*, porém o Arduino era conectado ao computador e os dados eram armazenados a cada 15 segundos em arquivos de texto (txt.). Enfim, passou-se para a placa de fibra de vidro, onde os dados passaram a ser enviados via *wi-fi* para o computador e o site que gera os gráficos simultâneos a cada segundo.

Figura 27 – Evolução das placas do equipamento: a) *Protoboard* + display de LED; b) *Protoboard* + computador; c) Placa de fibra de vidro com ESP 8266.



Fonte: A autora (2022).

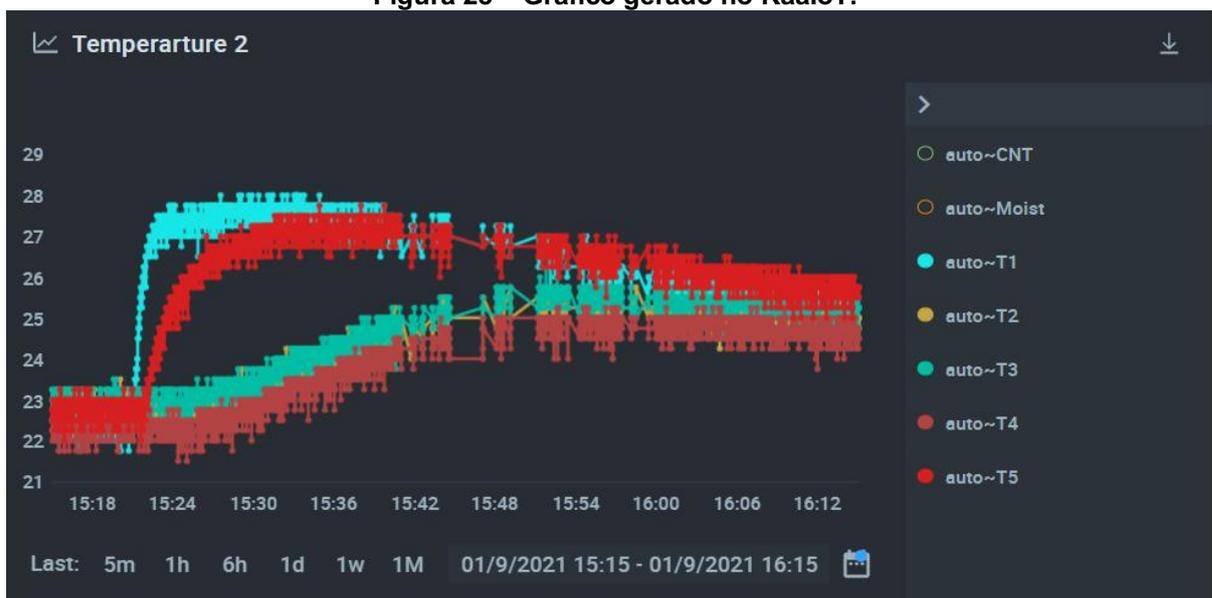
Após o processo de montagem da placa estar concluído, pode-se passar para a programação do equipamento em si.

### 3.3.3.3 Programação dos dispositivos

Como explicado no Capítulo 2, o Arduino, assim como o ESP 8266, é programado via ambiente de desenvolvimento integrado utilizando a linguagem C/C++, sem necessitar de nenhum dispositivo extra. Desta forma, toda a programação dos sensores foi realizada na própria interface do Arduino.

Já para os gráficos simultâneos serem gerados, utilizou-se a plataforma da *KaaloT* que pega os dados gerados pelos sensores enviados via *wi-fi* e os coloca em um gráfico, como o presente na Figura 28.

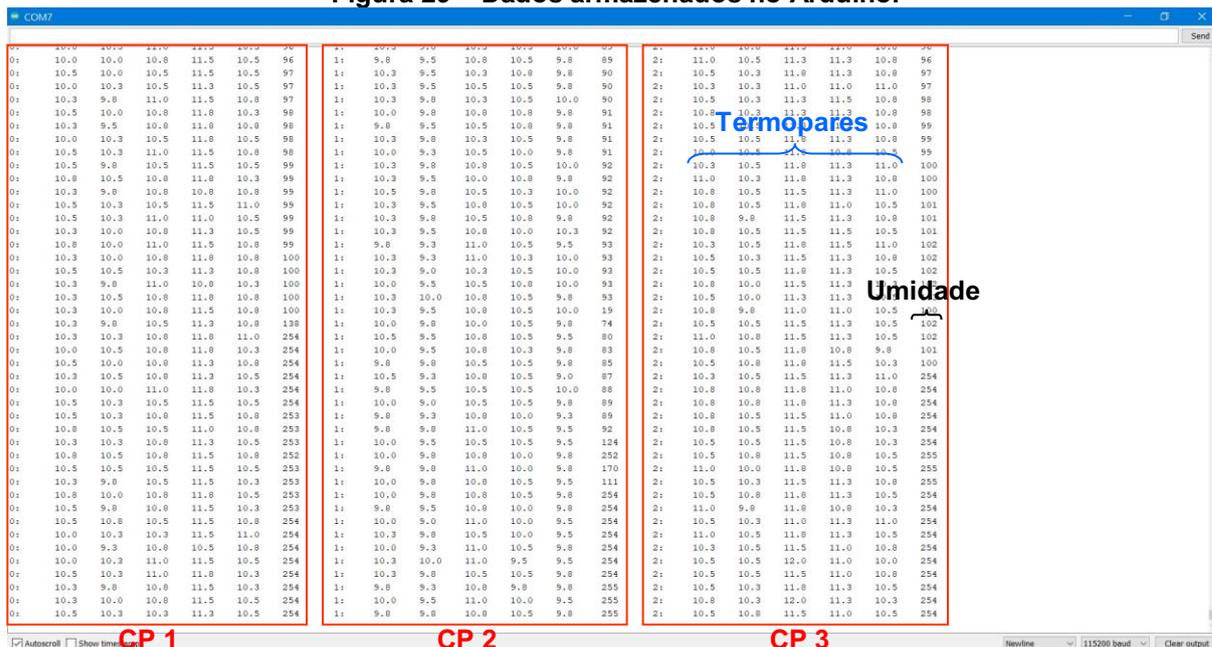
Figura 28 – Gráfico gerado no KaaloT.



Fonte: A autora (2022).

Além dos dados apresentados na forma gráfica, ainda é possível ter os dados armazenados no Arduino e que podem ser facilmente exportados para o Excel. Os dados do Arduino são apresentados de acordo com o mostrado na Figura 29. Na tela do programa apresentada na Figura 29, todos os sensores estão mergulhados em água com gelo e é possível ver o aumento da resistividade do sensor de umidade ao ser retirado da água.

Figura 29 – Dados armazenados no Arduino.



Fonte: A autora (2022).

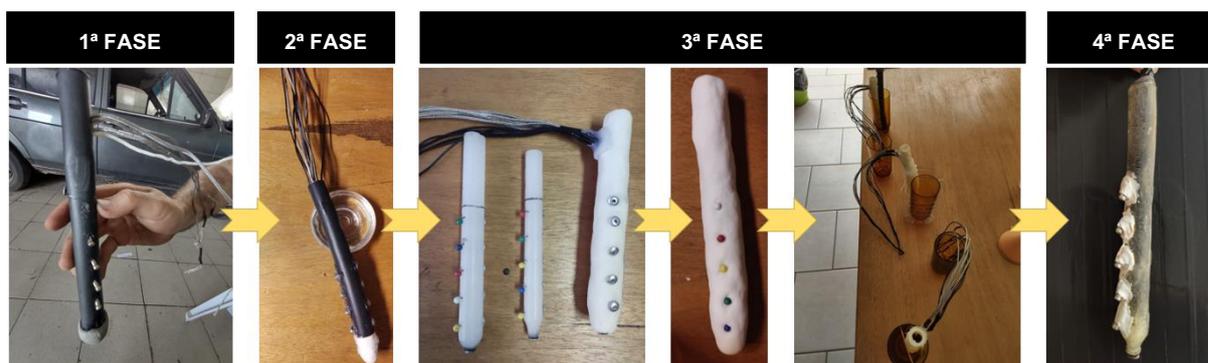
Com todos os testes feitos nos sensores, na placa e na programação, foi realizado um teste inserindo os sensores no solo. Entretanto, ao se inserir os termopares fixados apenas com fita isolante em um solo muito compactado, percebeu-se que os sensores da extremidade acabaram curvando, não ficando na distância pré-determinada necessária para o controle adequado do ensaio. Desta forma, buscou-se desenvolver uma ponta de prova em que os sensores de temperatura estivessem embarcados juntos, que fosse mais rígida e pudesse ser inserida no solo. Já os sensores de umidade seguiram sozinhos pela fácil inserção nos CPs.

### 3.3.3.4 Desenvolvimento da ponta de prova

Para facilitar a introdução dos sensores no solo, foram desenvolvidas três pontas de prova que pudesse armazenar os sensores de temperatura em seu interior, de forma que a profundidade pré-determinada fosse obedecida.

O processo para se chegar à ponta de prova final passou por quatro grandes fases, como pode ser visto na Figura 30. Em todas elas o objetivo era criar uma fôrma para que os sensores pudessem ser alocados e posteriormente a resina epóxi fosse acrescentada, ficando de 2 a 5 dias no interior da fôrma até a cura total e posteriormente sendo desmoldada.

**Figura 30 – Evolução das pontas de prova.**



Fonte: A autora (2022).

Na primeira etapa foi utilizado um eletroduto liso com a ponta feita em Durepoxi. Nesse protótipo, os furos para a saída dos sensores foram feitos com um prego aquecido e os cabos saíam pela lateral. Essa opção se tornou inviável, pois vazava resina por onde os fios saíam na lateral e a ponta não desmoldava.

Na segunda etapa, seguiu-se utilizando o eletroduto liso, porém a ponta foi feita em massinha de EVA com os cabos saindo por cima. Infelizmente essa opção não deu certo, pois a resina esquentava muito ao ser misturada com o endurecedor e acabava vazando pela ponta de EVA.

A terceira etapa consistiu-se em desenvolver um molde feito de uma mistura de silicone com amido de milho. Para modelar a massa, utilizou-se uma vela com tachinhas cravadas onde estariam os sensores de temperatura. Tentou-se novamente fazer os cabos saírem pela lateral, fazendo o fechamento com cola quente, mas novamente vazou. Também foram usados dois diâmetros de vela, pois a de menor espessura acabou sem espaço para todos os fios.

Enfim, na quarta etapa conseguiu-se fazer o molde de silicone e amido de milho ao redor de uma vela com espessura de 1,5 cm e com os cabos saindo pelo topo do molde. A resina foi então colocada e 5 dias depois os moldes foram cortados e a ponta de prova estava rígida com os 5 sensores e seus cabos em seu interior. Para dar acabamento, as pontas de prova foram lixadas e uma pasta adesiva térmica foi colocada ao redor dos termopares.

A Figura 31 apresenta a ponta de prova final; o equipamento todo, com as três pontas de prova, os três sensores de umidade e a placa alocada no interior de uma caixa de papelão para que pudesse ser transportada.

**Figura 31 – Equipamento finalizado: a) Ponta de prova final e sensor de umidade; b) Equipamento montado; c) Placa armazenada na caixa de transporte.**



Fonte: A autora (2022).

### 3.3.4 Modelagem dos corpos de prova

Para conduzir os ensaios de infiltração, foi necessário moldar os corpos de prova. A quantidade de água a ser inserida para a homogeneização das amostras foi definida como sendo a mesma dos pontos utilizados na curva Proctor na energia modificada, sendo dois pontos presentes no ramo seco, um próximo à umidade ótima e dois no ramo úmido. Optou-se pela energia modificada para a moldagem dos CPs, pois ela é a mais comumente empregada em campo pelos equipamentos modernos de compactação.

Como já mencionado, é preciso levar em consideração a umidade residual dos materiais após saírem da estufa, para que a massa seca da mistura ( $M_{seca}$ ) e a massa de água ( $M_{água}$ ) a ser inserida na homogeneização, possam ser calculadas. Para isso, foram consideradas as Equações 13 e 14.

$$M_{seca} = \frac{M_R}{1 - (W_R/100)} \quad (13)$$

$$M_{água} = M_{seca} \times (W_{ót} - W_R/100) \quad (14)$$

Onde  $M_R$  é a massa da mistura com a umidade residual,  $W_R$  é a porcentagem referente a essa umidade (extraída pela retirada de três cápsulas de amostras da mistura que são inicialmente pesadas, colocadas em uma estufa precisa por 24 horas e posteriormente pesadas novamente para se obter a média da umidade entre elas) e  $W_{ót}$  é a umidade que se deseja moldar o CP.

Após estes cálculos, a água é inserida na mistura e esta é homogeneizada. Para que a frente de saturação pudesse ser observada, foram adquiridos cilindros de acrílico transparente que permitissem a visualização interna. Estes cilindros possuem o diâmetro e os detalhes técnicos dos cilindros utilizados no ensaio de CBR, porém sua altura foi reduzida para que não houvesse a necessidade de se utilizar o disco espaçador na moldagem e os corpos de prova tivessem a menor altura possível para que a infiltração completa não demorasse a acontecer, conforme mostra a Figura 32.

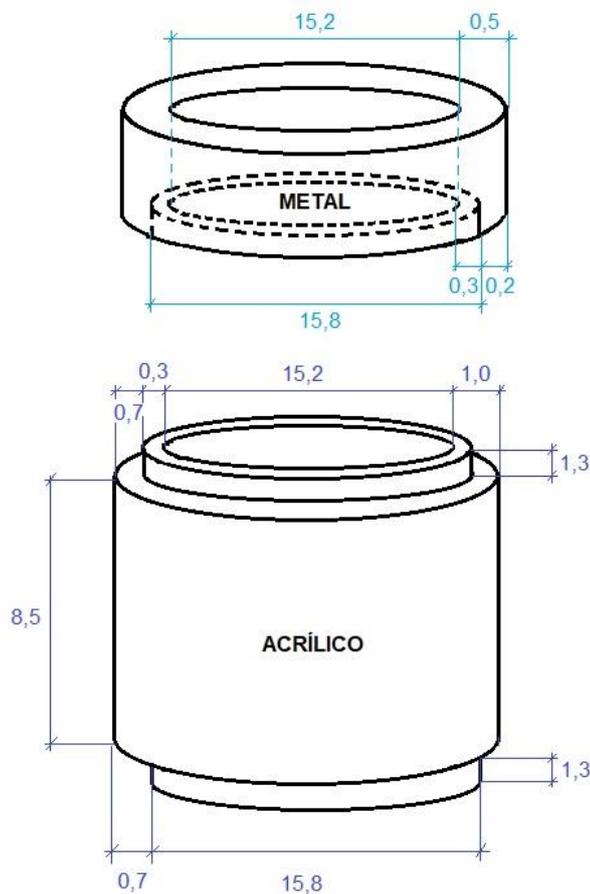
Figura 32 – Cilindros de acrílico utilizados nos ensaios



Fonte: A autora (2022).

O colarinho e a base metálica são as mesmas utilizadas no ensaio de CBR e, através do desenho esquemático da Figura 33, é possível ver as medidas e o sistema de encaixe entre eles. A espessura do cilindro de acrílico utilizado é de 1 cm para evitar quebra ou trincamento do material, ficando mais espesso que a do colarinho metálico do CBR (0,5 cm), porém com as dimensões internas iguais.

Figura 33 – Desenho esquemático com as dimensões do colarinho + cilindro



Fonte: A autora (2022).

Os corpos de prova foram moldados em 5 camadas, sendo que cada camada foi compactada com 55 golpes do soquete de 4,5 kg, com a energia Proctor modificada. A cada camada o solo era escarificado para que houvesse aderência entre elas, a base do soquete era limpa e um papel filtro era colocado entre a base e a primeira camada de solo. Após a primeira camada ser compactada, a ponta de prova era inserida no solo e as outras quatro eram compactadas ao redor da ponta de prova.

Ao final da compactação, retirava-se o colarinho e rasava-se a amostra. Com o colarinho limpo, inseria-se um anel *o'ring* (fabricado em elastômeros) entre o cilindro e o colarinho, encaixava-se o colarinho novamente sobre o cilindro e passava-se vaselina no entorno para evitar vazamento da água.

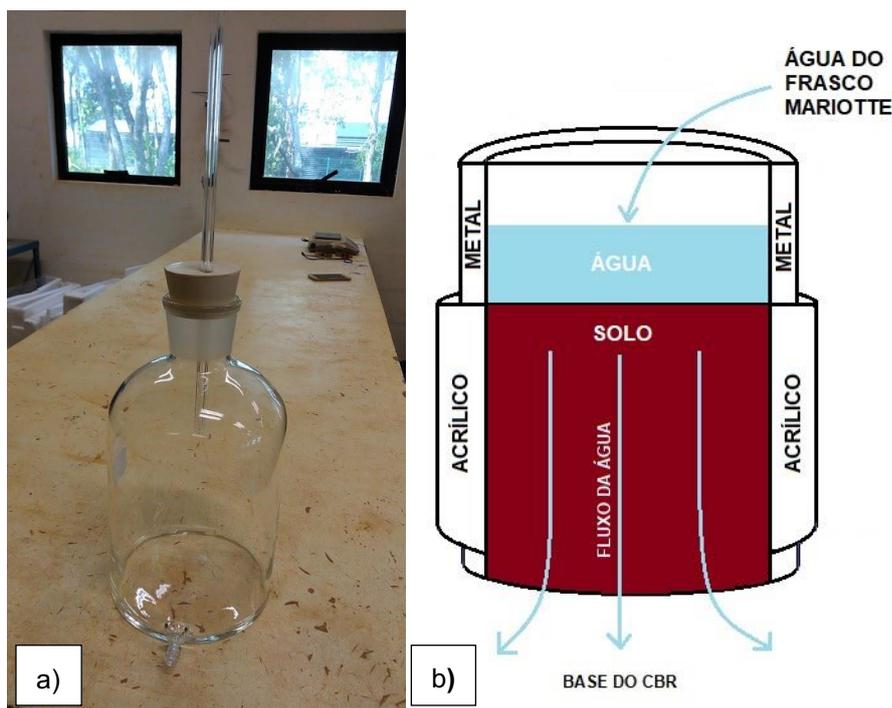
### 3.3.5 Ensaio de infiltração

Foram feitos ao todo 15 ensaios de infiltração para o solo areno-siltoso (mistura criada), sendo que cada ponto de umidade da curva Proctor foi repetido três vezes para que posteriormente fosse possível realizar uma análise estatística desses dados.

A inundação dos corpos de provas foi feita através de um Frasco Mariotte de 5000 mL cheio com água destilada. Este frasco era importante para a pesquisa, pois ele permitia que a carga de água sobre o solo se mantivesse constante quando a boca do seu tubo interno coincidia com a altura de água que se desejava dentro do colarinho. Contudo, sua principal função era manter constante o escoamento da água, assim como nos demais ensaios de infiltrações disponíveis no mercado e apresentados anteriormente. A Figura 34a mostra o Frasco Mariotte utilizado nos ensaios e a Figura 34b apresenta um desenho esquemático do movimento da água até a inundação completa da amostra.

Um pouco antes de a água ser liberada em todos os ensaios, os sensores eram conectados e, assim que a temperatura dos termopares estabilizava, iniciava-se a infiltração. A base metálica do CBR possuía furos, logo, quando a água terminava de infiltrar no CP, ela escoava pela base sobre a bandeja na qual o cilindro estava colocado. No momento que a água era avistada, o ensaio era dado como concluído, os sensores eram desconectados e os dados salvos.

Figura 34 – a) Frasco Mariotte utilizado; b) Movimento da água na amostra



Fonte: A autora (2022).

Além disso, para se ter uma prova real do ensaio e mais alguns dados de análise, retirava-se também a umidade do corpo de prova de duas formas: a primeira consistia em pesar o cilindro com o solo antes e após a inundação; já a segunda consistia em retirar três cápsulas de umidade da mistura logo após ela ter sido homogeneizada e posteriormente retirava-se outras três cápsulas do início, três do meio e outras seis do final do cilindro, sendo três das bordas do CP e três do centro, após a inundação ter sido concluída.

### 3.3.6 Análise estatística

A fim de tornar os dados desta pesquisa mais confiáveis e analisar a eficiência do equipamento desenvolvido, o ensaio de infiltração foi realizado três vezes para cada umidade da curva Proctor, como já citado acima. Para determinar os tempos em que cada sensor acusou a presença de água e a profundidade em que cada sensor se encontrava, foi realizada uma média entre os três ensaios com mesma umidade de moldagem. Com essa média, realizou-se os gráficos de infiltração acumulada por tempo e taxa de infiltração por tempo.

Para validar os resultados obtidos através do equipamento desenvolvido neste trabalho, foram realizadas comparações entre os valores da taxa de infiltração obtida experimentalmente com outros métodos empíricos, sendo usadas as equações de Kostikov, Kostikov-Lewis e Horton, já apresentadas na Tabela 2 do Item 2.2.2.

Finalmente, foram comparados os valores da taxa de infiltração empírica determinada nessa pesquisa com as definidas em cada um dos métodos. Para isso calculou-se o Erro Quadrático Médio (EQM), como sugerido por Antonino *et al.* (2004) e Oliveira, Soares e Holanda (2018), seguindo a Equação 15:

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum(T_i - M_i)^2}{N} \cdot \frac{100}{\bar{M}}} \quad (15)$$

Da equação,  $T_i$  é a taxa de infiltração calculada pelos modelos,  $M_i$  é a taxa de infiltração experimental,  $\bar{M}$  é a média dos valores experimentais e  $N$  é o número de determinações.

Outra forma de analisar estatisticamente os valores de infiltração obtidos com os métodos empíricos é através do Erro Padrão de Estimativa (SEE), como definido por Paixão *et al.* (2009). A Equação 16 apresenta a forma de cálculo do SEE:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum(T_i - M_i)^2}{N - 2}} \quad (16)$$

Da equação,  $T_i$  é a taxa de infiltração calculada pelos modelos,  $M_i$  é a taxa de infiltração experimental e  $N$  é o número de determinações.

Em ambas as determinações o erro tenderá a 0 quando os valores calculados pelos modelos e os valores experimentais se assemelharem, ficando próximos. Entretanto, no trabalho de Paixão *et al.* (2009), os autores afirmam que os valores de erro costumam ser altos, variando de 104% a 135%, pois é comum que os valores estimados da velocidade de infiltração sejam discrepantes dos valores observados nos tempos iniciais de infiltração.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

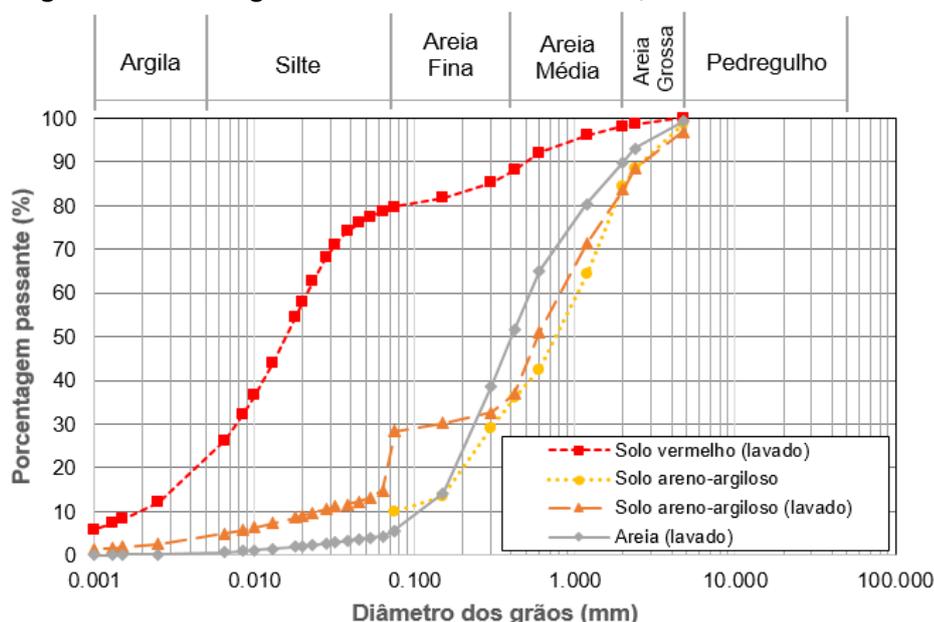
Os resultados obtidos na pesquisa foram divididos em: caracterização dos materiais sólidos, ensaios de compactação e ensaios de infiltração.

### 4.1 Caracterização dos materiais sólidos

As granulometrias do solo siltoso e da areia foram feitas através do peneiramento lavado. O solo areno-siltoso foi peneirado com e sem lavagem e a descontinuidade da curva lavada ocorreu pelo fato de o processo de preparação influenciar diretamente a granulometria, como já explicado anteriormente.

As curvas granulométricas de todos os materiais sólidos podem ser observadas na Figura 35.

Figura 35 – Curva granulométrica do solo siltoso, da mistura e da areia



Fonte: A autora (2022).

Através das curvas apresentadas nesta figura, foi possível notar que o solo siltoso apresenta características de um solo medianamente uniforme, pois, ao se calcular o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) através da razão entre o diâmetro em que 60% do material passa no peneiramento ( $D_{60}$ ) e o diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ), obteve-se o valor de 11. Já no que tange à graduação, o coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) do solo, calculado através da razão entre o diâmetro em que 30% do material

passa no peneiramento (D30) elevado ao quadrado pelo produto do D60 pelo D10, resultou no valor de 1,45, o que classifica este solo como bem graduado. Já a areia apresentou coeficiente de uniformidade de 5 e coeficiente de curvatura de 1,25, classificando-se assim, como um material uniforme e bem graduado. O solo areno-siltoso lavado, por apresentar a descontinuidade da curva, obteve  $C_u$  de 26,7 e  $C_c$  de 0,94, o que a classifica como um solo desuniforme e mal graduado. Entretanto, o mesmo solo sem lavagem o  $C_u$  foi de 14,3 e o  $C_c$  de 1,29, o que fez com que ela se tornasse medianamente uniforme e bem graduada.

Os dados referentes aos Limites de Atterberg, à composição química obtida pelo ensaio de FRX, à massa específica real dos grãos e à classificação de cada material segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Resumo dos dados dos ensaios de caracterização dos materiais**

<b>Propriedade</b>	<b>Solo siltoso</b>	<b>Solo areno-siltoso</b>	<b>Areia</b>
<i>Limites de consistência</i>			
Limite de liquidez (%)	52,70%	12,85%	---
Limite de plasticidade (%)	32,15%	11,59%	---
Índice de plasticidade (%)	21	1	---
<i>Granulometria</i>			
Areia grossa (4750 - 2000 $\mu\text{m}$ ) (%)	1,78	13,23	9,35
Areia média (2000 - 425 $\mu\text{m}$ ) (%)	10,03	46,72	38,35
Areia Fina (425 - 75 $\mu\text{m}$ ) (%)	8,40	8,63	46,06
Silte (75 - 5 $\mu\text{m}$ ) (%)	58,89	24,28	5,01
Argila (< 5 $\mu\text{m}$ ) (%)	15,03	2,67	0,44
<i>Índice de atividade do solo</i>	1,37	---	---
<i>Composição química - FRX (%)</i>			
SiO <sub>2</sub>	49,254	54,502	48,957
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,58	41,265	13,169
SO <sub>3</sub>	5,013	4,202	3,015
K <sub>2</sub> O	1,872	0,563	5,874
TiO <sub>2</sub>	1,097	0,205	0,295
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,125	0,141	0,406
CaO	---	---	28,372
<i>Massa específica real dos grãos - G<sub>s</sub></i>	2,712	2,728	2,724
<i>Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)</i>	MH	SM	SW

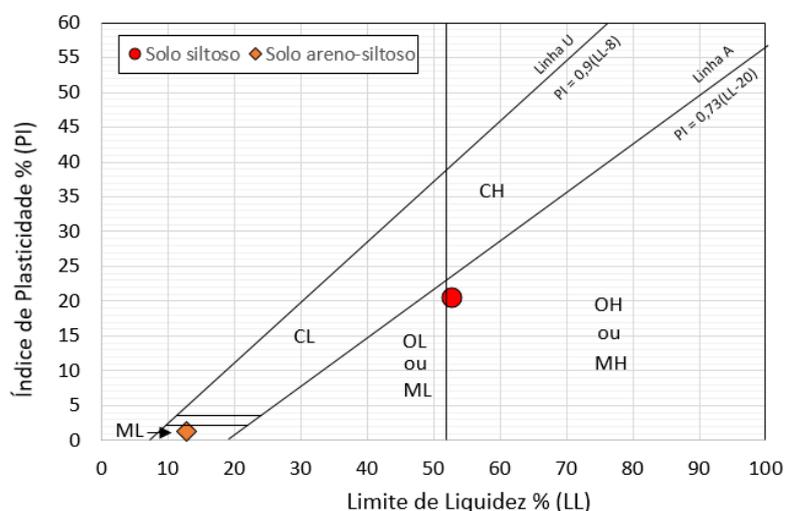
Fonte: A autora (2022).

Pela tabela foi possível perceber que o solo utilizado era um silte, pois sua composição granulométrica apresentava mais de 50% deste material. A areia comprada como média na loja de materiais de construção, ao ser lavada para o

ensaio de granulometria, apresentou mais grãos finos do que médios em sua composição. Já a mistura, considerada na tabela como a lavada, pela composição granulométrica realmente se enquadra como uma areia siltosa.

Com os resultados dos limites de liquidez e de plasticidade, calculou-se o índice de plasticidade e plotaram-se os pontos na Carta de Casagrande, conforme apresentado na Figura 36. Pela classificação SUCS, as amostras que possuem mais de 50% de sua massa retida antes da peneira #200 são classificadas como solos granulares, ou seja, pedregulhos (G) e areias (S), sendo que a que apresentar maior porcentagem na amostra será a primeira letra da classificação nesse sistema. Posteriormente analisa-se a quantidade de finos: se a amostra possuir menos de 5% de finos, como é o caso da areia nesta pesquisa, ela será então classificada segundo sua graduação, que como já vista anteriormente é bem graduada (W). Já no caso de amostras com mais de 12% de finos em sua composição, a classificação secundária se dará pela Carta de Casagrande.

**Figura 36 – Carta de Casagrande**



**Fonte: A autora (2022).**

Desta forma, pela classificação SUCS, o solo siltoso será um silte de alta compressibilidade (MH), a areia média será um material arenoso bem graduado (SW) e a mistura será uma areia siltosa de baixa compressibilidade (SM), ficando na parte da Carta de Casagrande destinada aos solos não coesivos.

Com o índice de plasticidade e a porcentagem de grãos finos do solo siltoso, também foi possível calcular a atividade do solo, que corresponde a razão entre o IP e porcentagem de argila, resultando no valor de 1,37. Como este valor é superior a

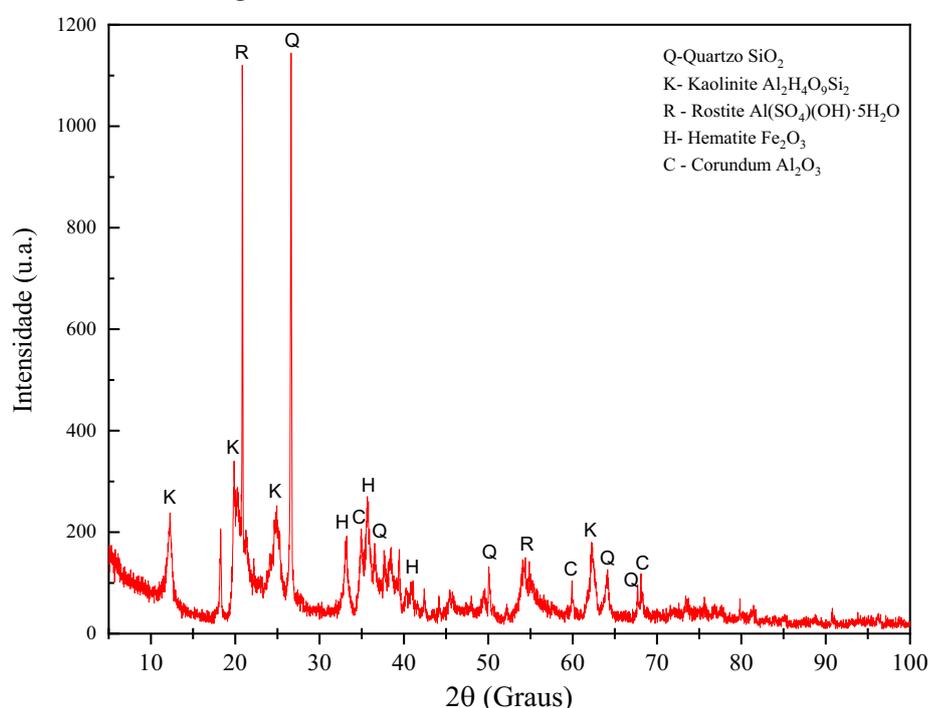
1,25, a argila é considerada ativa e significa que ela possuirá um alto potencial de expansão (DAS e SOBHAN, 2016).

Pela análise da espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX) dos materiais sólidos, pode-se perceber que o principal composto químico presente em todos os materiais foi o dióxido de silício, também conhecido como sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Para o solo e a mistura, outro composto muito presente foi o óxido de alumínio, também chamado de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Na areia, o segundo composto mais presente foi o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ).

Ainda na Tabela 5, foram apresentados os valores da massa específica real dos grãos (Gs) de 2,712 para o solo siltoso, 2,728 para o solo areno-siltoso e 2,724 para a areia.

A fim de se identificar com precisão o solo utilizado para compor a mistura e saber suas características mineralógicas que faziam com que seu comportamento fosse caracterizado como expansível, realizaram-se os ensaios de DRX e de MEV. A Figura 37 apresenta o resultado do DRX.

**Figura 37 – DRX do solo siltoso vermelho**



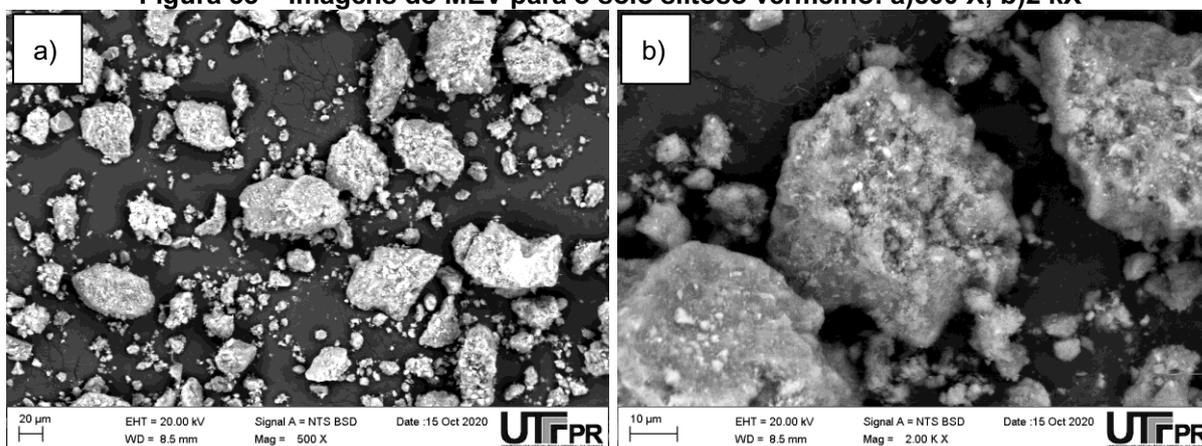
**Fonte: A autora (2022).**

Através do difractograma, foi possível perceber que os minerais mais comuns deste solo são o quartzo, a caulinita, a hematita, a rostite e o coríndon. Ao comparar esses minerais do ensaio de DRX com os compostos químicos

apresentados no FRX, percebe-se a congruência dos ensaios. Além disso, minerais como quartzo e caulinita são frequentemente encontrados em solos tropicais e subtropicais finos do sul do Brasil e são conhecidos por proporcionarem a expansão dos solos em que estão presentes (BORTOLUZZI, PERNES e TESSIER, 2007).

Já do ensaio de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas imagens de 500 X (Figura 38a) e 2 kX (Figura 38b) do solo siltoso. Através das análises do próprio microscópio, foi possível encontrar alguns agregados minerais que coincidem com os encontrados no ensaio de DRX, sendo identificadas as presenças de quartzo, coríndon, caulinita, titânio e ferro (proveniente da hematita). A Tabela 6 apresenta os elementos químicos dominantes identificados pelo MEV.

**Figura 38 – Imagens do MEV para o solo siltoso vermelho: a)500 X; b)2 kX**



Fonte: Adaptado de CCM UTFPR (2020).

**Tabela 6 – Elementos químicos identificados no solo siltoso vermelho no ensaio de MEV**

Elementos dominantes (% de peso)					
O	Al	Si	K	Ti	Fe
59,31	14,96	15,31	0,84	0,84	8,74

Fonte: Adaptado de CCM UTFPR (2020).

Da Tabela 6, percebe-se que o elemento de maior dominância é o oxigênio (O), pois ele está presente em todos os minerais e é o principal responsável pela formação destes, seguido pelo silício (Si) que é um dos elementos do quartzo e da caulinita que estão muito presentes no solo, como já falado anteriormente.

## 4.2 Ensaios de compactação

Para obter o maior número de informações sobre o solo siltoso e o solo areno-siltoso criado e assim, determinar as umidades de moldagem dos corpos de prova a serem submetidos ao ensaio de infiltração, foi feita a compactação nas energias normal, intermediária e modificada conforme a norma NBR 7182 (ABNT, 2016) para ambos e sem haver as sondas inseridas na matriz de solo.

Os resultados para os pesos específicos secos máximos ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e as umidades ótimas ( $w_{\acute{o}ti}$ ) do solo e da mistura nas três energias estão apresentados na Tabela 7.

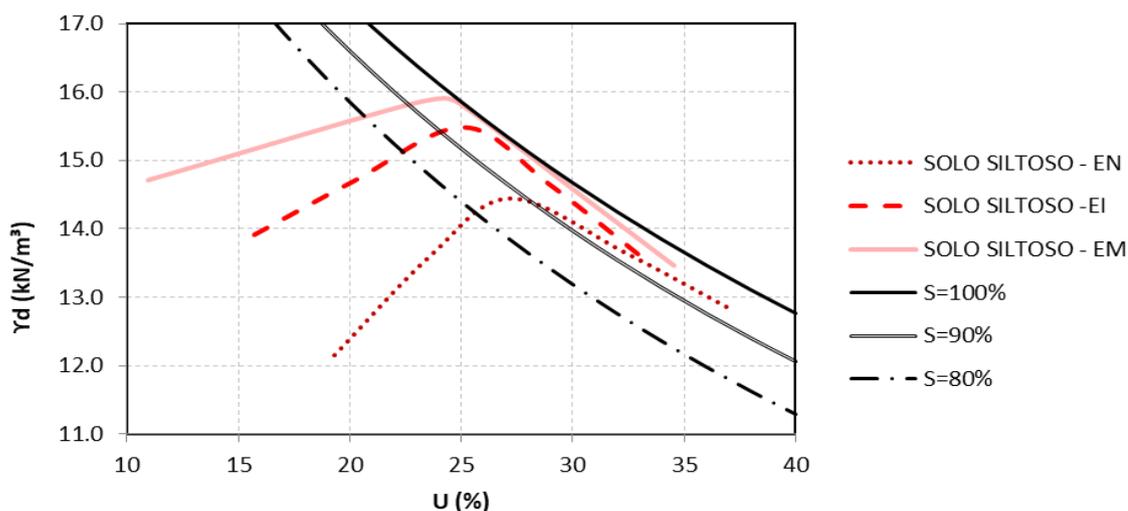
**Tabela 7 – Peso específico seco máximo e umidade ótima do solo siltoso e do solo areno-siltoso nas três energias**

Material	Energia	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{\acute{o}ti}$ (%)
Solo siltoso	Normal	14,45	27,20
	Intermediária	15,48	25,10
	Modificada	15,90	23,70
Solo areno-siltoso	Normal	18,35	12,80
	Intermediária	19,40	10,05
	Modificada	20,15	8,80

Fonte: A autora (2022).

A Figura 39 apresenta a curva de compactação do solo siltoso nas três energias, bem como as curvas de saturação (S) para 80, 90 e 100%, referentes ao teor de umidade de moldagem das amostras no período do ensaio.

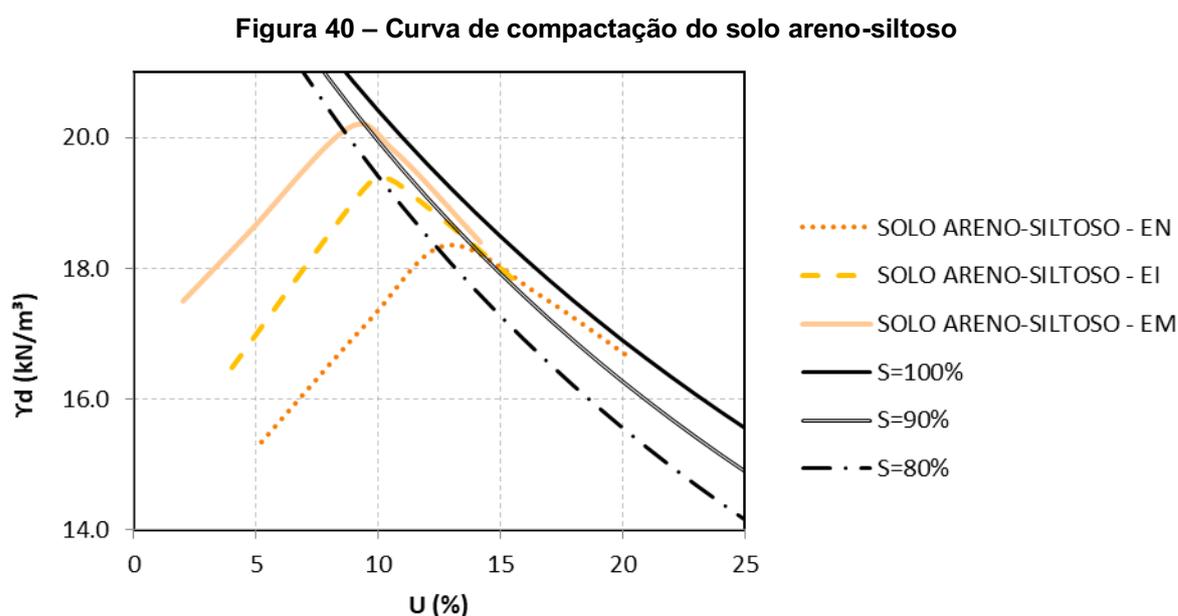
**Figura 39 – Curva de compactação do solo siltoso**



Fonte: A autora (2022).

Através da análise da Figura 39 e da Tabela 7, foi possível perceber que o peso específico seco máximo aumenta e a umidade ótima reduz conforme a energia aplicada aumenta.

A Figura 40, por sua vez, traz a curva de compactação do solo areno-siltoso nas três energias e as curvas de saturação (S) de 80, 90 e 100% traçadas.



Fonte: A autora (2022).

Assim como no solo siltoso, o peso específico seco máximo aumenta e a umidade ótima reduz quando a energia aplicada aumenta.

Ao comparar ambos os solos, é perceptível que o solo fino (solo siltoso) apresenta pesos específicos secos máximos inferiores ao solo grosso (solo areno-siltoso) e as umidades ótimas tendem a ser bem superiores em solos finos do que em solos grossos. Esses comportamentos para ambos os solos já estão consolidados na literatura (CAPUTO, 1988; DAS e SOBHAN, 2016; PINTO, 2006).

### 4.3 Ensaios de infiltração

Os ensaios de infiltração foram conduzidos de forma que algumas condições fossem mantidas para garantir sua correta execução. Conforme citado no Item 3.1, para ser possível realizar comparações mais precisas entre os ensaios realizados, muitas variáveis foram fixadas, ficando apenas a umidade de moldagem dos CPs

sofrendo alterações conforme os pontos definidos no ensaio Proctor. Os cuidados tomados para a execução deste ensaio foram os seguintes:

- *Peso específico do solo:* Após a moldagem do CP, ele era pesado de forma a observar se o peso específico do solo era igual ou superior ao peso específico encontrado para aquela umidade no ensaio Proctor;
- *Teor de umidade do solo:* Foram feitos 3 CPs nas umidades médias de 13,8%, 10,3%, 8, 7%, 4,8% e 1,8%. Essas umidades ficaram próximas aos pontos determinados no ensaio Proctor, que foram de 14,2%, 10,7%, 8,8%, 4,7% e 2,0%;
- *Coluna d'água acima do CP:* Definida como  $3 \pm 0,20$  cm para todos os ensaios.
- *Temperatura da água:* Definida em  $30,34^\circ \pm 2,16^\circ\text{C}$ ;
- *Temperatura externa:* Os CPs foram moldados e o ensaio de infiltração foi realizado em uma sala com temperatura controlada através de ar-condicionado e fixada em  $23^\circ\text{C}$ ;
- *Locação dos sensores de temperatura no interior do CP:* Todos os ensaios foram realizados com a ponta de prova 1 (PP1), com exceção do ensaio 4 que utilizou a ponta de prova 2 (PP2). As cotas de cada sensor na respectiva ponta de prova estão apresentadas no Quadro 2:

**Quadro 2 – Locação dos termopares nas pontas de prova**

	Cota dos sensores PP1 (mm)	Cota dos sensores PP2 (mm)
Superfície	0,00	0,00
T1	-21,00	-15,00
T2	-40,00	-33,00
T3	-59,00	-52,00
T4	-78,00	-72,00
T5	-97,00	-93,00
Base	-111,10	-111,20

Fonte: A autora (2022).

- *Ponta de prova:* Ambas as pontas de prova utilizadas foram desenvolvidas como descrito no Item 3.3.3.4, tomando-se especial atenção para que o diâmetro delas não fosse superior a uma quinta-parte do diâmetro

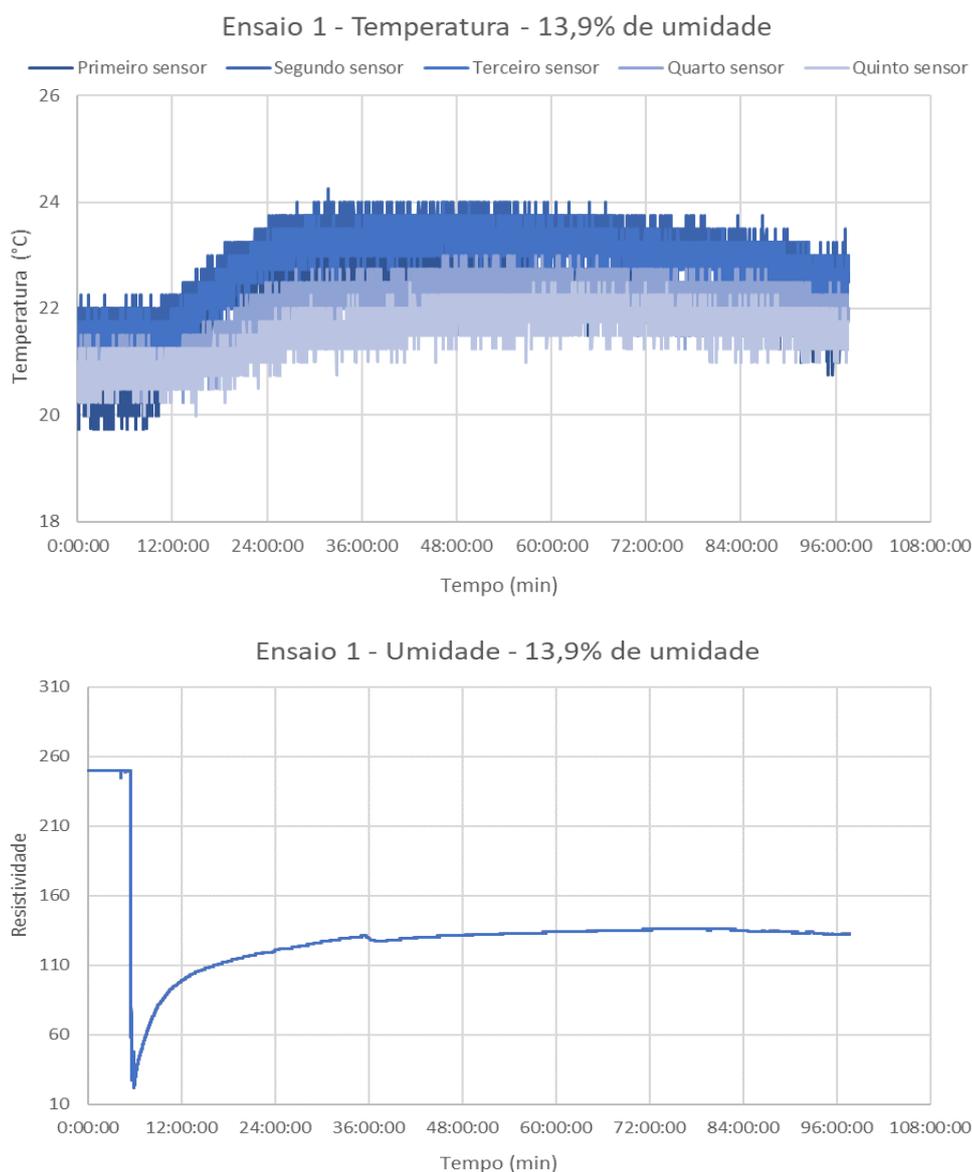
do CP para manter a integridade da amostra ensaiada. Além disso, as pontas de prova foram lixadas para melhorara a aderência entre elas e o solo compactado ao redor, evitando-se assim o caminho preferencial da água.

- *Cilindro de acrílico*: Para garantir que não havia caminho preferencial pelas paredes do cilindro de acrílico, foram retiradas três cápsulas de umidade das bordas e três cápsulas de umidade do centro de cada CP, em todos os ensaios, para comparar as umidades. A diferença não foi significativa, com menos de 1% de variação entre o centro e a borda, em todos os testes.
- *Sensor de capacitância (FDR)*: O sensor de umidade foi colocado nos CPs através da execução de pré-furos por meio de uma furadeira para posteriormente inseri-los. Nesta pesquisa, esse sensor foi utilizado apenas como verificação de que a água estava infiltrando, ou seja, os resultados não foram interpretados qualitativamente e ele apenas valida a funcionalidade da ponta de prova desenvolvida com os termopares.

Ao final dos ensaios de infiltração os dados fornecidos pela plataforma do *KaaloT* eram armazenados, assim como os do arquivo txt. que a própria interface do Arduino gerava.

#### 4.3.1 Tratamento dos dados

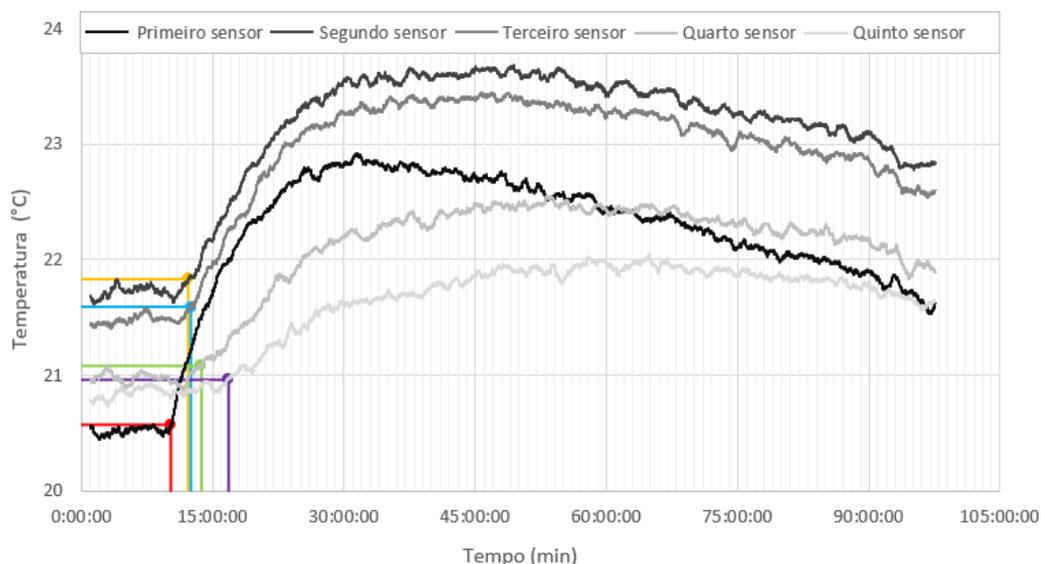
Os dados referentes à temperatura, à resistividade e ao tempo em que o dado foi medido foram exportados para o Excel e foram gerados os gráficos conforme o exemplo do Ensaio 1 apresentado na Figura 41.

**Figura 41 – Gráficos de temperatura por tempo e umidade por tempo sem tratamento**

**Fonte: A autora (2022).**

Como os dados de temperatura oscilavam muito, a visualização exata do tempo em que a temperatura começou a se elevar ficava comprometida. Assim, para diminuir as oscilações, foi traçado a média móvel com um período equivalente a 60 s, ou seja, ao invés de registrar e temperatura a cada segundo, uma média dos valores a cada minuto foi calculada e esse valor apresentado no gráfico, reduzindo significativamente as variações. A Figura 42 apresenta o exemplo do Ensaio 1 para elucidar o tratamento supracitado.

**Figura 42 – Gráfico de temperatura do Ensaio 1 com tratamento**  
Ensaio 1 - Temperatura - 13,9% de umidade



Fonte: A autora (2022).

Todos os gráficos utilizados para a determinação do tempo em cada sensor e para cada umidade estão apresentados no Apêndice A e a Tabela 8 traz um resumo dos dados apresentado nesses gráficos.

**Tabela 8 (continua) – Tempo necessário para a água atingir cada sensor**

	Termopar	Profundidade (cm)	Tempo (min)
<b>Umidade 13,9% (Ensaio 1)</b>	1	2,1	10,2
	2	4	12,18
	3	5,9	12,48
	4	7,8	13,68
	5	9,7	16,8
<b>Umidade 13,4% (Ensaio 2)</b>	1	2,1	3,8
	2	4	4
	3	5,9	5,1
	4	7,8	5,6
	5	9,7	7,8
<b>Umidade 14,0% (Ensaio 3)</b>	1	2,1	6,6
	2	4	10,9
	3	5,9	11,2
	4	7,8	22,8
	5	9,7	23,2
<b>Umidade 9,2% (Ensaio 4)</b>	1	1,5	2,1
	2	3,3	2,9
	3	5,2	4,7
	4	7,2	6,6
	5	9,3	9,5

Tabela 9 (continuação) – Tempo necessário para a água atingir cada sensor

	Termopar	Profundidade (cm)	Tempo (min)
<b>Umidade 11,1% (Ensaio 5)</b>	1	2,1	13,1
	2	4	13,9
	3	5,9	17
	4	7,8	18,2
	5	9,7	22,2
<b>Umidade 10,6% (Ensaio 6)</b>	1	2,1	3,6
	2	4	4,6
	3	5,9	6,3
	4	7,8	8,2
	5	9,7	23
<b>Umidade 8,3% (Ensaio 7)</b>	1	2,1	8,5
	2	4	9,7
	3	5,9	10
	4	7,8	11,3
	5	9,7	19,3
<b>Umidade 9,1% (Ensaio 8)</b>	1	2,1	5,2
	2	4	5,9
	3	5,9	10
	4	7,8	11,3
	5	9,7	11,5
<b>Umidade 8,6% (Ensaio 9)</b>	1	2,1	7,1
	2	4	8,2
	3	5,9	11,8
	4	7,8	13
	5	9,7	16
<b>Umidade 5,2% (Ensaio 10)</b>	1	2,1	3,2
	2	4	4
	3	5,9	6,3
	4	7,8	6,8
	5	9,7	10
<b>Umidade 4,4% (Ensaio 11)</b>	1	2,1	5,1
	2	4	6
	3	5,9	7,2
	4	7,8	8,1
	5	9,7	10
<b>Umidade 4,7% (Ensaio 12)</b>	1	2,1	2,6
	2	4	3,8
	3	5,9	10,4
	4	7,8	10,7
	5	9,7	11,1
<b>Umidade 1,9% (Ensaio 13)</b>	1	2,1	6
	2	4	7
	3	5,9	9,9
	4	7,8	11,3
	5	9,7	11,5

**Tabela 10 (conclusão) – Tempo necessário para a água atingir cada sensor**

	Termopar	Profundidade (cm)	Tempo (min)
<b>Umidade 1,9% (Ensaio 14)</b>	1	2,1	2,4
	2	4	3
	3	5,9	8,3
	4	7,8	8,8
	5	9,7	9,1
<b>Umidade 1,6% (Ensaio 15)</b>	1	2,1	2,4
	2	4	2,5
	3	5,9	3
	4	7,8	4,2
	5	9,7	5,6

Fonte: A autora (2022).

Definiu-se como o tempo que a água alcançava o sensor o momento em que as variações iniciais do gráfico cessavam e a temperatura começava a subir sem perturbações e nitidamente. As retas coloridas presentes nos gráficos do Apêndice A ajudaram a identificar o tempo exato da ascensão da temperatura.

Com os tempos definidos, foi possível perceber que a discrepância entre os tempos para a água chegar no primeiro sensor de cada ensaio de mesma umidade de moldagem foi alta, isso porque alguns CPs ficaram mais tempo até a temperatura estabilizar, para então a infiltração ser iniciada. Isso gerou tempos iniciais diferentes, o que fez com que os demais sensores também apresentassem tempos maiores para a água alcançá-los. Para sanar essa discrepância convencionou-se que os três CPs moldados com aproximadamente 14,2% de umidade levaram 5 minutos para acusar a presença de água no primeiro sensor. Já os CPs com 10,7% levaram 4 minutos, os de 8,8% levaram 3 minutos e os de 4,7% e 2,0% levaram 2 minutos.

Foi feita então a média dos tempos para cada sensor de mesma umidade de moldagem e a média da profundidade (H) de cada sensor quando duas pontas de prova diferentes foram utilizadas. Tendo-se a profundidade, foi possível determinar a distância entre cada sensor ( $\Delta H$ ) e assim calcular a taxa de infiltração pela Equação 12 em  $\text{mm.h}^{-1}$ . O Quadro 3 apresenta os valores encontrados para a taxa de infiltração através dos sensores.

Com o valor da taxa de infiltração, foi possível analisar os dados dessa pesquisa e compará-los com a de outros pesquisadores que também realizaram ensaios de infiltração em diferentes solos.

Quadro 3 – Taxa de infiltração definida através da interpretação dos dados dos termopares

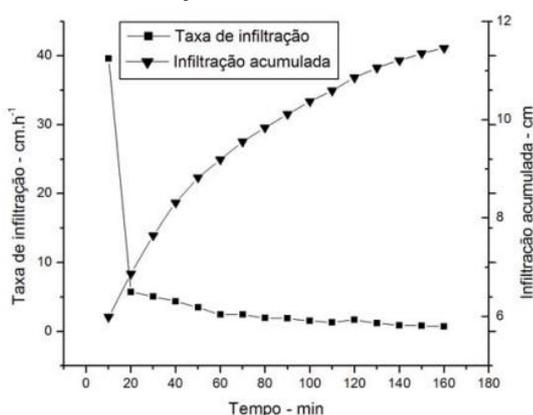
	Tempo (h)	$\Delta H$ (mm)	Taxa de inf. (mm.h <sup>-1</sup> )		Tempo (h)	$\Delta H$ (mm)	Taxa de inf. (mm.h <sup>-1</sup> )
Umidade 13.8%	0.083	21	253.0120	Umidade 10.3%	0.067	19	313.4328
	0.119	19	159.6639		0.081	19	233.2879
	0.128	19	147.9239		0.118	19	160.8655
	0.202	19	93.9044		0.146	19	130.2361
	0.234	19	81.1580		0.266	20	71.3094
Umidade 8.7%	0.050	21	420.0000	Umidade 4.8%	0.033	21	636.3636
	0.067	19	285.0000		0.049	19	386.8778
	0.111	19	171.0000		0.105	19	180.5702
	0.132	19	143.6975		0.115	19	165.6977
	0.194	19	97.7143		0.145	19	130.8340
Umidade 1.8%	0.033	21	636.3636				
	0.042	19	447.6440				
	0.091	19	209.3023				
	0.108	19	175.9259				
	0.119	19	160.2624				

Fonte: A autora (2022).

#### 4.3.2 Infiltração acumulada e taxa de infiltração para o solo areno-siltoso

Após a definição da taxa de infiltração, foi possível traçar os gráficos de infiltração acumulada por tempo em escala logarítmica e a taxa de infiltração por tempo em escala aritmética conforme definido por Paixão *et al.* (2004). Os gráficos referentes a essa pesquisa para cada umidade de moldagem estão apresentados no Apêndice B, e se assemelham ao gráfico da Figura 43 traçado por Paixão *et al.* (2004) para analisar o comportamento de infiltração de um solo com textura arenosa presente na Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária (EMEPA) na Paraíba.

Figura 43 – Curva dos valores médio da velocidade infiltração e infiltração acumulada medidas em campo na EMEPA, Paraíba.



Fonte: Paixão *et al.* (2004).

Nos gráficos para o solo areno-siltoso apresentados no Apêndice B, a infiltração acumulada foi apresentada em mm e a taxa de infiltração em  $\text{mm.h}^{-1}$ . Além disso, como não há um perfil de solo de grandes dimensões e a quantidade de pontos são inferiores aos obtidos por meio do ensaio do infiltrômetro de anel, desta forma a curva ficou mais enxuta, mas se os dados forem extrapolados o comportamento observado é similar.

No estudo de Paixão *et al.* (2004), a taxa de infiltração no início do teste é alta (aproximadamente  $396,1 \text{ mm.h}^{-1}$ ) e conforme o tempo passa a infiltração diminui até chegar a um ponto que tenderá a atingir um valor quase constante chamado de infiltração básica ( $7 \text{ mm.h}^{-1}$ ). Esse mesmo comportamento pode ser observado nessa pesquisa se a taxa de infiltração for extrapolada nos gráficos e se forem analisados os CPs que possuíam umidades de moldagem mais altas.

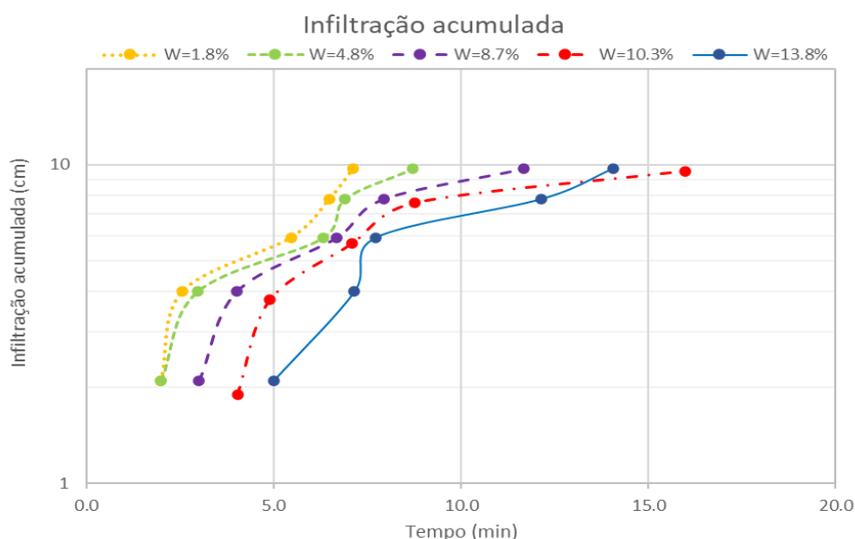
Rodrigues (2013) realizou ensaios de infiltração no solo dos cerrados do Brasil, mais especificamente em um Latossolo Vermelho Distroférico e encontrou valores de taxa de infiltração de  $540 \text{ mm.h}^{-1}$  no início do processo, atingido a VIB perto dos 200 minutos com valor de  $45 \text{ mm.h}^{-1}$ . Teixeira *et al.* (2010), por outro lado, testaram um Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico e encontraram valores de taxa de infiltração inicial equivalente a  $402 \text{ mm.h}^{-1}$ , atingindo a VIB a  $48 \text{ mm.h}^{-1}$ .

A velocidade de infiltração básica para o solo areno-siltoso, independente da umidade de moldagem, foi de  $6 \pm 0,6 \text{ mm.h}^{-1}$ , se assemelhando ao valor encontrado por Paixão *et al.* (2004) que é o solo que mais se assemelha ao usado nesta pesquisa.

#### 4.3.3 Comparação da infiltração para as diferentes umidades de moldagem

Com as taxas de infiltração calculadas, foi possível traçar um gráfico de infiltração acumulada por tempo compilando as diferentes curvas para cada umidade de moldagem, como apresentado na Figura 44.

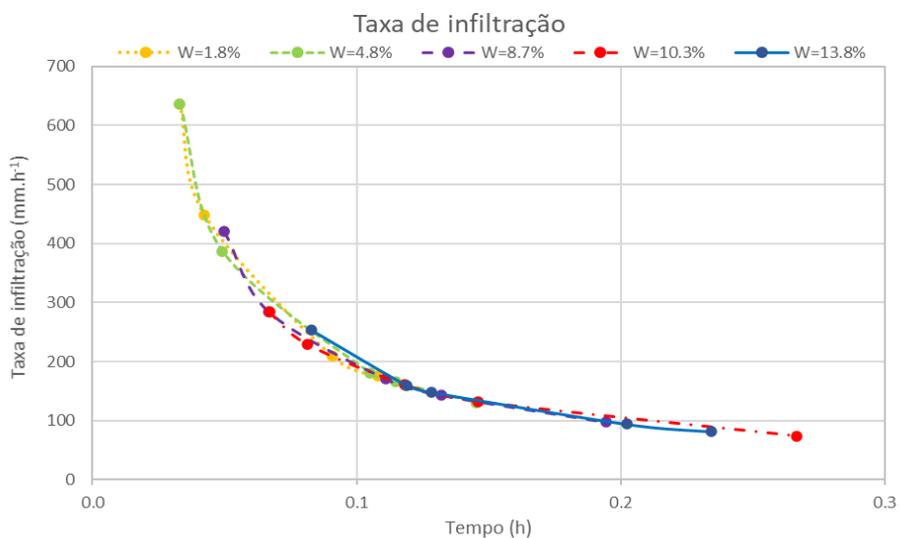
**Figura 44 – Gráfico de infiltração acumulada por tempo para todas as umidades de moldagem.**



Por meio do gráfico apresentado na Figura 44, é possível notar que a infiltração ocorre mais rapidamente nos CPs com baixa umidade. Além disso, o comportamento de infiltração ao longo da profundidade para os CPs com umidade ótima e no ramo seco da curva Proctor são similares, apenas levando mais tempo para atingir a mesma profundidade devido à umidade inicial do solo. Já os CPs moldados no ramo úmido da curva Proctor tiveram comportamentos variados, sendo que o solo com umidade de 10,3% foi o que levou mais tempo para a infiltração ocorrer.

Outro gráfico possível de ser analisado é o da taxa de infiltração por tempo, como pode ser observado na Figura 45.

**Figura 45 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo para todas as umidades de moldagem.**



Através do gráfico da Figura 45, pode-se constatar que a velocidade de infiltração é maior quando a umidade do solo é menor, porém há um limite de umidade que leva a água a ficar retida por mais tempo nas últimas camadas, neste caso 10,3%. Após essa umidade, o perfil de solo já se encontra muito inundado e a água tende a percorrer mais rápido as últimas camadas. Essa observação está de acordo com o apresentado por Lepsch (2010) e descrito no Item 2.2.

#### 4.3.4 Determinação da equação de taxa de infiltração para o solo areno-siltoso e comparação com outras equações definidas por métodos empíricos

Com os gráficos de taxa de infiltração por tempo presentes do Apêndice B, foi possível definir uma equação que melhor descrevesse a infiltração para cada umidade de moldagem. Para isso, acrescentou-se uma linha de tendência aos pontos dos gráficos traçados no Excel e optou-se pela equação de potenciação para todas as umidades, pois foi a que apresentou coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mais perto de 1.

Para validar as equações apresentadas para cada umidade de moldagem, comparou-se as com as equações empíricas de Kostiaikov, Kostiaikov-Lewis e Horton já descritas na Tabela 2 do Item 2.2.2. Para isso foram definidos os parâmetros de cada equação por meio gráfico. Os valores estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Parâmetros de Kostiaikov, Kostiaikov-Lewis e Horton para o solo areno-siltoso**

Parâmetro	Umidade				
	13,8%	10,3%	8,7%	4,8%	1,8%
k	3,20	1,00	1,15	0,87	1,05
a	0,2467	0,7494	0,2088	0,9015	0,6969
VIB ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	0,010	0,010	0,010	0,011	0,011
$i_f$ ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	16	16	18	18	18
$\beta$	5,5	6,5	8,0	11,0	12,0

Fonte: A autora (2022).

Aplicando-se os parâmetros nas respectivas equações e tendo-se o tempo para atingir cada sensor da ponta de prova, é possível comparar estatisticamente a taxa de infiltração desta pesquisa com as dos demais autores por meio do Erro Quadrático Médio (EQM) e do Erro Padrão de Estimativa (SEE) explicados no Item 3.3.6.

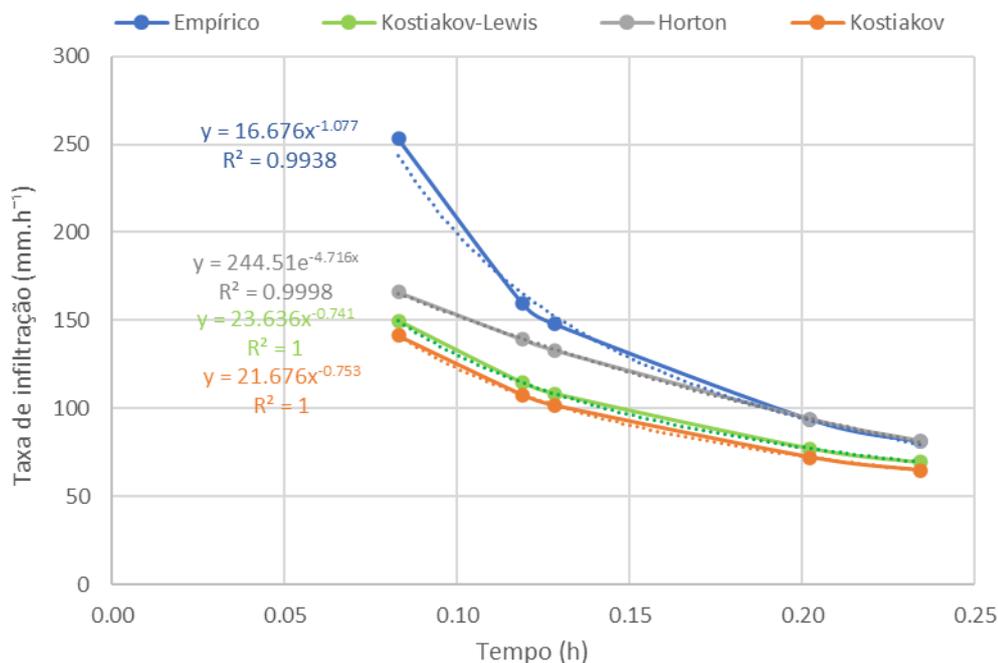
Os Quadros 4 a 8 e as Figuras 46 a 50, apresentam para cada umidade: a equação potencial que define a taxa de infiltração para o solo areno-siltoso; o gráfico com as equações de Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton e seus respectivos  $R^2$  e o quadro com as comparações estatísticas pelo EQM e SEE.

**Quadro 4 – Análise estatística para a umidade de 13,8%**

Umidade = 13,8%						Média	
Empírico (mm.h <sup>-1</sup> )	253,01	159,66	147,92	93,90	81,16	<b>147,13</b>	
Kostiakov (mm.h <sup>-1</sup> )	141,33	107,74	101,72	72,23	64,71	<b>EQM</b>	<b>SEE</b>
Kostiakov - Emp. <sup>2</sup>	12471,92	2696,02	2135,07	469,70	270,38	<b>40,83</b>	<b>77,55</b>
Kos.Lewis (mm.h <sup>-1</sup> )	149,61	114,54	108,24	77,28	69,36	<b>EQM</b>	<b>SEE</b>
Kos.Lewis - Emp. <sup>2</sup>	10691,46	2036,05	1575,14	276,45	139,29	<b>36,88</b>	<b>70,04</b>
Horton (mm.h <sup>-1</sup> )	166,15	139,18	132,94	93,89	81,40	<b>EQM</b>	<b>SEE</b>
Horton - Emp. <sup>2</sup>	7545,64	419,77	224,50	0,00	0,06	<b>27,51</b>	<b>52,25</b>

Fonte: A autora (2022).

**Figura 46 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiakov, de Kostiakov-Lewis e Horton para a umidade de 13,8%.**



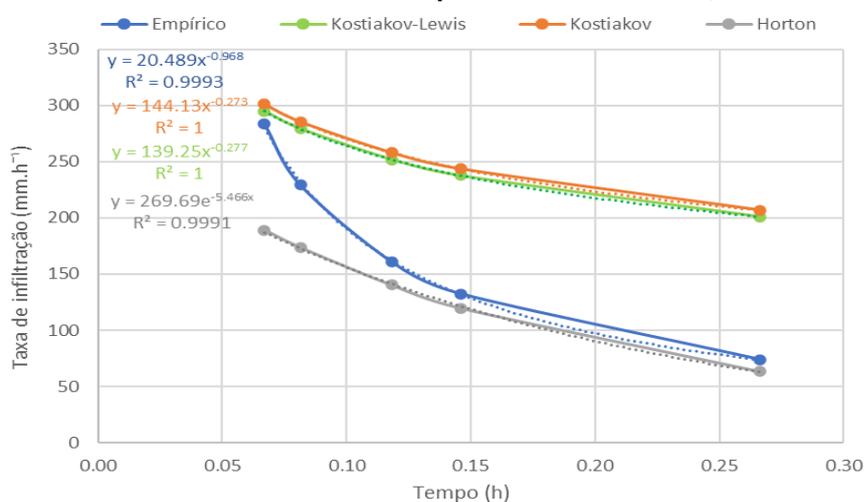
Fonte: A autora (2022).

Quadro 5 – Análise estatística para a umidade de 10,3%

Umidade = 10,3%						Média	
Empírico (mm.h <sup>-1</sup> )	313,43	243,24	171,34	145,16	76,75	<b>189,99</b>	
Kostiakov (mm.h <sup>-1</sup> )	301,07	285,47	257,97	243,54	206,68	EQM	SEE
Kostiakov - Emp. <sup>2</sup>	152,90	1783,05	7504,38	9678,69	16880,83	<b>44,66</b>	<b>109,54</b>
Kos.Lewis (mm.h <sup>-1</sup> )	294,74	279,20	251,85	237,51	200,97	EQM	SEE
Kos.Lewis - Emp. <sup>2</sup>	349,48	1292,97	6480,93	8529,13	15429,98	<b>42,16</b>	<b>103,41</b>
Horton (mm.h <sup>-1</sup> )	208,42	191,18	154,03	131,23	68,63	EQM	SEE
Horton - Emp. <sup>2</sup>	11027,37	2710,85	299,75	194,14	65,93	<b>28,15</b>	<b>69,04</b>

Fonte: A autora (2022).

Figura 47 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiakov, de Kostiakov-Lewis e Horton para a umidade de 10,3%.



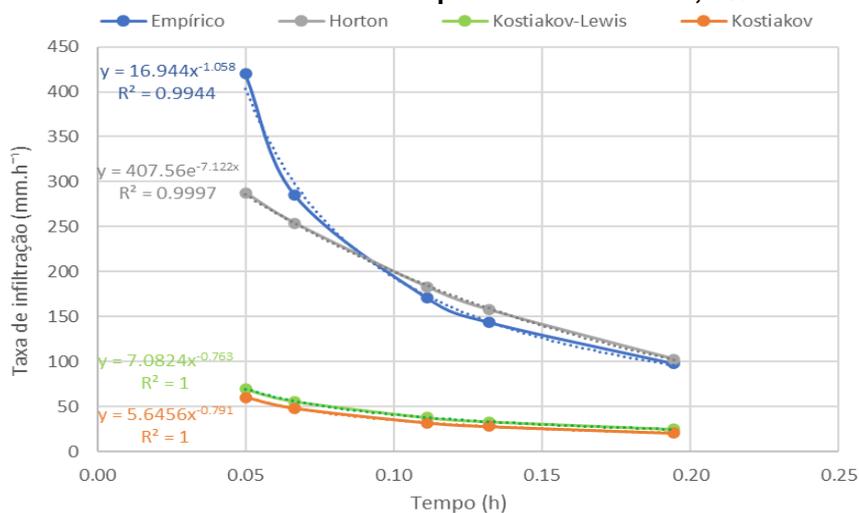
Fonte: A autora (2022).

Quadro 6 – Análise estatística para a umidade de 8,7%

Umidade = 8,7%						Média	
Empírico (mm.h <sup>-1</sup> )	420,00	285,00	171,00	143,70	97,71	<b>223,48</b>	
Kostiakov (mm.h <sup>-1</sup> )	60,41	48,11	32,11	27,99	20,63	EQM	SEE
Kostiakov - Emp. <sup>2</sup>	129307,73	56117,17	19289,14	13389,30	5942,63	<b>94,72</b>	<b>273,28</b>
Kos.Lewis (mm.h <sup>-1</sup> )	69,72	55,98	37,90	33,19	24,72	EQM	SEE
Kos.Lewis - Emp. <sup>2</sup>	122692,81	52451,62	17715,39	12212,43	5327,62	<b>91,79</b>	<b>264,83</b>
Horton (mm.h <sup>-1</sup> )	287,47	253,83	183,27	157,59	102,85	EQM	SEE
Horton - Emp. <sup>2</sup>	17564,56	971,46	150,48	192,87	26,39	<b>27,51</b>	<b>79,38</b>

Fonte: A autora (2022).

**Figura 48 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiakov, de Kostiakov-Lewis e Horton para a umidade de 8, 7%.**



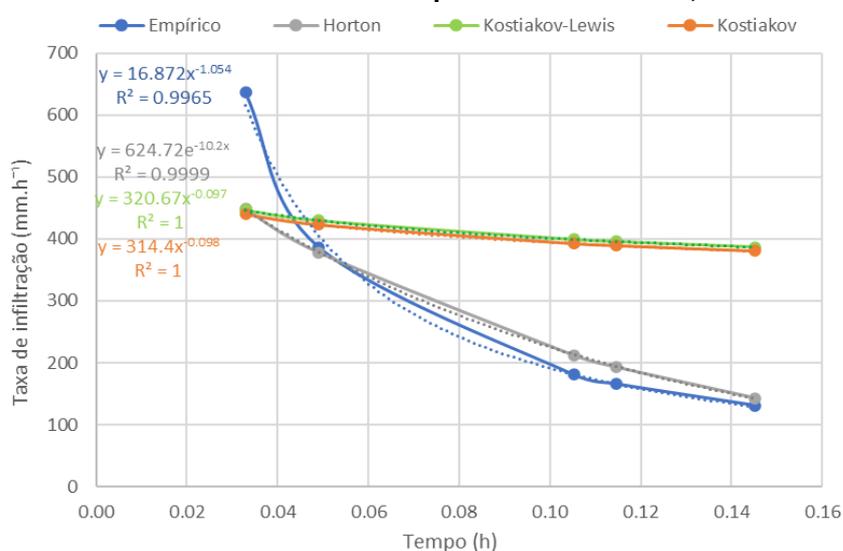
Fonte: A autora (2022).

**Quadro 7 – Análise estatística para a umidade de 4,8%**

Umidade = 4,8%						Média	
Empírico (mm.h <sup>-1</sup> )	636,36	386,88	180,57	165,70	130,83	<b>300,07</b>	
Kostiakov (mm.h <sup>-1</sup> )	439,96	423,07	392,47	389,16	380,21	EQM	SEE
Kostiakov - Emp. <sup>2</sup>	38573,78	1309,51	44903,16	49937,64	62190,39	<b>66,14</b>	<b>256,20</b>
Kos.Lewis (mm.h <sup>-1</sup> )	446,59	429,68	399,04	395,72	386,75	EQM	SEE
Kos.Lewis - Emp. <sup>2</sup>	36013,12	1832,05	47727,42	52910,13	65490,87	<b>67,31</b>	<b>260,75</b>
Horton (mm.h <sup>-1</sup> )	448,13	378,27	212,34	193,17	143,16	EQM	SEE
Horton - Emp. <sup>2</sup>	35433,65	74,09	1009,60	754,60	152,05	<b>28,83</b>	<b>111,69</b>

Fonte: A autora (2022).

**Figura 49 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiakov, de Kostiakov-Lewis e Horton para a umidade de 4,8%.**



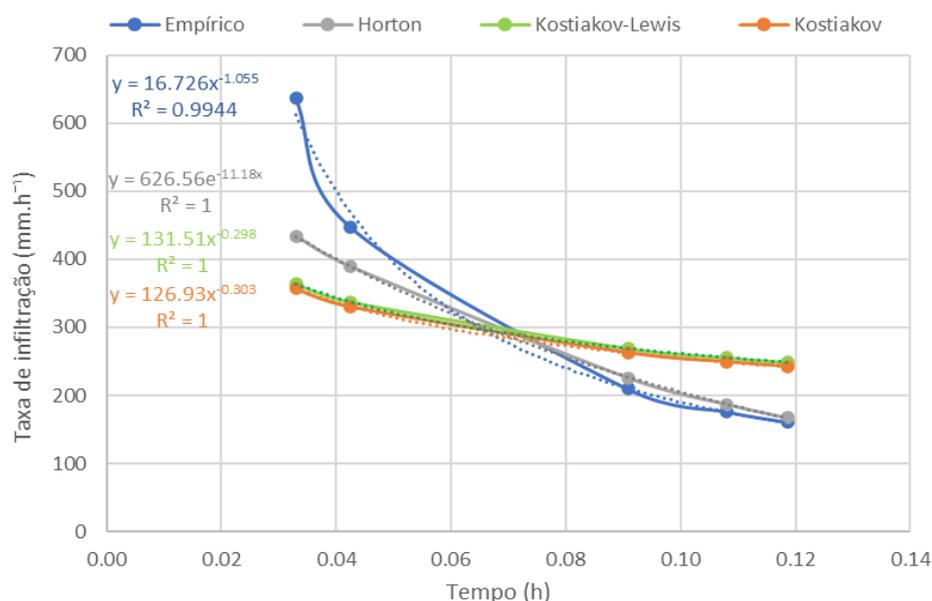
Fonte: A autora (2022).

Quadro 8 – Análise estatística para a umidade de 1,8%

Umidade = 1,8%						Média	
Empírico (mm.h <sup>-1</sup> )	636,36	447,64	209,30	175,93	160,26	325,90	
Kostiakov (mm.h <sup>-1</sup> )	356,94	330,72	262,66	249,19	242,24	EQM	SEE
Kostiakov - Emp. <sup>2</sup>	78079,14	13671,14	2846,77	5366,95	6720,49	44,82	188,58
Kos.Lewis (mm.h <sup>-1</sup> )	363,93	337,60	269,08	255,49	248,48	EQM	SEE
Kos.Lewis - Emp. <sup>2</sup>	74218,28	12109,30	3573,66	6330,33	7782,00	44,26	186,20
Horton (mm.h <sup>-1</sup> )	434,16	389,57	226,04	187,20	167,07	EQM	SEE
Horton - Emp. <sup>2</sup>	40885,15	3372,32	280,24	127,09	46,33	29,02	122,08

Fonte: A autora (2022).

Figura 50 – Gráfico da taxa de infiltração por tempo empírico, pelo método de Kostiakov, de Kostiakov-Lewis e Horton para a umidade de 1,8%.



Fonte: A autora (2022).

Pela análise estatística, fica claro que o modelo que mais se assemelha à equação encontrada nesta pesquisa é a definida pelo método de Horton, que também utilizou um solo areno-siltoso (75% de areia fina e 25% de silte). Cada tipo de solo e condições externas influenciam a escolha do método. Por se tratar de modelos empíricos, tanto a equação de Kostiakov, quanto as de Kostiakov-Lewis e a de Horton foram delimitadas e desenvolvidas por meio de ensaio e as condições de contorno definidas no desenvolvimento dessas equações foram diferentes das definidas nessa pesquisa, por isso apresentar EQM e SEE elevados não são um problema.

Paixão *et al.* (2009) explicam que os modelos empíricos propostos tendem a variar pouco entre si, entretanto, a taxa de infiltração apresenta discrepância entre os valores ensaiados e calculados pelos modelos no início da infiltração, não servindo para estimá-la neste momento. Os autores encontraram valores de SEE indo de 104,87% para a comparação com o modelo de Horton, que também foi o melhor ajuste para o argissolo vermelho ensaiado por eles, até 135,47% para o modelo de Kostiakov-Lewis, que foi o que menos se ajustou.

No trabalho de Rodrigues (2013), o método que melhor se ajustou ao latossolo vermelho foi o de Kostiakov, seguido por Kostiakov-Lewis e Horton. Já no estudo do solo arenoso de Madalena (PE) feito por Oliveira, Soares e Holanda (2018), o modelo que melhor se ajustou foi o de Kostiakov e o pior foi o de Horton. Todas essas referências validam a afirmação de que a escolha do método é fortemente controlada pelo tipo de solo e seus fatores externos.

#### 4.3.5 Ensaio de verificação da funcionalidade da ponta de prova

Para confirmar a funcionalidade dos sensores de temperatura embarcados na ponta de prova, realizou-se um teste de infiltração que foi interrompido no momento que o terceiro sensor acusou a presença de água. O CP foi moldado com umidade de 4,0% para que assim a infiltração pudesse ser observada pelo cilindro, já que o solo estava no ramo seco.

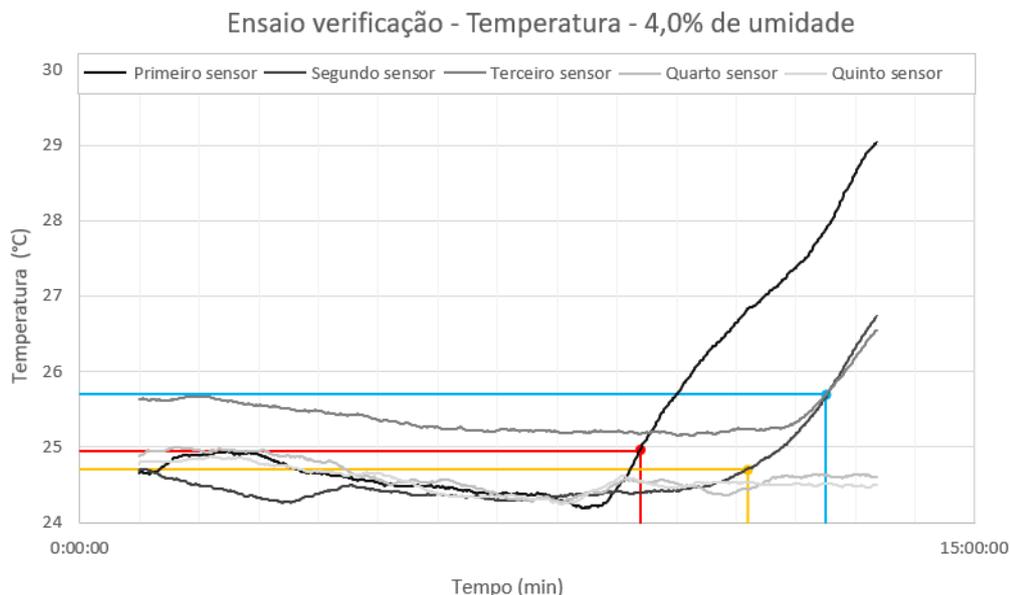
Conduziu-se o ensaio da mesma forma que os demais ensaios de infiltração, mantendo-se a coluna de água de 3 cm sobre o CP e a temperatura com cerca de 30 °C.

O ensaio foi pausado no momento que a água alcançou o sensor 3 alocado a 5,2 cm da superfície. O gráfico desse ensaio pode ser observado na Figura 51. Os tempos para a água encontrar os sensores 1, 2 e 3 foram 9,4 minutos, 11,2 minutos e 12,5 minutos, respectivamente.

Quando a água alcançou o terceiro sensor o ensaio foi pausado, a água de cima do CP foi retirada e 9 cápsulas de umidade foram retiradas, três do começo do CP, três um pouco acima do sensor 3 e três logo abaixo dele. A umidade média de cada grupo de três cápsulas foi encontrada, obtendo-se 18,0% de umidade no começo do CP; 12,6% de umidade um pouco acima do sensor 3 e 8,0% de umidade

um pouco abaixo. O que confirma que o solo abaixo do sensor ainda estava com umidade mais baixa, ou seja, a água não havia chegado nele.

**Figura 51 – Gráfico da temperatura por tempo para verificação da ponta de prova.**



Fonte: A autora (2022).

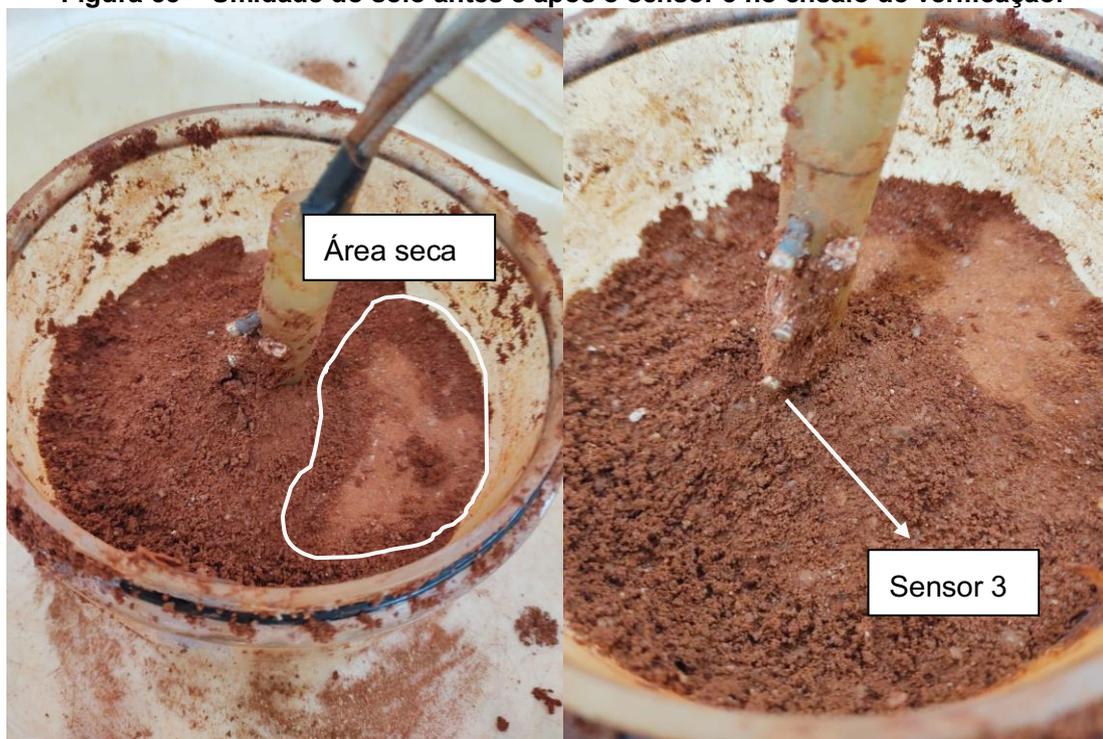
Além disso, a visualização da frente de umedecimento pelo cilindro de acrílico também confirmou que a água parou na altura que o sensor 3 se encontrava. A Figura 52 demonstra esse fato e a Figura 53 mostra nitidamente a diferença de coloração do solo úmido para o solo seco na altura do sensor de referência ao ser escavado para a retirada das cápsulas de umidade.

**Figura 52 – Frente de saturação atingindo o sensor 3 no ensaio de verificação.**



Fonte: A autora (2022).

**Figura 53 – Umidade do solo antes e após o sensor 3 no ensaio de verificação.**



Fonte: A autora (2022).

Além desse ensaio, o sensor de capacitância (FDR) também foi utilizado como uma forma de confirmar a eficiência da ponta de prova desenvolvida. Esse sensor mede a resistividade do solo antes e após a infiltração. Ele fornece um gráfico que se encontra constante quando inserido na matriz de solo, mas quando a água atinge suas hastes sofre uma queda brusca na resistividade e vai aumentando conforme a água infiltra ao longo do seu comprimento, voltando a ficar constante somente após o bulbo de solo ao redor do sensor estar completamente úmido.

Viana (2016) afirma que a interpretação da resistividade aparente do solo pode ser feita de várias formas. Porém, para se obter valores significativos para o estudo da infiltração, esse sensor precisaria ser calibrado com base na umidade obtida pela secagem em estufa da amostra após a medição. Como o foco deste trabalho era determinar a taxa de infiltração da água no solo areno-siltoso e a ponta de prova com os sensores termopares já forneceu isso, optou-se por apenas usar os dados dos sensores FDR para saber se a água estava infiltrando corretamente, já que a sua haste está localizada antes do primeiro sensor termopar, ou seja, a queda da resistividade ocorre antes nesse sensor do que a ascensão da temperatura no primeiro termopar da ponta de prova.

Os gráficos dos sensores de umidade para cada ensaio realizado, bem como o registro do tempo em que o sensor acusa a presença de água na sua haste e o tempo que ele começa a estabilizar foram apresentados no Apêndice C.

#### 4.3.6 Prós e contras da ponta de prova

Após a execução de todos os ensaios de infiltração e do tratamento e análise dos resultados encontrados, pode-se fazer uma tabela (Tabela 10) com os prós e contras da utilização da ponta de prova desenvolvida nessa pesquisa para a medição da taxa de infiltração empiricamente.

<b>PRÓS</b>	<b>CONTRAS</b>
1) O custo para produção da ponta de prova é inferior aos equipamentos automatizados disponíveis no mercado e que possuem a mesma finalidade;	1) O equipamento ainda precisa ser aperfeiçoado para corrigir alguns problemas de mau contato e até permitir a obtenção da taxa de infiltração de forma mais automática;
2) A ponta de prova é mais precisa que o infiltrômetro de anel, que é o equipamento mais utilizados na determinação da infiltração;	2) O intervalo de variação da temperatura dos termopares é muito alto, o que dificulta a obtenção do tempo;
3) É capaz de prever a frente de umedecimento do solo;	3) Necessita de internet à disposição para gerar os gráficos simultâneos;
4) Fornece dados de infiltração e não outros parâmetros que podem ser convertidos em taxa de infiltração, como os demais equipamento fazem;	4) A ponta de prova precisa ser inserida durante a compactação do solo, ou seja, ao se realizar o ensaio em campo seria necessário considerar a perda da sonda;
5) Possui melhor desempenho em ensaios de laboratório.	5) É necessário um computador conectado ao equipamento para observar os gráficos.

Fonte: A autora (2022).

O custo final do equipamento desenvolvido com apenas uma ponta de prova embarcada foi de R\$719,83. No Apêndice D estão listados todos os itens adquiridos para a produção do equipamento (que comporta até três pontas de prova) e de uma ponta de prova, com os respectivos preços.

As maiores vantagens do equipamento são o custo e o fato de ser desenvolvido em um *hardware* livre. Como já descrito nos Itens 1.2 e 2.3, existem no mercado outras sondas que possuem a funcionalidade da ponta de prova desenvolvida nesta pesquisa, como é o caso da TEROS 06 da Meter Group.

Entretanto, a aplicação da TEROS 06 somente foi estudada para solos de plantio, não sendo possível editar seu código para acrescentar as características de contorno dos solos resistentes da Engenharia Civil. Além disso, seu custo é alto, sendo necessário adquirir também o *datalogger* que traduz os dados recebidos da sonda.

Assim como a ponta de prova dessa pesquisa, a TEROS 06 fornece apenas o tempo e a temperatura, sendo necessário o tratamento desses dados para se obter a taxa de infiltração. Como a sonda é registrada, não há possibilidade de aprimorar seu código para já fornecer a taxa de infiltração, como pode ser feito com a ponta de prova desenvolvida neste trabalho.

Há ainda um longo caminho a ser percorrido no desenvolvimento e aprimoração de equipamentos para aplicação na Geotecnia que possuam custos acessíveis e há também muito a ser estudado sobre o movimento da água no solo. Com o desenvolvimento das pesquisas e com mais testes sendo realizados, o equipamento desenvolvido neste trabalho pode vir a ser aplicado em campo, facilitando ainda mais o estudo da infiltração da água nos solos que serão utilizados para pavimentação, barragens, taludes e sistemas de drenagem.

## 5 CONCLUSÕES

As principais conclusões que puderam ser obtidas do presente estudo foram:

- A utilização de sensores para Arduino para determinar a taxa de infiltração da água no solo para a engenharia geotécnica é algo novo e conta com poucas referências bibliográficas. Por se tratar de tecnologia, a maioria das informações e avanços conseguidos nessa pesquisa sobre o equipamento desenvolvido só podem ser encontradas na internet e em nuvens que hospedam os sistemas de controle denominado Git, onde desenvolvedores colaboram e modificam projetos compartilhados nesse sistema;
- O solo desenvolvido para não expandir durante a infiltração atingiu seu objetivo ao retirar-se todos os finos passantes na peneira #200 (0,075 mm) e misturar-se 70% de areia e 30% de solo siltoso;
- Do ensaio de compactação nas três energias Proctor, foi possível perceber que o solo fino (solo siltoso) apresentou pesos específicos secos máximos inferiores e umidades ótimas superiores ao do solo grosso (solo areno-siltoso);
- Pelos ensaios de infiltração pode-se constatar que o tempo para a água infiltrar no solo mais seco foi aproximadamente duas vezes menor que no solo mais úmido, levando 7,1 minutos e 14,1 minutos, respectivamente. Isso significa que a velocidade de infiltração é maior quando a umidade do solo é menor;
- Contudo, há um limite de umidade que leva a água a ficar retida por mais tempo nas últimas camadas. Após essa umidade, o perfil de solo já se encontra muito inundado e a água tende a percorrer mais rápido as últimas camadas. Esse comportamento pode ser observado nos CPs moldados com 13,8% e 10,3% de umidade inicial. Os CPs mais úmidos tiveram taxa de infiltração mais alta (81,16 mm.h<sup>-1</sup>) que os CPs com 10,3% (71,31 mm.h<sup>-1</sup>);
- Ao comparar as equações potenciais determinadas nessa pesquisa com os modelos empíricos de Kostiaikov, Kostiaikov-Lewis e Horton, este último

foi o que se ajustou melhor às equações definidas nos ensaios do solo areno-siltoso. Independentemente do modelo, a taxa de infiltração apresenta discrepância entre os valores ensaiados e calculados no início da infiltração, diminuindo a variação conforme a infiltração avança;

- As grandes vantagens do equipamento desenvolvido são seu custo e o fato de ser programado em um *hardware* livre, o que permite alterações no código conforme avanços científicos forem sendo alcançados. Suas grandes desvantagens são a necessidade de aprimoramentos no sistema para fornecer a taxa de infiltração como *output* do programa e a exigência de ajustes na ponta de prova e locação dos termopares para que possam ser aplicados em campo.

Sugere-se ainda para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios de permeabilidade e determinar a sucção do solo para que os métodos teóricos também possam ser aplicados e comparados com as equações definidas nesta pesquisa;
- Alterar as variáveis fixas e perceber como o solo se comporta. Nesta pesquisa, a única variável foi a umidade de moldagem, mas a coluna de água em cima do CP, a temperatura do ambiente e da água, a energia de moldagem e o tipo de solo também podem ser variados e testados;
- Aprimorar o código do equipamento para fornecer a taxa de infiltração diretamente, sem precisar tratar os dados de temperatura para se obter o tempo;
- Desenvolver uma placa mais resistente à poeira do solo e às gotículas de água, assim como armazená-la em um lugar melhor para que o equipamento possa ser conservado e levado a campo;
- Encontrar uma forma melhor de inserir os termopares no interior da ponta de prova ou melhorar o material que a compõe para que ela possa ser cravada no solo; e
- Aprofundar os estudos dos sensores de capacitância (FDR) para que eles possam ser utilizados juntamente com a ponta de prova de termopares e forneçam dados mais úteis que apenas detectar se a água chegou em suas hastes.

## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6502**: Rochas e solos. São Paulo, 1995.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. São Paulo, 2016 .

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. São Paulo, 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. São Paulo, 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6459**: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. São Paulo, 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. São Paulo, 2016.

AGUIAR, J. V.; LIBARDI, P. L.; SAUNDERS, L. C. U.; PAZ, V. P. S. Ajuste da Equação de Holtan Modificada para um Solo Bruno não Cálcico da Região Semi-árida. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande (PB), v. 2, n. 3, p. 253–256, 1998.

ANDRADE, I. F.; CARVALHO, I. O.; RODRIGUES, S. C. Monitoramento da Variação de Disponibilidade de Água Subsuperficial com a Utilização de Estações Tensiométricas. **I Simpósio Mineiro de Geografia**. Alfenas (MG), 2014. Disponível em: <https://www.unifal-mg.edu.br/simgeo/system/files/anexos/Iron%20Ferreira%20de%20Andrade.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SILVA, E. B.; LIMA, J. R. S.; NETTO, A. M.; LIRA, C. A. B. O.; HAMMECKER, C.; RUIZ, C. F. Utilização do Método Inverso para a Caracterização Hidrodinâmica de um Neossolo Flúvico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre (RS), v. 9, n. 3, p. 81–87, 2004.

BORTOLUZZI, E. C.; PERNES, M.; TESSIER, D. Interestratificado Caulinita-Esmectita em um Argissolo Desenvolvido a partir de Rocha Sedimentar do Sul do

Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v. 31, p. 1291–1300, 2007. Disponível em: 10.1590/S0100-06832007000600008. Acesso em: 22 jun. 2021.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. ISBN: 857269-247-9.

BRASIL. **DNER-ME 093/94**: Solos - Determinação da densidade real. Norma Rodoviária. DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994 a. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner\\_me\\_093\\_94.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_093_94.pdf). Acesso em: 21 abr. 2021.

BRASIL. **DNER-ME 162/94 - Solos - Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas**. DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

CALHEIROS, C. B. M.; TENÓRIO, F. J. C.; CUNHA, J. L. X. L.; DA SILVA, E. T.; DA SILVA, D. F.; DA SILVA, J. A. C. Definition of the infiltration rate for the design of sprinkler irrigation system. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande (PB), v. 13, n. 6, p. 665–670, 2009. DOI: 10.1590/s1415-43662009000600001. Acesso em: 21 abr. 2021.

CAMPBELL, G. S.; CAMPBELL, C. S.; COBOS, D. R.; BROWN, D.; CRAWFORD, L. B.; RIVERA, L.; CHAMBERS, C. **How to measure soil hydraulic conductivity - Which method is right for you?**. Meter Group. Disponível em: <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/measurement-insights/how-measure-soil-hydraulic-conductivity-which-method-right-you>. Acesso em: 25 jan. 2022.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6. ed., Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988. v. 1.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. **Hidrologia: Cap. 5 Infiltração**. Rio de Janeiro: UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2021.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo**: As simplificações do método do perfil instantâneo. 2002. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de Encostas na Interface com a Geomorfologia. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 15. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

CRUZ, J. A. B. **Desenvolvimento de um Sensor de Umidade do Solo para Determinação da Frente de Molhamento**. 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013.

CUNHA, J. L. X. L.; ALBUQUERQUE, A. W.; SILVA, C. A.; ARAÚJO, E.; SANTOS JÚNIOR, R. B. Velocidade de Infiltração da Água em um Latossolo Amarelo Submetido ao Sistema de Manejo Plantio Direto. **Revista Caatinga**, Mossoró (RN), v. 22, n. 1, p. 199-205, 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=237117625029>. Acesso em: 27 jan. 2022.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Principles of Geotechnical Engineering**. 9. ed., Boston: Cengage Learning, 2016. v. 1. ISBN: 9781305970939.

BRASIL. **Sumário Mineral**. DNPM - Departameto Nacional de Produção Mineral, Brasília. Disponível em: [www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br). Acesso em: 7 mai. 2021.

FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba: Erosão - Movimentos Gravitacionais de Massa**. MINEROPAR - Serviço Geológico do Paraná, Curitiba, 2011.

FILIFELOP. **Termopar Tipo K com Módulo MAX6675**. Disponível em: <https://www.filife flop.com/produto/termopar-tipo-k-com-modulo-max6675/>. Acesso em: 17 mai. 2021.

FINCH, H. J. S.; SAMUEL, A. M.; LANE, G. P. F. Soils and soil management. **Lockhart & Wiseman's Crop Husbandry Including Grassland**, [S. l.], p. 37–62, 2014. DOI: 10.1533/9781782423928.1.37. Acesso em: 21 abr. 2021.

FIORIN, T. T. **Estimativa da Infiltração de Água no Solo a partir de Pedofunções**. 2008. 97 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/3309>. Acesso em: 6 mar. 2021.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed., São Paulo: Editora Atlas, 2002. ISBN: 8522431698.

GÓES, J. **Por que fazer um ensaio de infiltração antes de uma construção?**. Disponível em: <https://terraraajr.com.br/2021/08/27/por-que-fazer-um-ensaio-de-infiltracao-antes-de-uma-construcao/>. Acesso em: 26 jan. 2022.

GONDIM, T. M. S.; WANDERLEY, J. A. C.; SOUZA, J. M.; FEITOSA FILHO, J. C.; SOUSA, J. S. Infiltração e Velocidade de Infiltração de Água pelo Método do Infiltrômetro de Anel em Solo Areno-Argiloso. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Osasco (SP), v. 4, 2010. Disponível em: <http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RBGA/index>. Acesso em: 6 mar. 2021

GOOGLE MAPS. Disponível em: <https://www.google.com/maps/@-25.4427595,-49.353531,497m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 20 jun. 2021.

GRIDLING, G.; WEISS, B. **Introduction to microcontrollers**. Institute of Computer Engineering, Vienna: Vienna University of Technology, 2007. Disponível em: <https://ti.tuwien.ac.at/ecs/teaching/courses/mclu/theory-material/Microcontroller.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2021.

GSM ASSOCIATION. **Understanding the Internet of Things (IoT)**. Disponível em: [https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2014/08/cl\\_iot\\_wp\\_07\\_14.pdf](https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2014/08/cl_iot_wp_07_14.pdf). Acesso em: 16 mai. 2021.

HILLEL, D. **Applications of Soil Physics**. New York: Academic Press, 1980. ISBN: 9780124314122.

JOHANN, A. D. R. **Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**. 2013. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/72907/000884779.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 mai. 2021.

JOHNSON, A. I. **A Field Method for Measurement of Infiltration**. Geological Survey Water-Supply Paper. Washington: United States Government Printing Office, 1991. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/wsp/1544f/report.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2022.

JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; MARQUES, P. A.; FREITAS, P. S. L.; ALVES, D. S. Determinação da Velocidade de Infiltração Básica de Água em Dois Solos do Noroeste do Estado do Paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. Maringá (PR), 2012. DOI: 10.17765/2176-9168.2013V6N1P%P. Acesso em: 21 abr.

2021.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento Geomecânico da Formação Guabirota: Estudo de Campo e Laboratório**. 2002. 431 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2002.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2010. ISBN: 978-85-7975-008-3.

LIMA, G. L. **Estimativa da Infiltração da Água no Solo Utilizando o Modelo de Green-Ampt**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2010.

LIMA, V. C. G. R. **Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado**. 2009. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

LOKHANDE, D. G.; MOHSIN, S. A. Internet of Things for Ubiquitous Smart Home System. *In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS AND INFORMATION MANAGEMENT, ICISIM, 2017. Proceedings...* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017 p. 314–320. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8122191>. Acesso em: 16 mai. 2021.

LUETH, K. L. **IoT basics: Getting started with the Internet of Things**. Disponível em: <http://iot-analytics.com/wp/wp-content/uploads/2015/03/2015-March-Whitepaper-IoT-basics-Getting-started-with-the-Internet-of-Things.pdf>. Acesso em: 16 maio. 2021.

MAHLER, C. F. **Análise de Obras Assentes em Solos Colapsíveis e Expansivos**. 1994. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.

MARANGON, M. **Hidráulica dos Solos**. Material de apoio de Mecânica dos Solos II da UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, Minas Gerais, 2018. Disponível em: <https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-2018-Capitulo-01-Hidráulica-dos-Solos-20181.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2021.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed., São Paulo: Editira Atlas, 2003. ISBN: 8522406413.

METER GROUP. **Solos- Sensores**. Disponível em: [https://metergroup.com.br/agraria/produtos/solos-sensores/?gclid=CjwKCAiA3L6PBhBvEiwAINIJ9HPQV7U\\_yuNcf\\_\\_p24uftmZUEwi3LBIWOiKu8bl3odxEM0rCGelP6xoCTzwQAvD\\_BwE](https://metergroup.com.br/agraria/produtos/solos-sensores/?gclid=CjwKCAiA3L6PBhBvEiwAINIJ9HPQV7U_yuNcf__p24uftmZUEwi3LBIWOiKu8bl3odxEM0rCGelP6xoCTzwQAvD_BwE). Acesso em: 27 jan. 2022.

OLIVEIRA, E. **Como usar com Arduino - Sensor (Medidor) de Umidade do Solo (Higrômetro)**. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-medidor-de-umidade-do-solo-higrometro>. Acesso em: 17 mai. 2021.

OLIVEIRA, D. B. C.; SOARES, W. A.; HOLANDA, M. A. C. R. Análise de Desempenho de Modelos de Infiltração Unidimensional de Água no Solo. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo (SP), 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28947>. Acesso em: 27 jan. 2022.

OMEGA ENGINEERING BRASIL. **Saiba o que é um Termopar** . Disponível em: <https://br.omega.com/prodinfo/termopares.html>. Acesso em: 17 mai. 2021.

PAIXÃO, F. J. R.; ANDRADE, A. R. S.; AZEVEDO, C. A. V.; COSTA, T. L.; GUERRA, H. O. C. Ajuste da curva de infiltração por meio de diferentes modelos empíricos. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Guarapuava (PR), v. 2, n.1, 2009.

PAIXÃO, F. J. R.; ANDRADE, A. R. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, J. M.; COSTA, T. L.; FEITOSA, R. M. Estimativa da infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, São Cristóvão (SE), v. 5, n.1, 2004. Disponível em: <http://joaootavio.com.br/bioterra/workspace/uploads/artigos/estimativa-5181dd5f40966.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2004.

PINTO, C. S. **Curso Básico Mecânica dos Solos**. 3. ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2006. ISBN: 978-85-86238-51-2.

POTT, C. A.; MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), n. 1, p. 19–27, 2003.

RASOOL, T.; DAR, A. Q.; WANI, M. A. Development of a Predictive Equation for Modelling the Infiltration Process Using Gene Expression Programming. **Water Resources Management**, [S. l.], 2021. DOI: 10.1007/s11269-021-02816-4. Acesso em: 17 mar. 2021.

RIBEIRO, G. F.; PEREIRA, S. Y.; IWASHITA, F. Estudo Comparativo entre Métodos de Cálculo da Condutividade Hidráulica através de Ensaios com Permeâmetro Guelph. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande (MS), 2009. Disponível em: [https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/110/f23663766cf3a139f4c44415db810437\\_153858a2f861a452f9a88ec293c7f41b.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/110/f23663766cf3a139f4c44415db810437_153858a2f861a452f9a88ec293c7f41b.pdf). Acesso em: 05 fev. 2022.

RODRIGUES, M. H. **Infiltração da Água no Solo dos Cerrados do Brasil Utilizando Cilindros Infiltrômetros de Dimensões Reduzidas**. 2013. 19 f. Trabalho para a Obtenção do Título de Bacharel em Agronomia - Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2013. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/163/o/Monografia\\_Marcello\\_Hungria\\_Rodrigues.pdf?1378078060](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/163/o/Monografia_Marcello_Hungria_Rodrigues.pdf?1378078060). Acesso em: 05 fev. 2022.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R.; EBERT, H. D. Contribuição á Geologia da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR). **Boletim Paranaense de Geociencias**, Curitiba (PR), n. 47, p. 123–142, 1999. ISSN: 0067964X.

SANTOS, D. N.; SAAD, A. R.; STEVAUX, J. C. Mineração de Areia em Canais Fluviais de Grandes Rios Tropicais: Análise na Extração de Areia No Alto Curso do Rio Paraná entre os Municípios de Marilena e Guaíra (PR). **Revista ESPACIOS**. Caracas (VE), v. 36, n.13, 2015.

SNETHEN, D. R.; JOHNSON, L. D.; PATRICK, D. M. **An Evaluation of Expedient Methodology for Identification of Potentially Expansive Soils**. Washington: United States. Federal Highway Administration. Office of Research and Development, 1977. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37844>. Acesso em: 3 mai. 2021.

TAYLOR, R. K.; SMITH, T. J. The engineering geology of clay minerals: swelling, shrinking and mudrock breakdown. **Clay Minerals**, Cambridge (UK), v. 21, n. 3, p. 235–260, 1986. DOI: 10.1180/claymin.1986.021.3.01. Acesso em: 3 mai. 2021.

TEIXEIRA, W. **Comportamento Mecânico de Misturas Solo, Cal e RCD para Uso em Pavimentos**. 2019. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F.; TERRA, V. S. S.; REISSER JÚNIOR, C.; SIMONETE, M. A.; BRIXNER, G. F. Estimativa da infiltração de água através de modelos empíricos em um Argilossolo Vermelho Amarelo sob cultivo de pessegueiro, cv Maciel, em Pelotas/RS. **VIII Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo**. Santa Maria (SC), 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/878582/1/575.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

THOMSEN, A. **O que é Arduino: conceito, benefícios e como utilizar**. 2014. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino/>. Acesso em: 16 mai. 2021.

USINAINFO. **Sensor de Umidade do Solo Arduino HD-38**. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-umidade-arduino/sensor-de-umidade-do-solo-arduino-hd-38-5475.html>. Acesso em: 17 mai. 2021.

VALVERDE, F. M. **Agregados para Construção Civil**. Balanço Mineral Brasileiro, Brasília (DF), 2001.

VIANA, F. M. **Interpretação da Resistividade Aparente do Solo e Estratificação com Arranjo de Schlumberger**. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/6644/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Fernando%20Moreira%20Viana%20-%202016.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2022.

VIDAL, Vitor. **IoT com módulo WiFi Esp8266 - Básico**. 2017. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/iot-com-modulo-wifi-esp8266-basico/>. Acesso em: 16 mai. 2021.

VIEIRA, E. G.; REZENDE, E. Nr. Exploração Mineral de Areia e Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado: É possível conciliar?. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília (DF), v. 6, n. 2, p. 171–192, 2015. DOI: 10.18472/sustdeb.v6n2.2015.10795. Acesso em: 20 abr. 2021.

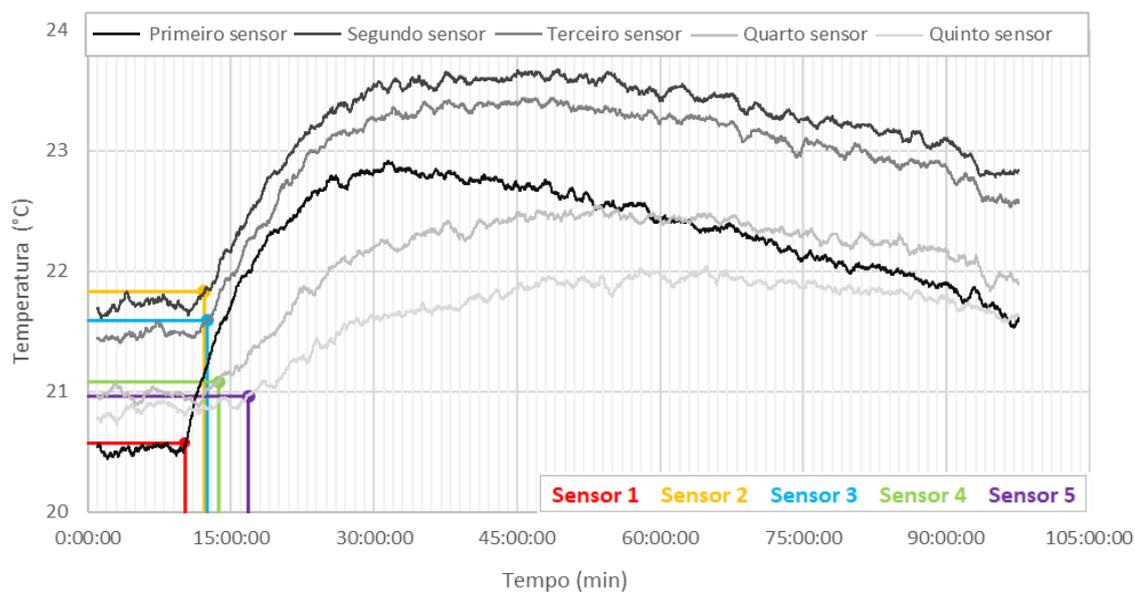
VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil LTDA., 1975.

WANG, N.; CHU, X. Revised Horton model for event and continuous simulations of infiltration. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 589, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125215. Acesso em: 07 mar. 2021.

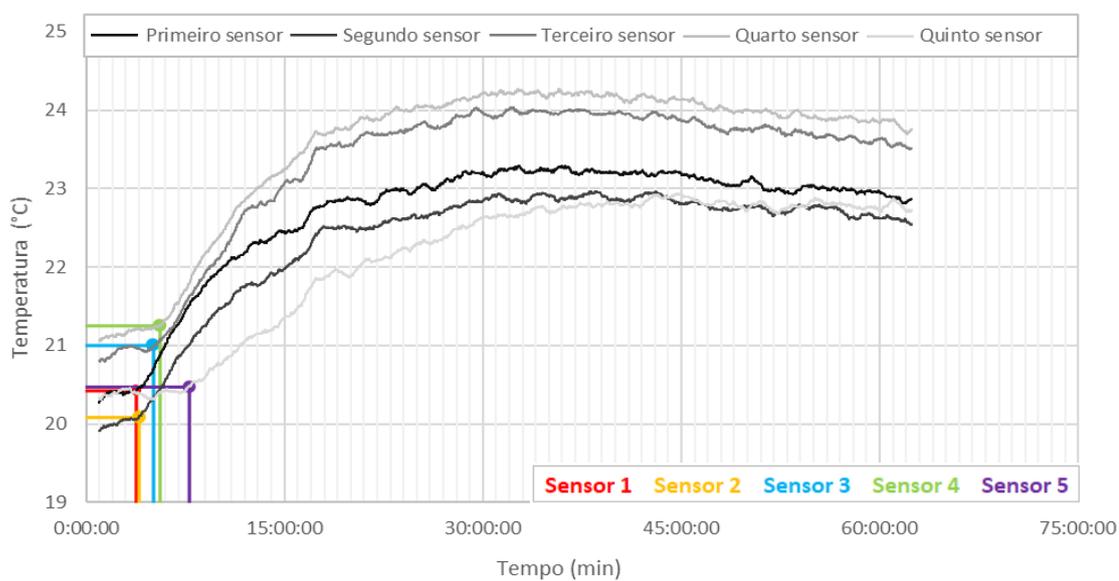
YUSRO, M.; GUNTORO, N. A.; RIKAWARASTUTI. Utilization of microcontroller technology using Arduino board for Internet of Things (a systematic review). **AIP Conference Proceedings**, [S. l.], v. 2331, 0600, 2021. DOI: 10.1063/5.0041705. Acesso em: 16 mai. 2021.

**APÊNDICE A** - Gráficos para determinar o tempo que a água levou para atingir cada sensor nas diferentes umidades de moldagem

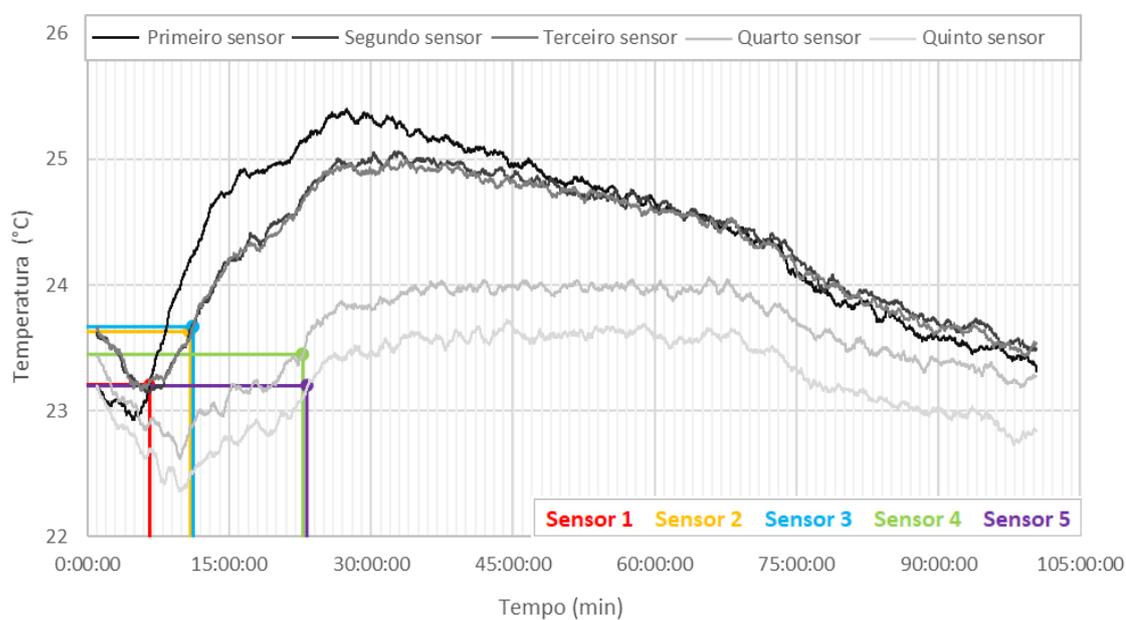
Ensaio 1 - Temperatura - 13,95% de umidade



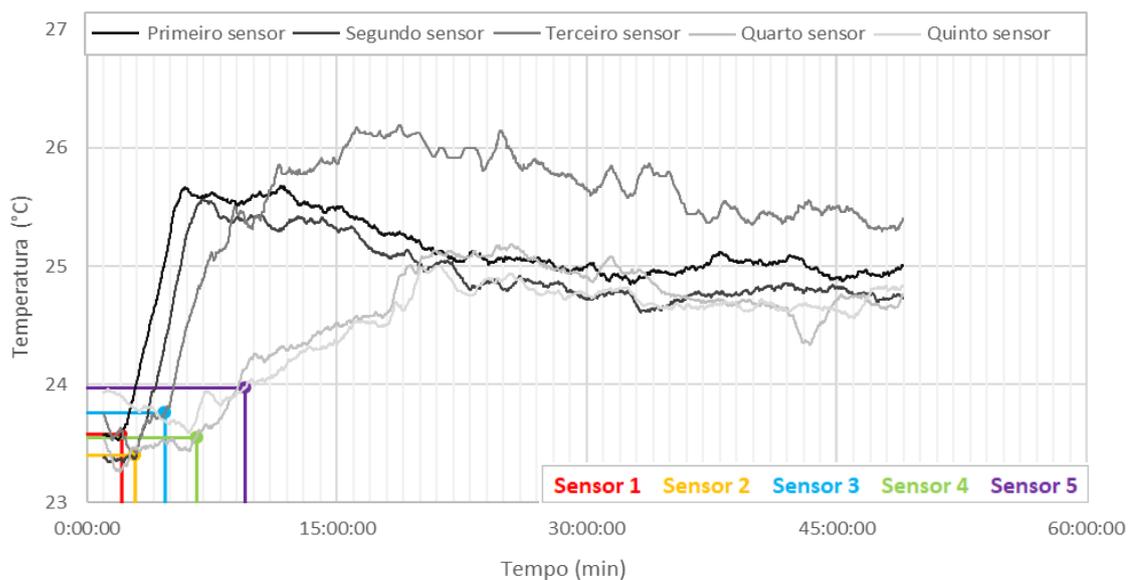
Ensaio 2 - Temperatura - 13,39% de umidade



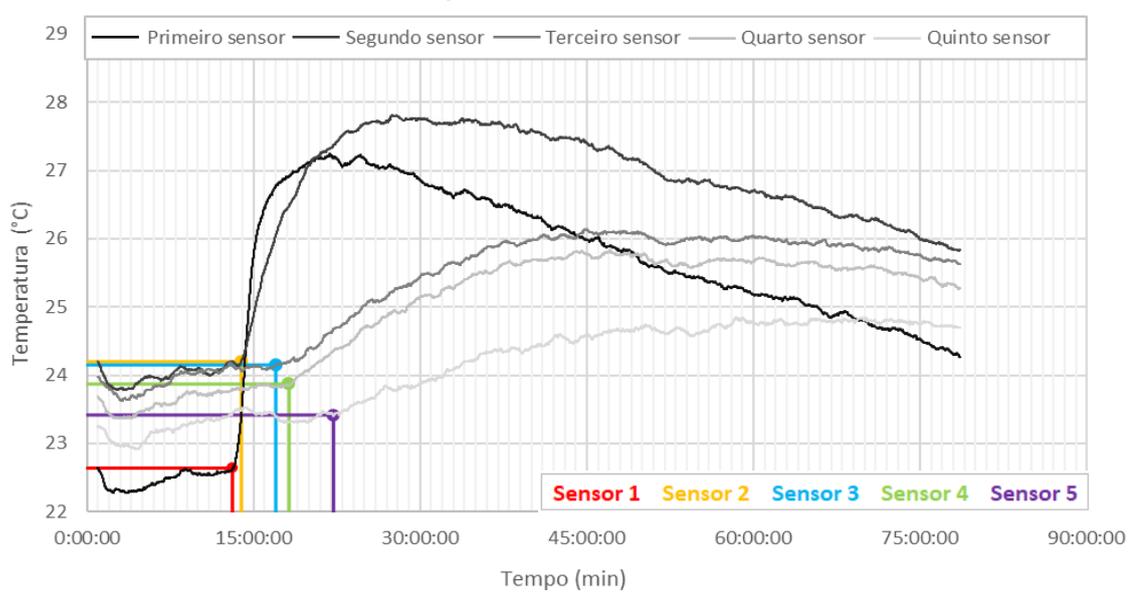
Ensaio 3 - Temperatura - 14,04% de umidade



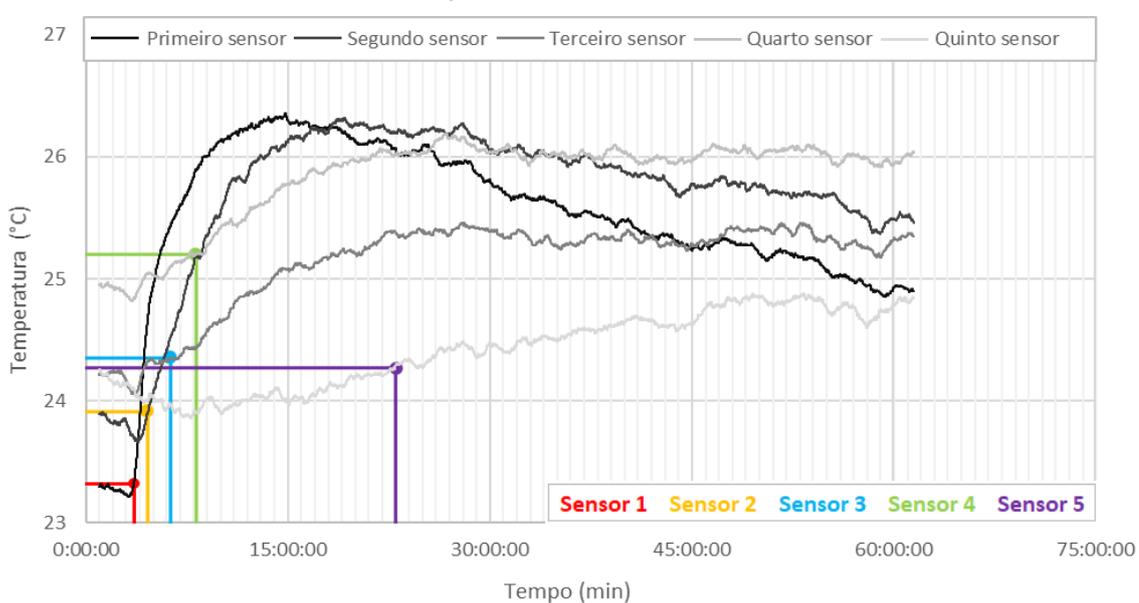
## Ensaio 4 - Temperatura - 10,44% de umidade



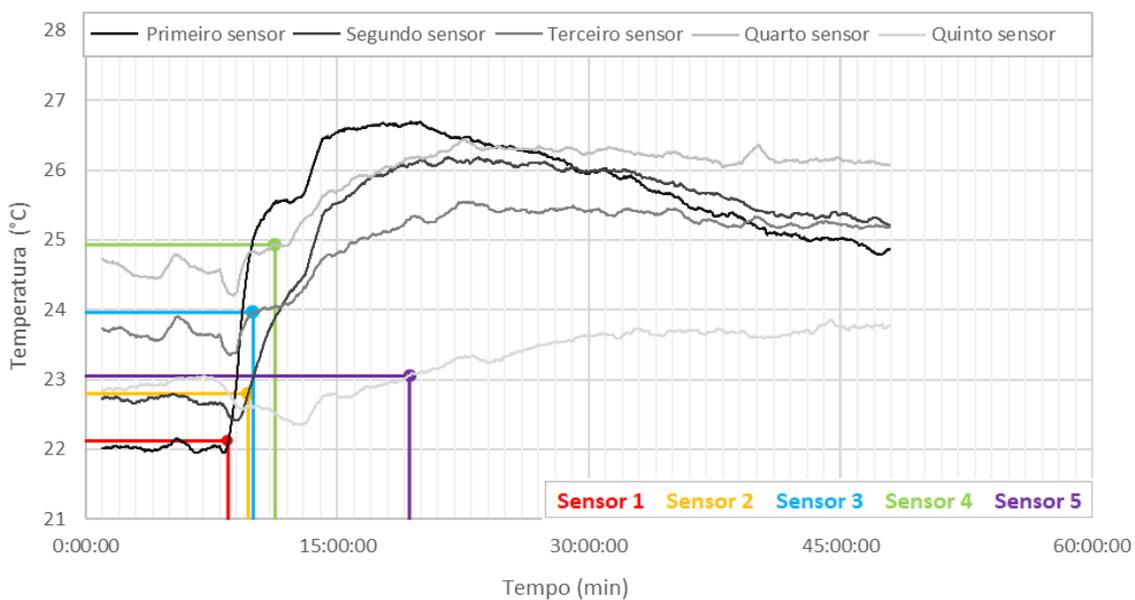
## Ensaio 5 - Temperatura - 11,10% de umidade



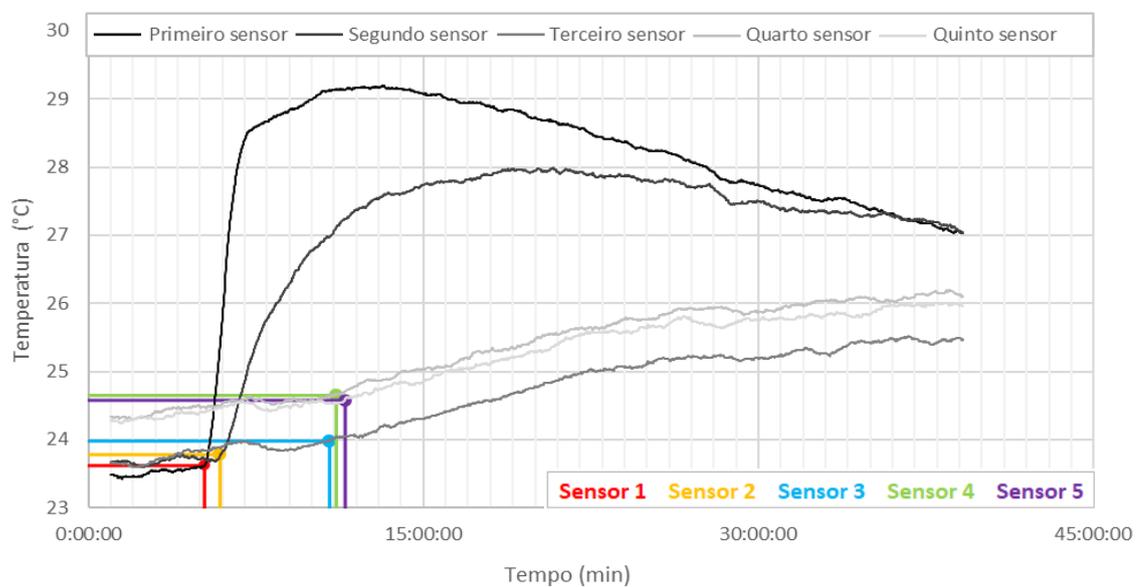
## Ensaio 6 - Temperatura - 10,62% de umidade



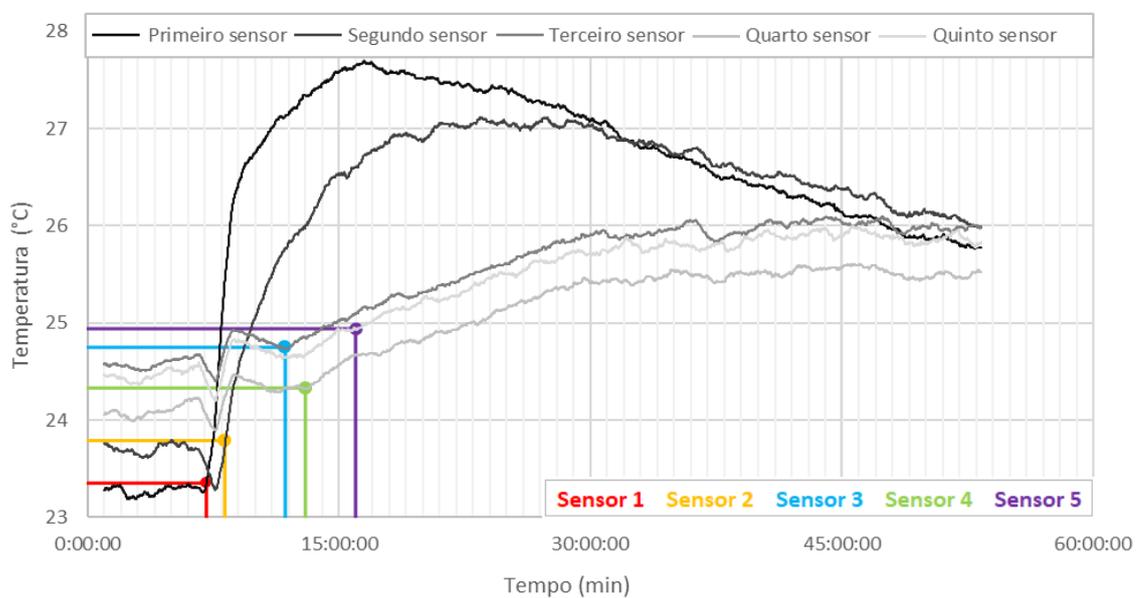
Ensaio 7 - Temperatura - 8,27% de umidade



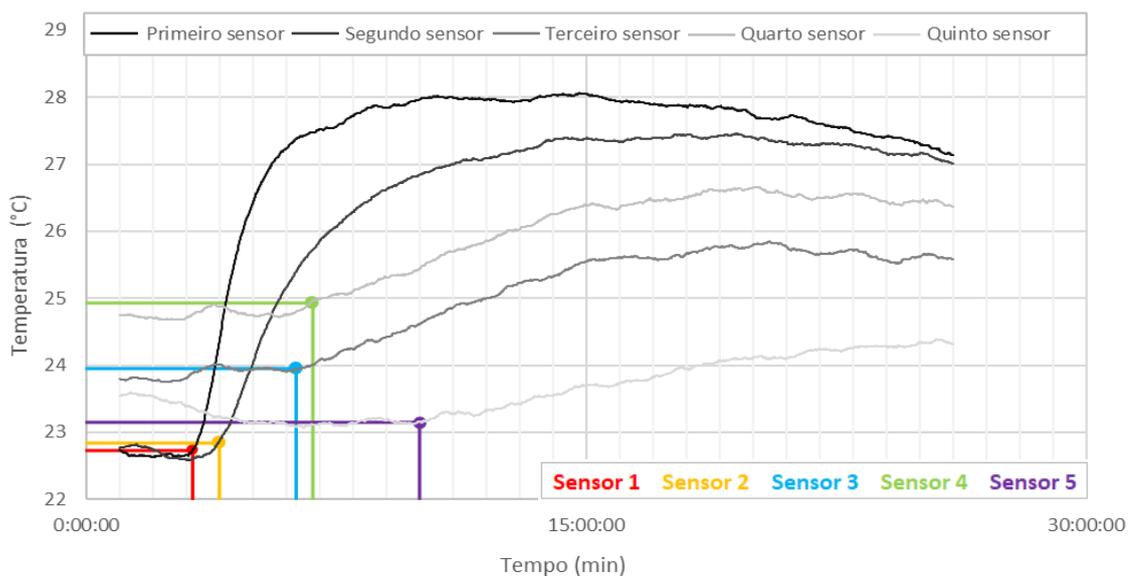
Ensaio 8 - Temperatura - 9,12% de umidade



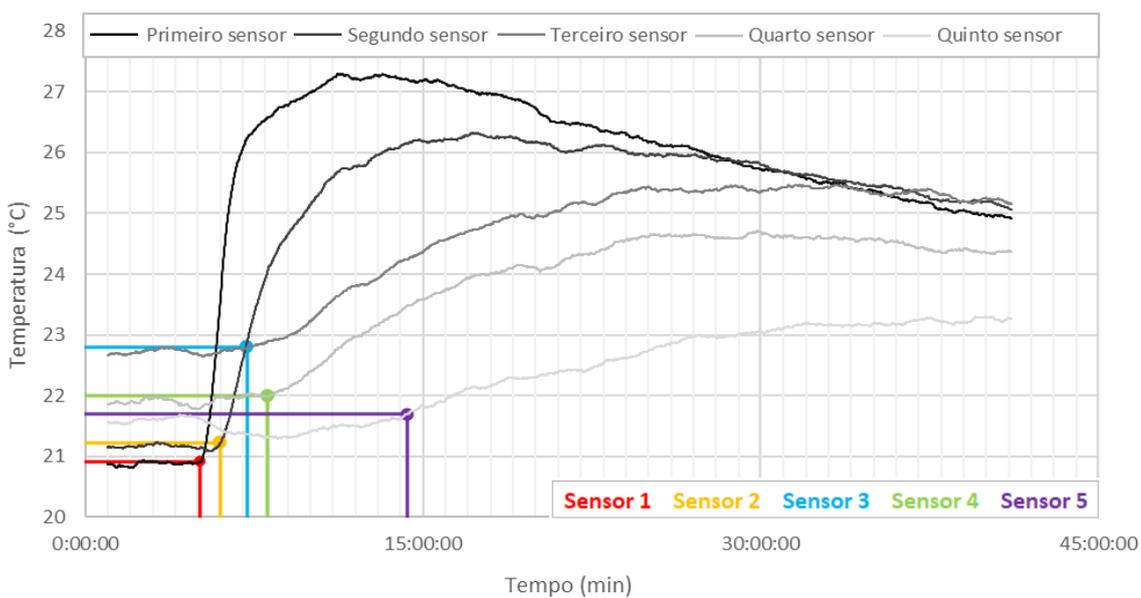
Ensaio 9 - Temperatura - 8,62% de umidade



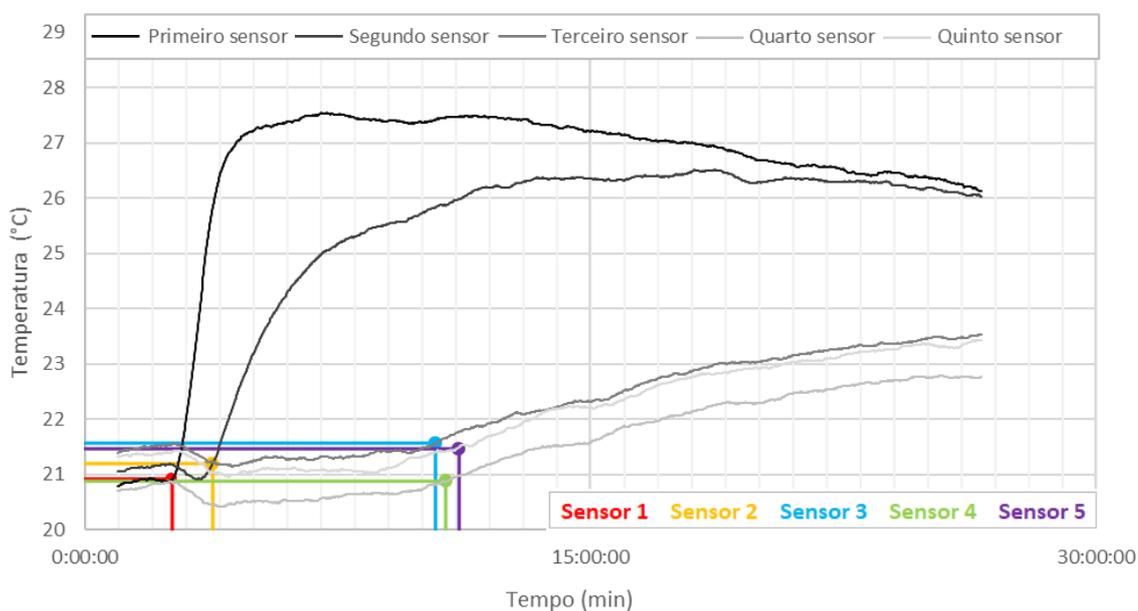
Ensaio 10 - Temperatura - 5,22% de umidade



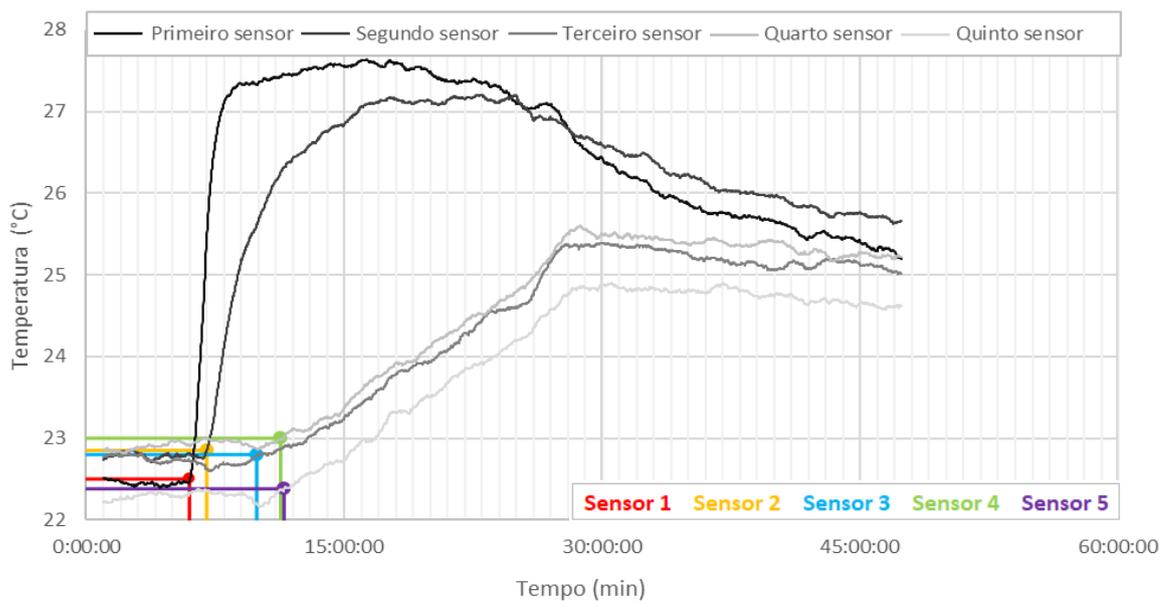
Ensaio 11 - Temperatura - 4,36% de umidade



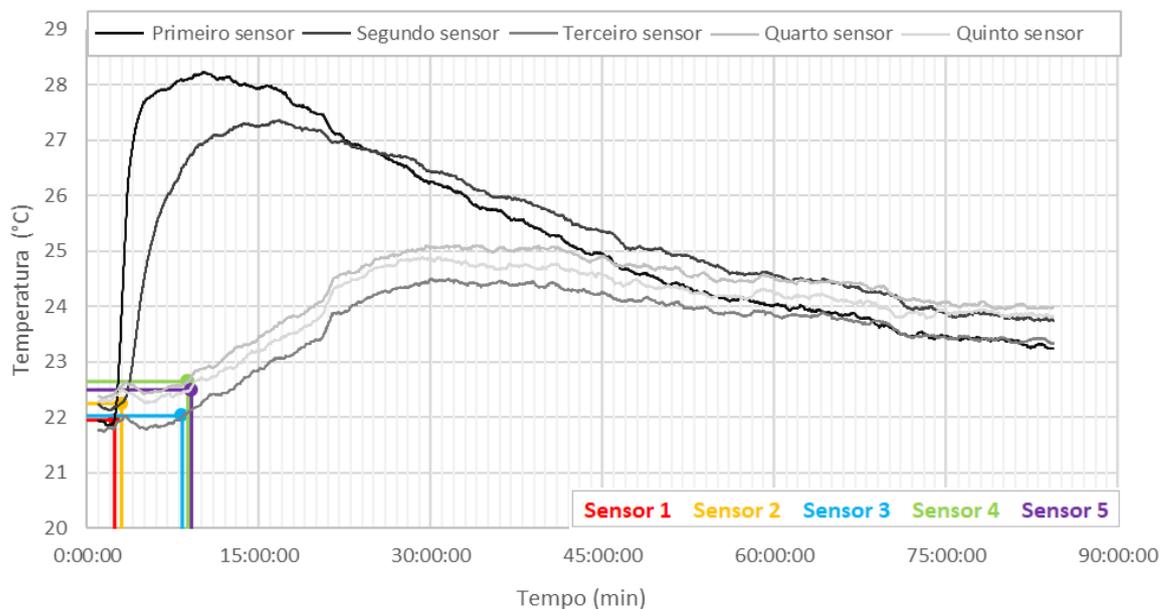
Ensaio 12 - Temperatura - 4,74% de umidade



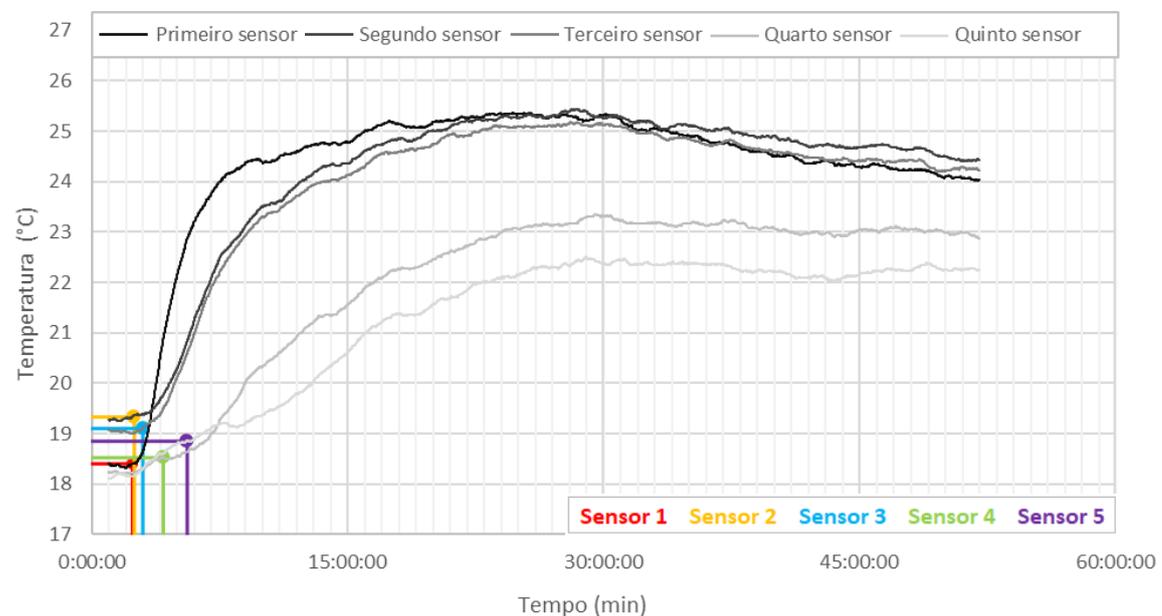
Ensaio 13 - Temperatura - 1,86% de umidade



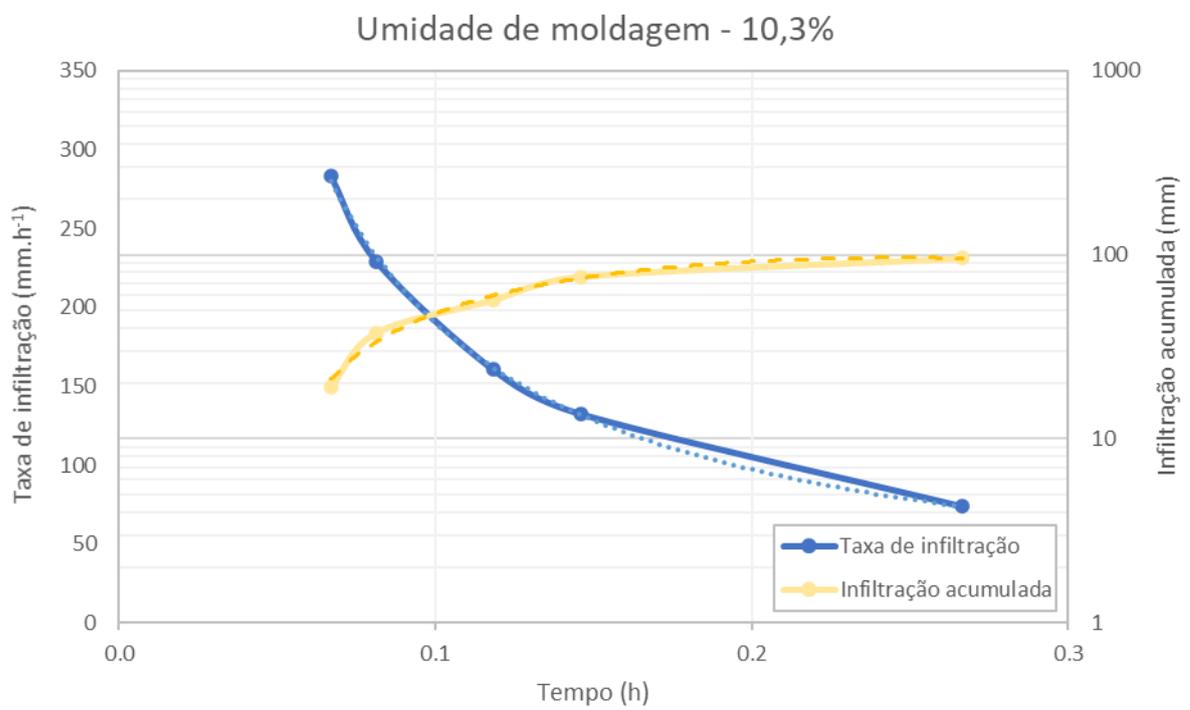
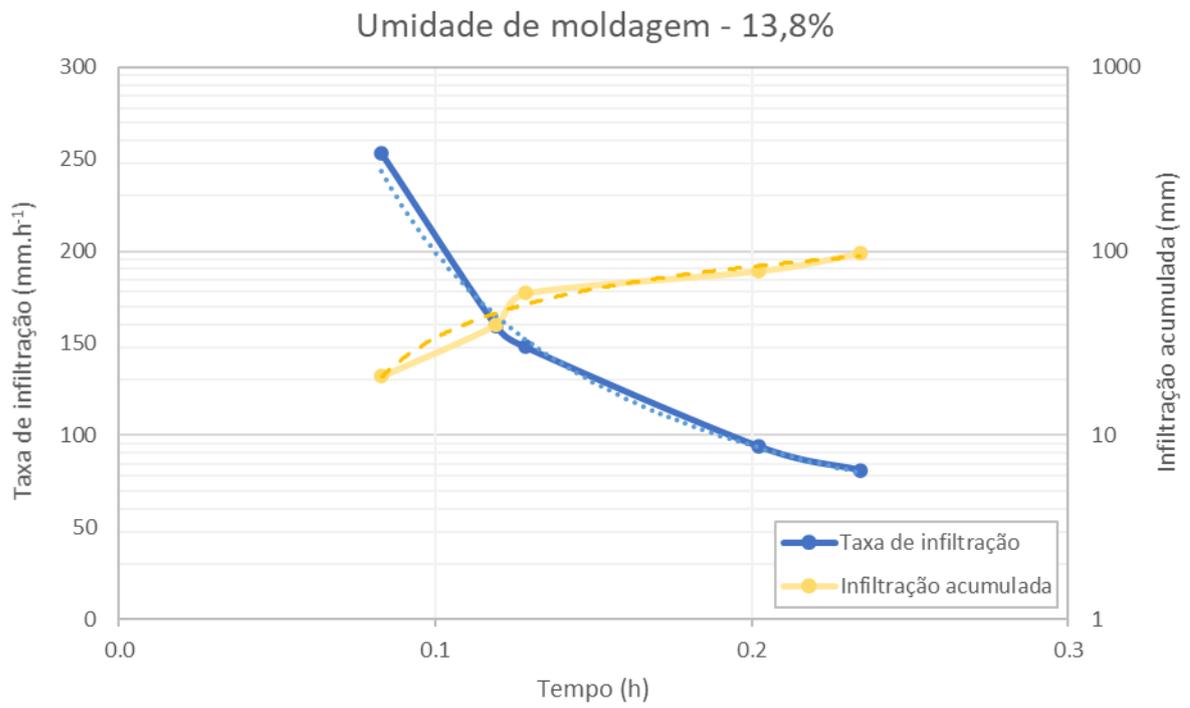
Ensaio 14 - Temperatura - 1,87% de umidade

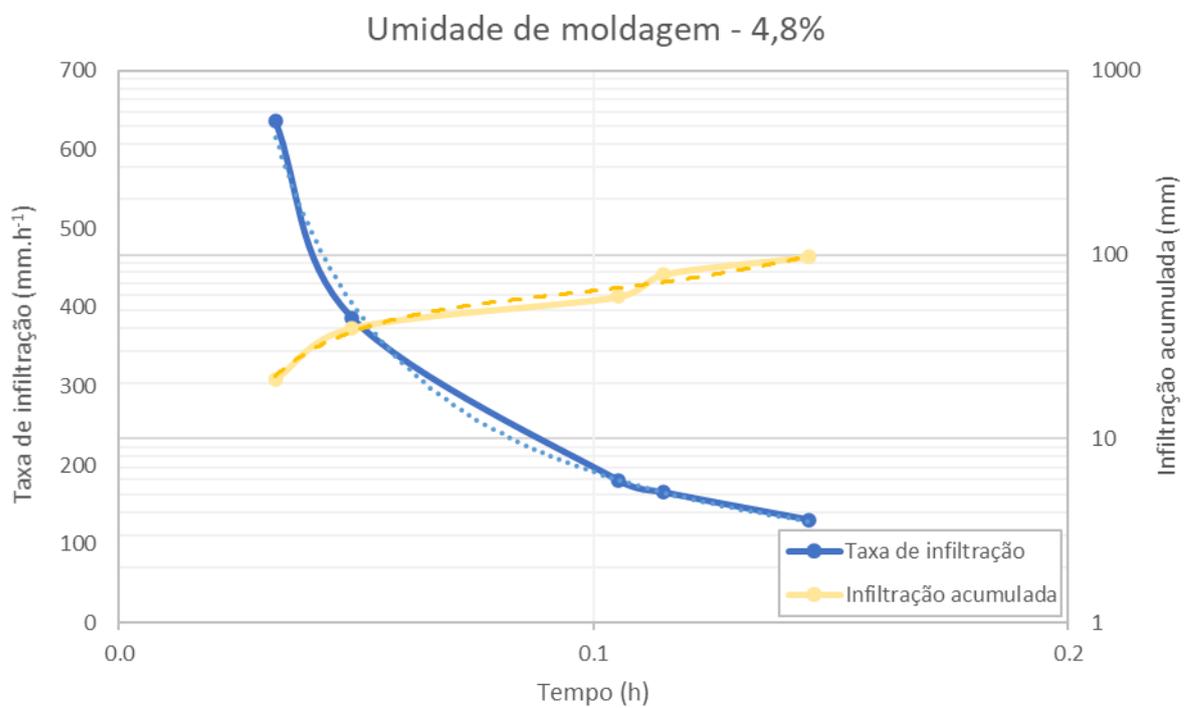
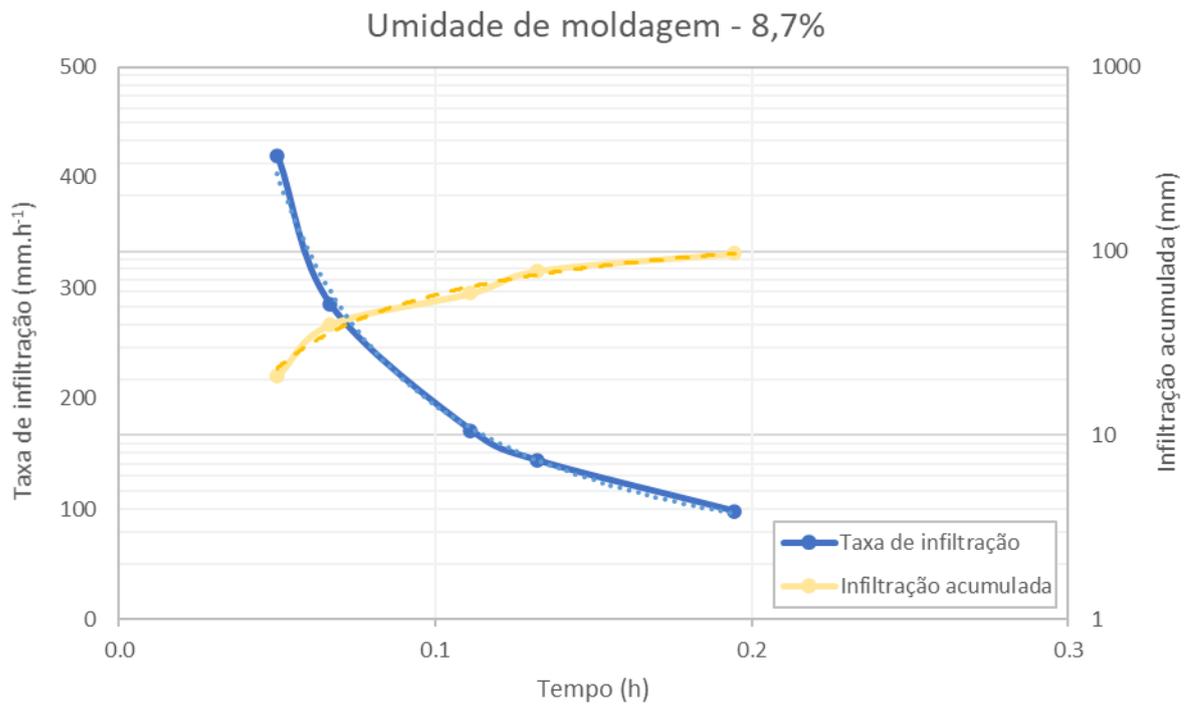


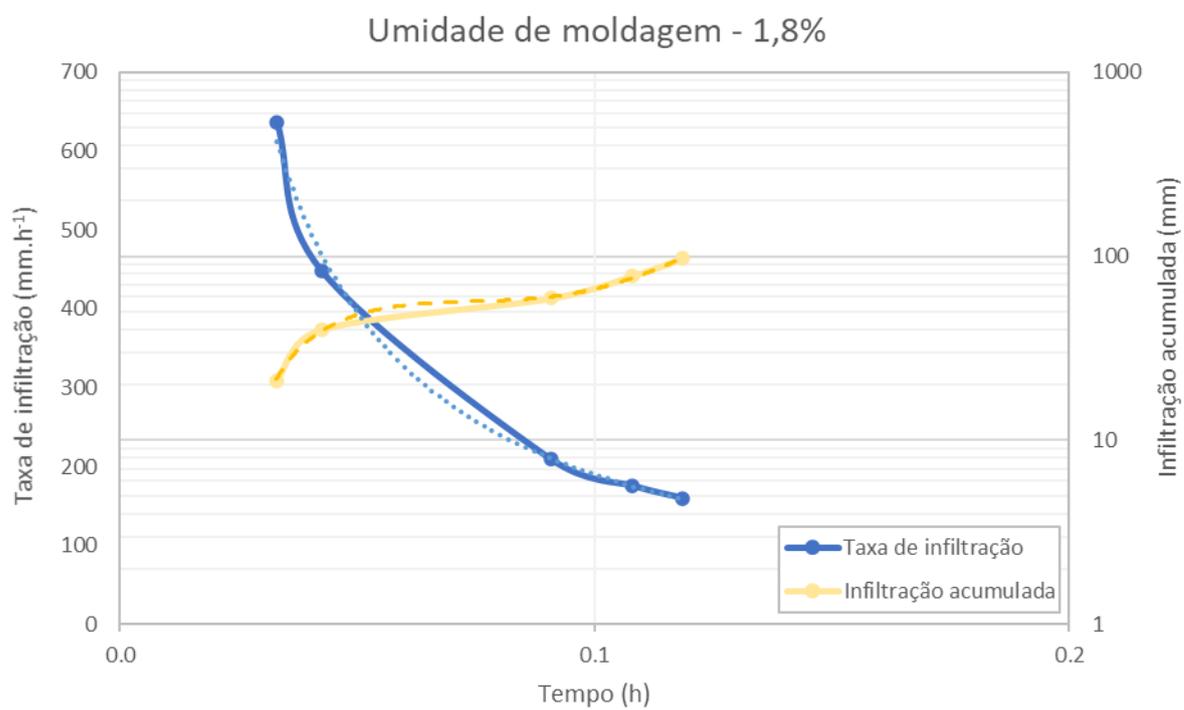
Ensaio 15 - Temperatura - 1,63% de umidade



**APÊNDICE B** - Gráficos de infiltração acumulada por tempo e taxa de infiltração por tempo para as diferentes unidades de moldagem

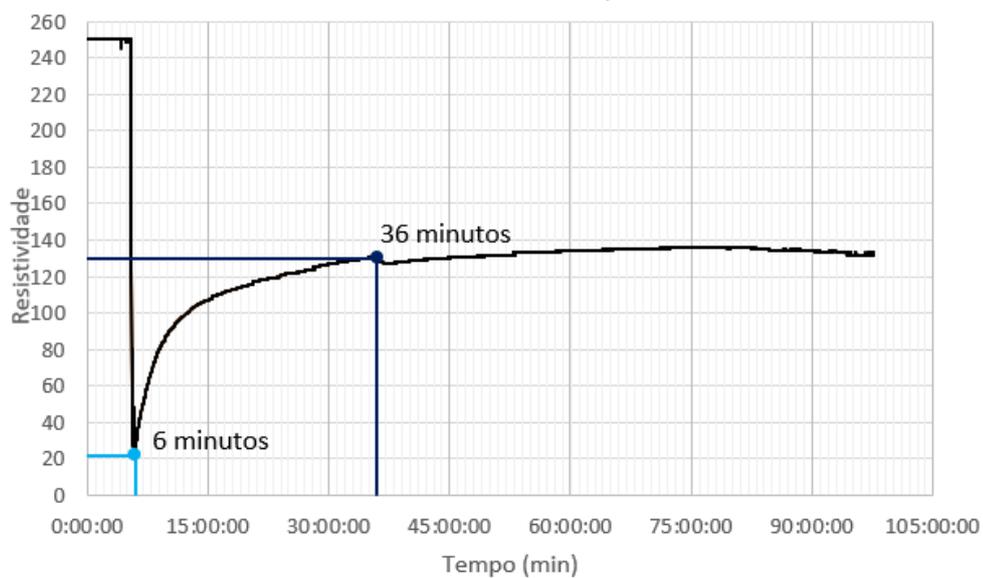




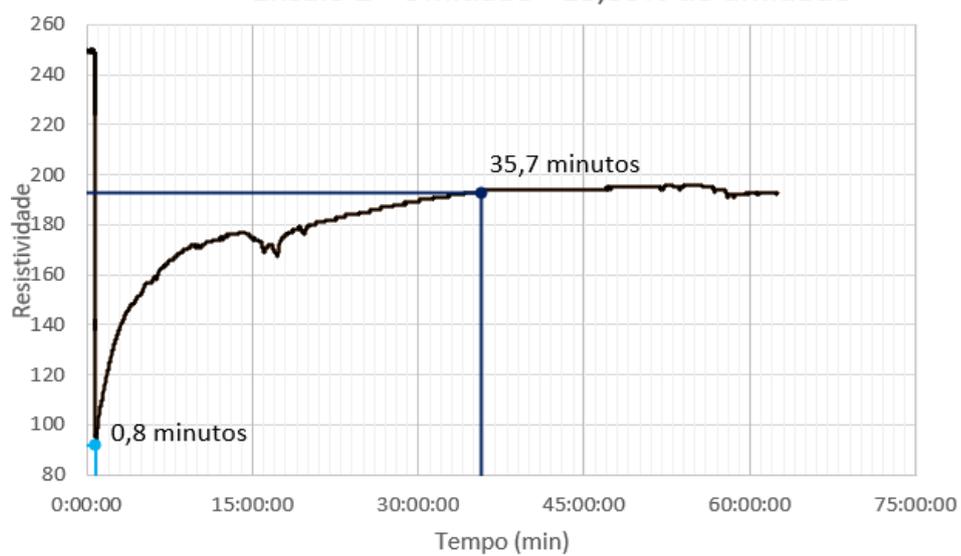


**APÊNDICE C - Gráficos dos sensores de capacitância (FDR)**

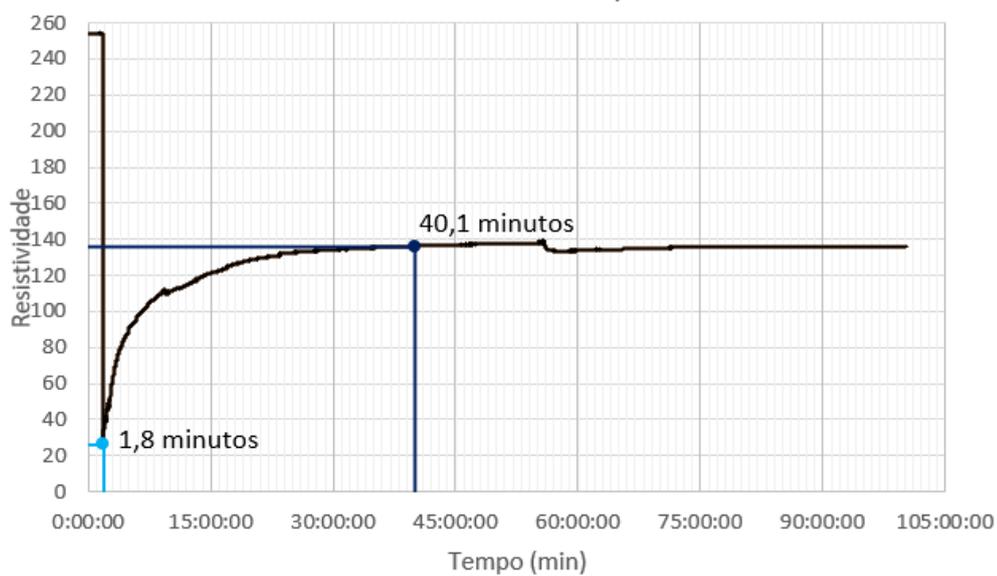
Ensaio 1 - Umidade - 13,95% de umidade



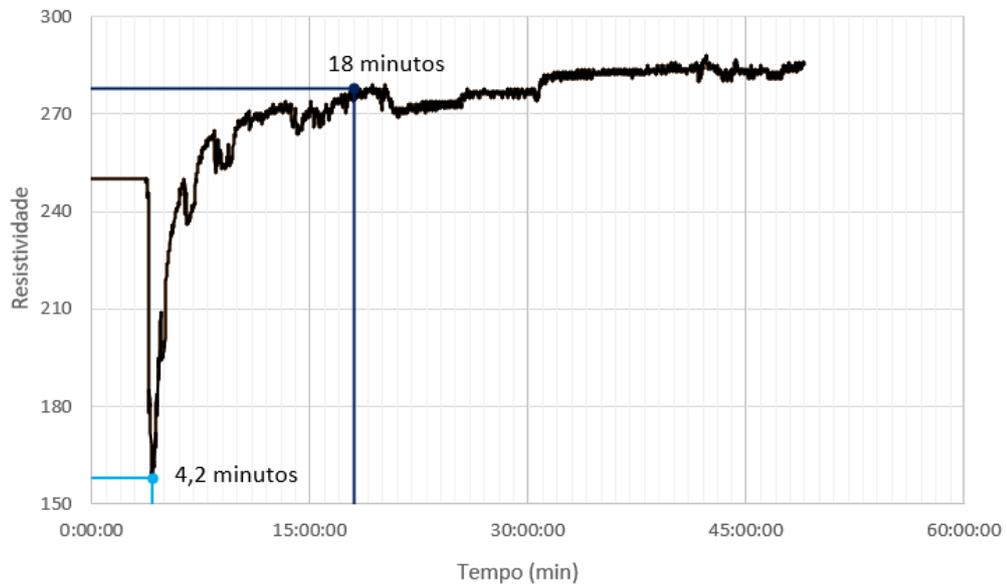
Ensaio 2 - Umidade - 13,39% de umidade



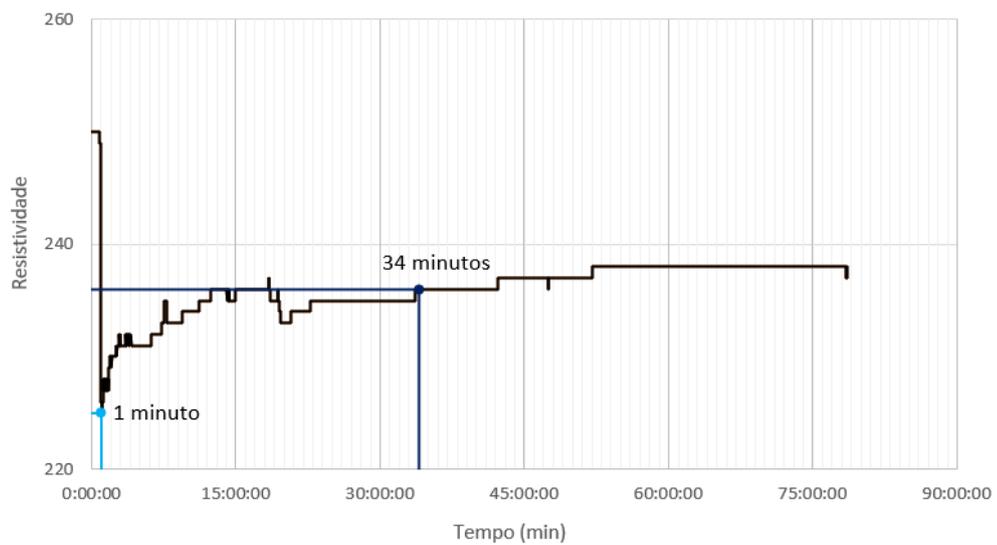
Ensaio 3 - Umidade - 14,04% de umidade



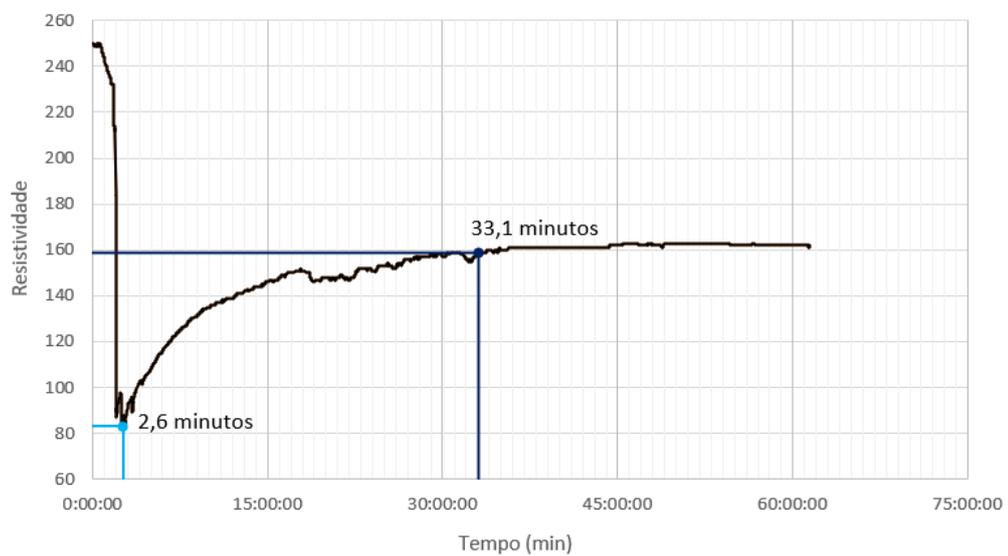
Ensaio 4 - Umidade - 10,44% de umidade



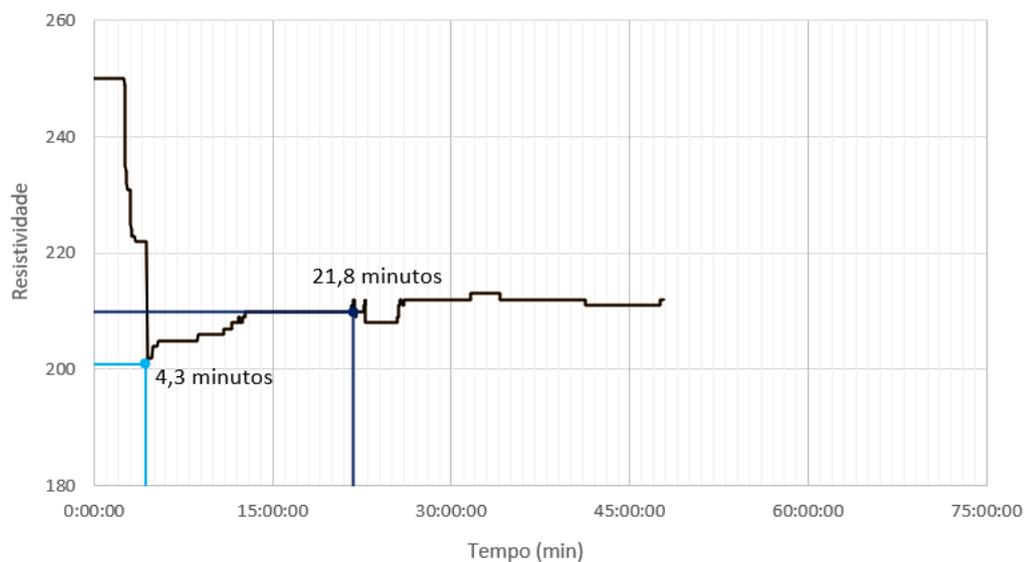
Ensaio 5 - Umidade - 11,10% de umidade



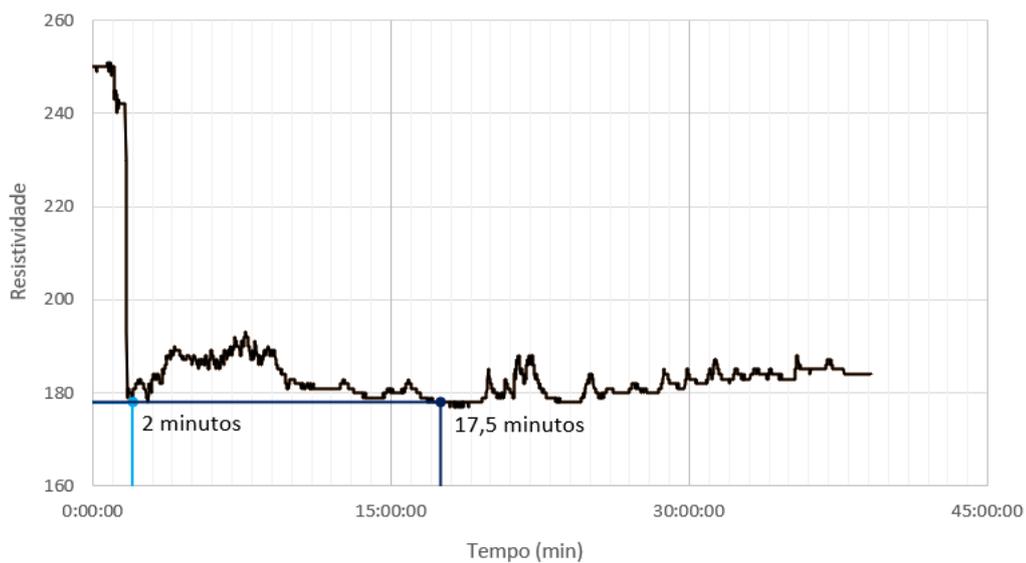
Ensaio 6 - Umidade - 10,62% de umidade



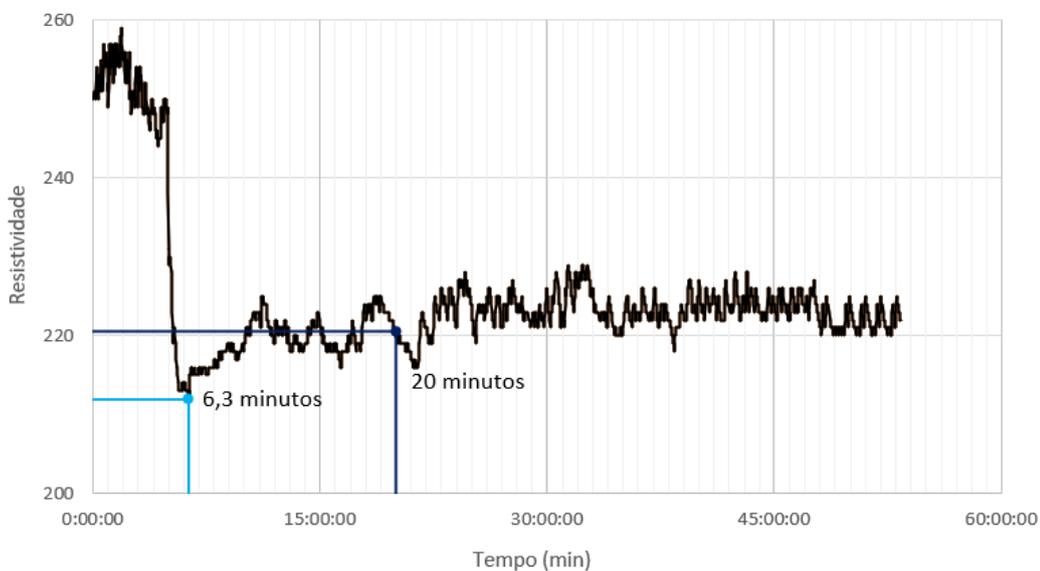
Ensaio 7 - Umidade - 8,27% de umidade



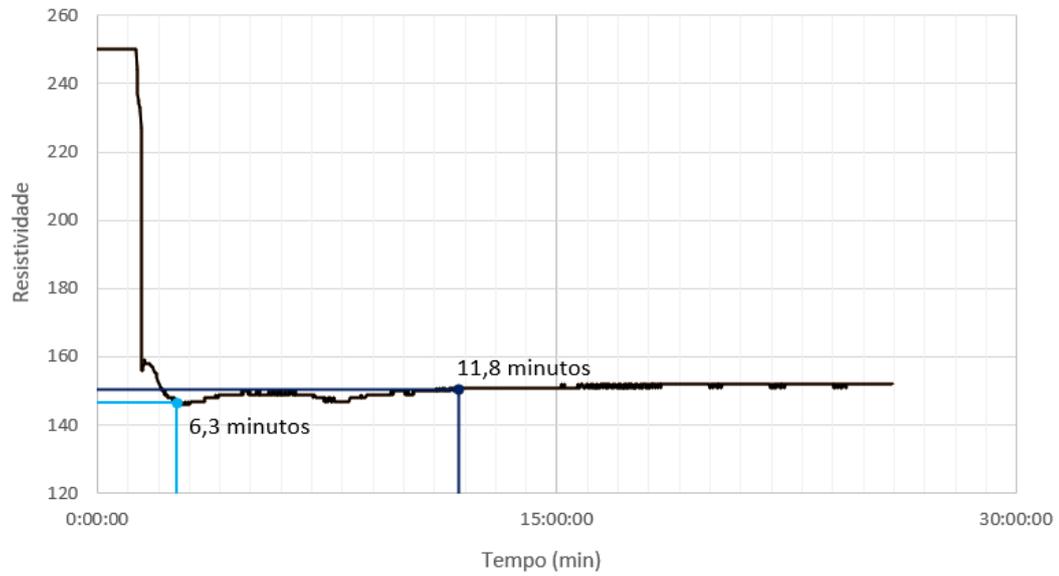
Ensaio 8 - Umidade - 9,12% de umidade



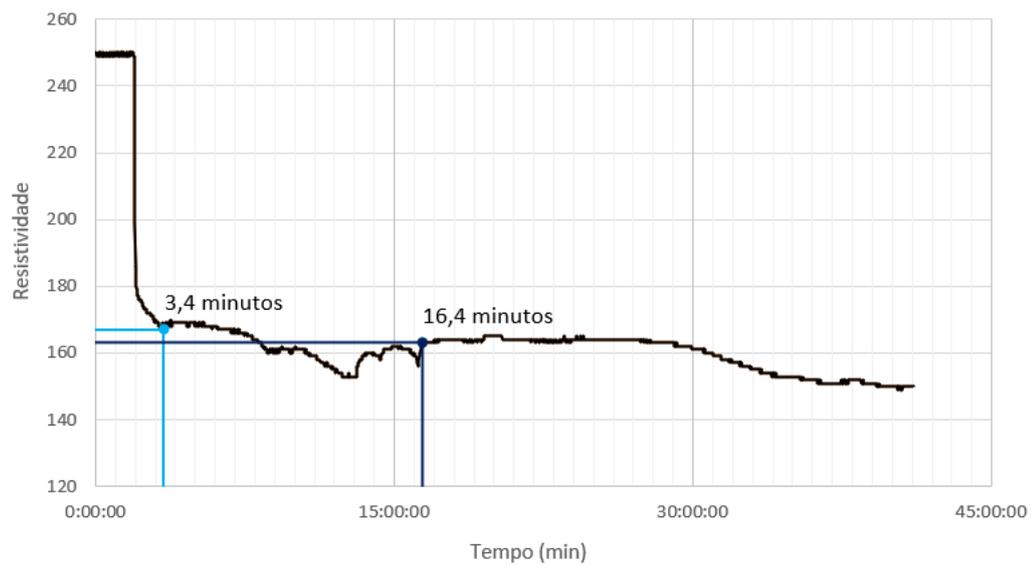
Ensaio 9 - Umidade - 8,62% de umidade



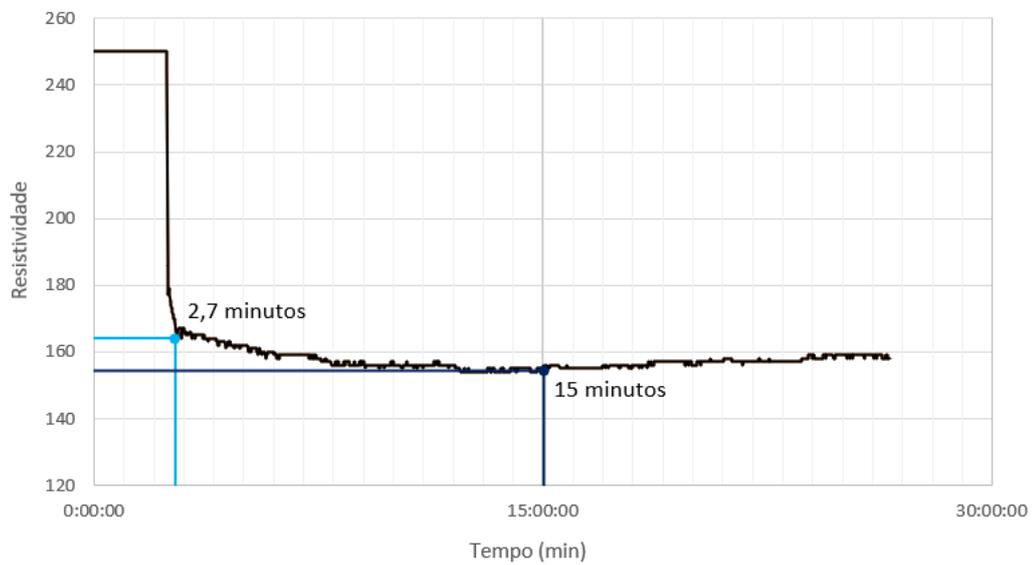
Ensaio 10 - Umidade - 5,22% de umidade



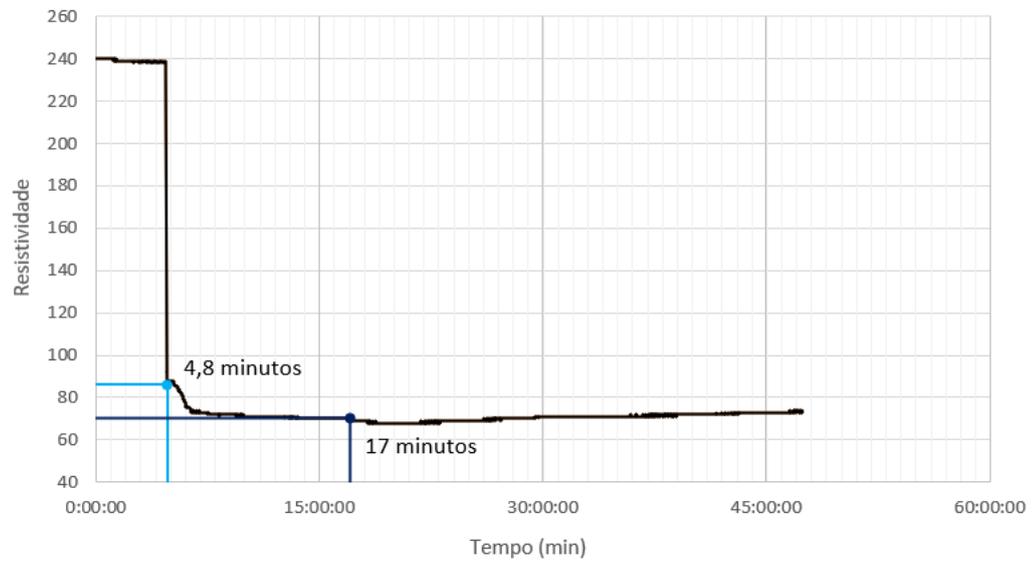
Ensaio 11 - Umidade - 4,36% de umidade



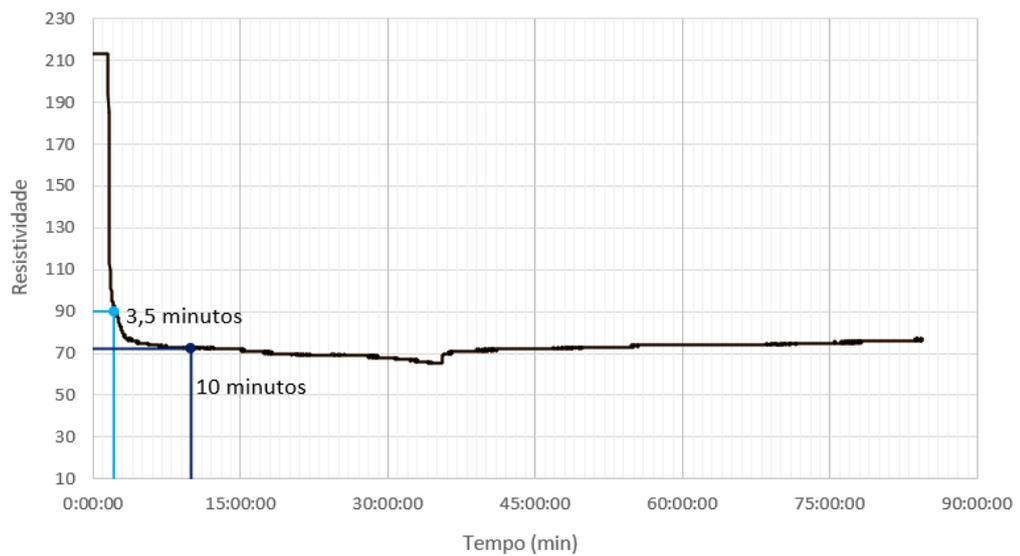
Ensaio 12 - Umidade - 4,74% de umidade



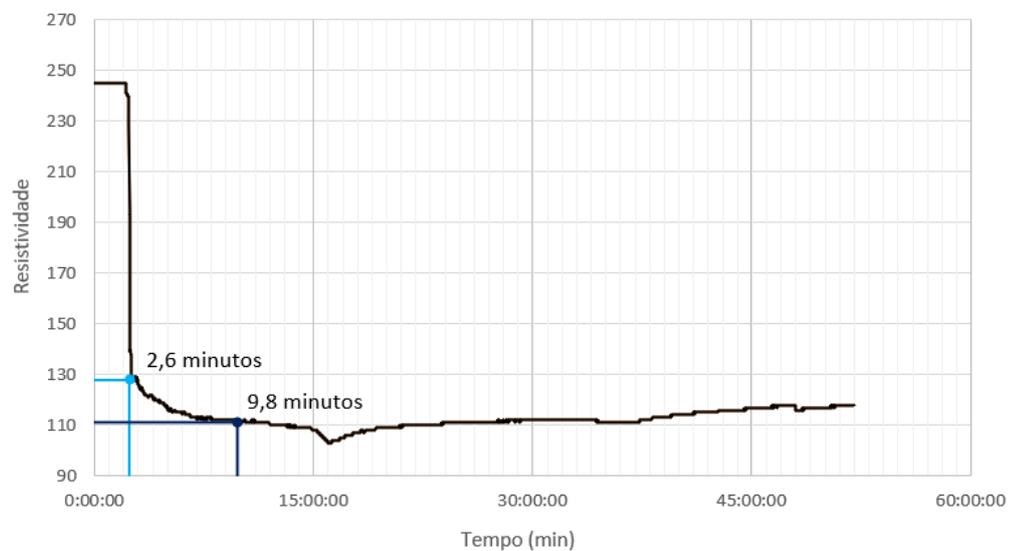
Ensaio 13 - Umidade - 1,86% de umidade



Ensaio 14 - Umidade - 1,87% de umidade



Ensaio 15 - Umidade - 1,63% de umidade



**APÊNDICE D - Tabela de custos para a produção da ponta de prova**

<b>Materiais</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo</b>
ESP 8266	1	R\$ 54,98
Fita isolante	2	R\$ 24,00
Percloroeto líquido	1	R\$ 17,10
LM 7805	3	R\$ 3,46
Capacitor 10UF/16V	4	R\$ 0,60
Capacitor 100UF/16V	4	R\$ 1,00
Resistor 1/4w	30	R\$ 2,10
CD4050	3	R\$ 4,41
SN 74HC4052	3	R\$ 5,34
SN 74HC4051	7	R\$ 21,49
Transistor BC547	20	R\$ 3,00
Capacitor cerâmico 100k/50V	4	R\$ 0,40
Capacitor poliéster metalizado	4	R\$ 3,57
Broca de aço 1,00 mm	1	R\$ 4,25
Mini módulo PCI 1X40	10	R\$ 24,95
Barra de pino 1x40 180 graus	5	R\$ 4,54
CD4017	3	R\$ 3,89
Placa fibra de vidro dupla 20x20	1	R\$ 20,00
Silicone	1	R\$ 49,52
Resina epóxi + endurecedor	1	R\$ 79,90
ULN2001	3	R\$ 10,50
ULN2003	6	R\$ 9,08
Resistor mini CR16 10k	100	R\$ 3,50
Soquete 16 pinos CELIS SPTO CB08	8	R\$ 24,80
CD4051	5	R\$ 7,50
Soquete 16 pinos estampado	5	R\$ 2,11
Jumper	5	R\$ 1,00
Jack J-4 2,5 mm	2	R\$ 1,44
Jack J-4 2,1 mm	1	R\$ 1,50
Termopares	5	R\$ 245,00
Placa Arduino Uno R3	1	R\$ 84,90
<b>TOTAL:</b>		<b>R\$ 719,83</b>