



# **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

## **PROJETO DE EQUIPAMENTO PARA TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA E MÉTODO DE ANÁLISE DE RESULTADOS**

Por  
**Eduardo Alves do Prado Reis**

**Brasília, 30 de Novembro de 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# PROJETO DE EQUIPAMENTO PARA TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA E MÉTODO DE ANÁLISE DE RESULTADOS

POR

**Eduardo Alves do Prado Reis**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

### **Banca Examinadora**

Prof. Dr. João Dias Pimenta, UnB/ ENM (Orientador)

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Antônio César Pinho Brasil Júnior, UnB/  
ENM

\_\_\_\_\_

Prof. Dra. Cláudia Naves David Amorim, UnB/ FAU

\_\_\_\_\_

Brasília, 30 de Novembro de 2017

### **Dedicatória**

*Dedico este trabalho a todos os estudantes de engenharia e futuros engenheiros que se preocupam com o futuro. Àqueles que não se contentam apenas em fazer parte da cadeia produtiva, mas desejam ser instrumentos de mudança, com foco na sustentabilidade.*

*Eduardo Alves do Prado Reis*

## **Agradecimentos**

*Agradeço, primeiramente, à minha família, que me proporcionou as condições necessárias para cursar engenharia mecânica nesta universidade.*

*Agradeço, à minha companheira, que foi fundamental na realização deste trabalho, a todos meus amigos e a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, me apoiaram durante todo o curso e o processo de produção deste trabalho.*

*Agradeço, especialmente, aos amigos e colegas de Baja, da equipe Piratas do Cerrados, que me ajudaram em momentos decisivos do curso, dos estudos às necessidades pessoais.*

*Eduardo Alves do Prado Reis*

---

## RESUMO

Este trabalho apresenta um ensaio que identifica faixas de temperatura do solo e capacidade de transferência de calor no aproveitamento de energia geotérmica para sistemas de climatização de ambiente. A aplicação mais comum é por meio das bombas de calor acopladas ao solo, bastante difundidas mundialmente, com destaque para os países em que o consumo de energia elétrica é acentuado devido ao uso de aquecedores. Para dimensionar esses sistemas, é necessário encontrar as faixas de temperatura do solo e sua capacidade de realizar trocas de calor, mas ainda faltam estudos sobre as propriedades do solo brasileiro para esse fim. Foi escolhido para análise o método Thermal Response Test, que apesar de encontrar apenas um ensaio realizado no país, é o mais difundido em escala global, aplicado desde 1995. O objetivo é que este material, que conta com um projeto de equipamento, auxilie no mapeamento geotérmico brasileiro a fim de criar soluções de aproveitamento da energia térmica do solo.

**Palavras-chaves:** Energia Geotérmica, Bombas de Calor Acopladas ao Solo, Teste de Resposta Térmica - TRT

---

## ABSTRACT

This project presents an experiment that identifies ground temperature strips and the capacity of heat transference on the use of geothermal energy for ambience climate control systems. The most common application is by ground source heat pumps, largely spread worldwide, specially in countries where energy consumption is high due to the use of heaters. To dimension these systems is required to find the ground temperature strips and its capacity to make heat exchange, but there is still a lack of researches about the brazilian ground attributes to this purpose. It was choosen for analysis the Thermal Response Test method, which despite of being used just once in Brazil is the most disseminated method in global scale, put into practice since 1995. The aim of this paper, which contains an equipment project, is that this material can help the brazilian geothermal mapping in order to create solutions for ground thermal energy improvement.

**Key-words:** Geothermal Energy, Ground Source Heat Pump, Thermal Response Test - TRT

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA .....	11
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
1.3 OBJETIVOS .....	13
1.4 METODOLOGIA .....	14
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2 SISTEMAS GEOTÉRMICOS</b> .....	<b>16</b>
2.1 ENERGIA GEOTÉRMICA E APLICAÇÕES .....	16
2.2 BOMBAS DE CALOR ACOPLADAS AO SOLO .....	22
2.2.1 Vantagens e desvantagens .....	25
2.2.2 Instalação em estacas de fundação .....	26
2.3 APLICAÇÃO NO MUNDO .....	27
2.4 BOMBAS DE CALOR ACOPLADAS AO SOLO NO BRASIL .....	29
<b>3 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR</b> .....	<b>31</b>
3.1 CONDUÇÃO DE CALOR PERMANENTE UNIDIRECIONAL .....	31
3.2 CONVECÇÃO DE CALOR .....	33
<b>4 TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA</b> .....	<b>35</b>
4.1 HISTÓRIA .....	35
4.2 ENSAIO TRT .....	36
4.3 PROCEDIMENTOS .....	40
<b>5 ANÁLISE TEÓRICA DO PROBLEMA</b> .....	<b>44</b>
5.1 TEOREMA DA FONTE LINEAR .....	45
5.2 ALGORITMO DESENVOLVIDO .....	47
5.3 RESULTADOS DO ALGORITMO .....	48
<b>6 PROJETO DO APARATO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>50</b>
6.1 SELEÇÃO DA BOMBA .....	51
6.2 DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DA ESTACA .....	53
6.3 SELEÇÃO DO RESERVATÓRIO E AQUECEDOR .....	55
6.4 SELEÇÃO DO CONTROLE DE VAZÃO .....	56
6.5 SELEÇÃO DE DISPOSITIVOS CONTRA VAZAMENTOS .....	56
6.6 SELEÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS .....	57
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>61</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comportamento da temperatura do subsolo (BANDEIRA, 2015 apud BRANDL, 2006).....	17
Figura 2.2 - Ciclo aberto. (Fonte: Wasser Warmepumpen) .....	19
Figura 2.3 - Ciclo fechado horizontal. (Fonte: Wasser Warmepumpen) .....	19
Figura 2.4 - Ciclo fechado vertical. (Fonte: Wasser Warmepumpen) .....	20
Figura 2.5 - Bomba de calor geotérmica (Fonte: Verano Instalaciones).....	23
Figura 2.6 - Estaca trocadora de calor na função de dissipador de calor em a), e absorvedor de calor em b) (GEHLIN, 2002) .....	24
Figura 2.7 - Aplicação de estaca na fundação (Fonte: Pompe à chaleur géothermique) .....	27
Figura 2.8 - Número de estacas trocadoras de calor na Áustria até 2004 (BANDEIRA, 2015 apud BRANDL, 2006) .....	28
Figura 2.9 - Porcentagem de distribuição de aproveitamento de energia geotérmica mundial (TAVARES, 2011).....	28
Figura 3.1 - Pontos nodais e elementos de volume utilizados na formulação de condução de calor, (Çengel, 2012). .....	31
Figura 4.1 - Tubo estabilizador do furo (GEHLIN, 2002) .....	36
Figura 5.1 - Gráfico em relação ao tempo de experimento TRT de exemplo apresentado na norma (BANDEIRA apud CEN/TC 341 N525, 2015) .....	44

## **LISTA DE TABELAS**

2.1	Propriedades térmicas de tipos de solo (BANDEIRA, 2015).....	11
6.1	Perdas de cargas na tubulação. ....	46
6.2	Lista de materiais e equipamentos selecionados .....	48

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

A	Área	[m <sup>2</sup> ]
a	Aceleração de um elemento fluido	[m/s <sup>2</sup> ]
C <sub>p</sub>	Calor específico à pressão constante	[kJ/kg.K]
D	Diâmetro	[mm]
E,q	Taxa de calor	[W/m]
F	Força	[N]
f	Fator de atrito	
H	Perda de carga	[m]
h	Profundidade da estaca	[m]
L	Soma da perda de carga	[m]
P	Potência	[W]
p	Pressão	[N/m <sup>2</sup> ]
Q	Vazão volumétrica	[l/s]
$\dot{Q}$	Taxa de condução de calor	[W/s]
R	Resistência térmica	[mK/W]
r	Raio	[mm]
T	Temperatura	[°C]
U	Velocidade de atrito do fluido	[m/s]
v	Velocidade do fluido	[m/s]

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\delta$	Massa de um elemento fluido	[g]
$\lambda$	Condutividade térmica	[W/mK]
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Densidade volumétrica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	Taxa de cisalhamento	[N/m <sup>2</sup> ]
$\mu$	Coefficiente de viscosidade dinâmica	
$\pi$	Número de pi	
$\gamma$	Número de Euler	
$\varepsilon$	Rugosidade	
$\eta$	Eficiência	

## Grupos Adimensionais

Rey Número de Reynolds

## Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineers
COP	Coefficiente de Desempenho
DOE	Department of Energy
ECES	Energy Conservation through Energy Storage
GCHP	Ground Coupled Heat Pump

GSHP	Ground Source Heat Pump
GWHP	Ground Water Heat Pump
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
NREL	National Renewable Energy Laboratory
SWHP	Surface Water Heat Pump
TRT	Thermal Response Test
AWG	America Wire Gauge

# 1 INTRODUÇÃO

*Este capítulo apresenta a importância da utilização de sistemas geotérmicos no Brasil e também apresenta considerações sobre os trabalhos que já foram feitos no mundo com a utilização do solo como fonte de energia sustentável.*

## 1.1 TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA

Problemas relacionados à insuficiência energética são discutidos com frequência nas universidades, e há uma tendência de aumento na procura por soluções sustentáveis de aproveitamento energético em praticamente todas as áreas do conhecimento, já que muitos recursos são finitos. Dentre as várias fontes estudadas para esse fim, está a potencialidade de utilização de energia térmica existente na Terra, que já é aplicada em diversos países do mundo. Ainda pouco discutida no Brasil, é necessário ampliar a quantidade de informações sobre a geotermia do solo brasileiro.

Atualmente, o país tem uma grande matriz energética sustentável, que é alimentada por hidrelétricas. Porém, observando as tendências mundiais e prevendo o aumento do consumo energético ao longo dos anos, conclui-se que é preciso descentralizar as fontes de energia.

Existem diferentes formas de se aproveitar energia na natureza, algumas delas sem a necessidade de queima de combustíveis. Dentre essas, a energia solar fotovoltaica e a eólica são exemplos de aplicação real no Brasil. Vale observar que, mesmo entre as fontes sustentáveis, existem problemas intrínsecos à utilização. Uma planta de energia fotovoltaica, por exemplo, não tem produção no período noturno; no caso de plantas eólicas, também existe sazonalidade durante o dia, associada ao vento e por isso a importância da diversificação de fontes.

Já no caso da energia geotérmica existe uma vantagem sobre as anteriores, que é a constância encontrada quando se propõe utilizar o solo como fonte e/ou dissipador de calor, sendo possível ter taxas de troca de calor estáveis durante todo o tempo. Portanto, ao optar por diversificar as fontes de energia, considerar a inércia térmica do solo pode oferecer estabilidade da oferta energética no Brasil.

Buscando formas de utilizar propriedades térmicas do solo para diminuir o consumo de energia elétrica, encontram-se métodos que alimentam sistemas de climatização residencial e predial. Esses sistemas já são conhecidos e aplicados desde a década de 1990 em diversas situações, inclusive utilizando a inércia térmica do solo como fonte e dissipador em um

mesmo equipamento ao longo do ano. Assumindo esse fato, durante a pesquisa na literatura brasileira, foi constatado que as informações sobre esse tipo de sistema são quase inexistentes, o que é um grande desperdício considerando a existência desse potencial energético disponível em toda a extensão territorial.

Portanto, esse trabalho busca unir os estudos realizados no mundo para que, em um futuro próximo, essa mesma tecnologia possa ser desenvolvida observando as particularidades do solo brasileiro e, assim, atender à demanda local. Para isso, é fundamental saber medir e analisar a temperatura em função de profundidade e o comportamento da transferência de calor do subsolo, para que seja possível o correto dimensionamento desses sistemas de climatização.

## **1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Vários trabalhos acerca de energia geotérmica e aplicações são encontrados no mundo. De acordo com o estudo de viabilidade de utilização do uso de energia geotérmica no Brasil, Arboit (et al, 2013) citam uma série de aplicações para o potencial geotérmico brasileiro, que abrangem diversos fins diretos, como o aproveitamento no mercado e inclusive aplicação para o turismo e lazer em águas termais. Ainda de acordo com Arboit (et al, 2013), no Brasil, mesmo apresentando um grande atraso quanto à utilização de energia geotérmica em relação a outros países, ainda é possível encontrar situações isoladas de utilização do potencial geotérmico para aplicações industriais, principalmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Ainda relacionado a estudos realizados no Brasil, Bandeira (2015) realiza um estudo prático e teórico para o início do mapeamento geotérmico brasileiro. Este trabalho contém o único ensaio de teste de resposta térmica em solo brasileiro encontrado. Realizado no Campo Experimental de Fundações da Universidade de São Paulo na cidade de São Carlos – SP. Foi construído um equipamento com a capacidade de medir a troca de calor com o solo em até 12 metros de profundidade.

Eklof e Gehlin (1996) realizam um completo estudo teórico e experimental de uma estaca trocadora de calor de 150 metros de profundidade na cidade de Estocolmo – Suécia. São analisados parâmetros térmicos do equipamento para a inclusão dos valores no problema matemático, e também é analisado a faixa superficial do solo que apresenta maiores amplitudes térmicas ao longo do dia.

Gehlin (2002) realiza outro estudo teórico trabalhando formas de aperfeiçoar os resultados encontrados em ensaio de teste de resposta térmica. Nesta tese o foco maior é no

modelo matemático de simulação computacional e depois é comparado com os resultados obtidos experimentalmente.

Mallmann (2011) realiza um estudo computacional da influência térmica de vidros em construções, este problema está diretamente relacionado com o aumento no consumo de energia elétrica para arrefecer ambientes. Então este trabalho nos fornece dados como o consumo total de energia elétrica no Brasil para este fim.

Pires (2015) apresenta um trabalho aplicado em uma edificação na cidade de Santa Maria – RS. Neste estudo é cogitado a adequação de um trocador de calor geotérmico para substituir um condensador de água de uma central de ar condicionado. A ausência de informações acerca do comportamento geotérmico brasileiro em conjunto com o custo de implantação do sistema foram fatores determinantes para a não execução deste projeto.

Tavares (2011) realiza na Universidade de Coimbra – Portugal um estudo da potencialidade de aplicação de sistemas geotérmicos em edificações em Portugal. Nesta tese também encontra-se uma visão macro da potencialidade da geotermia mundial, sendo de grande importância para projetos mais ousados que buscam a obtenção de energia elétrica.

Vilela (2004) realiza uma análise do comportamento térmico do solo para aplicação em edificações do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. Buscando profundidades de até 2 metros, construiu-se uma sonda totalmente diferente das demais encontradas na bibliografia. Nesta tese é possível encontrar valiosas informações com os resultados encontrados, porém é importante ressaltar que a baixa profundidade não nos satisfaz quando buscamos aplicar sistemas geotérmicos.

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é propor um ensaio capaz de identificar as faixas de temperatura e a capacidade de troca de calor do solo.

Para o dimensionamento de sistemas que utilizam energia geotérmica, é necessário identificar a temperatura do solo sem perturbação térmica e sua capacidade de troca de calor. Por isso, foi escolhido o ensaio de teste de resposta térmica, que, segundo instruções e equações, possibilita encontrar tais parâmetros.

O trabalho busca a elaboração do modelo matemático e do projeto do aparato experimental necessário para a obtenção desses parâmetros.

## **1.4 METODOLOGIA**

A metodologia deste trabalho consistiu-se inicialmente em fazer uma busca bibliográfica sobre a geotermia no mundo e no Brasil. Com o intuito de iniciar o mapeamento geotérmico brasileiro, é proposto o ensaio de teste de resposta térmica. Em conjunto com o teorema da fonte linear, o ensaio é capaz de fornecer dados de temperatura em cada profundidade e capacidade de dissipação de calor no solo.

Foi proposto um modelo matemático capaz de fornecer a temperatura do solo sem perturbação térmica, e também o comportamento da transferência de calor com o solo. Observando tecnologias empregadas no mundo, foi escolhido para trabalhar o teste de resposta térmica, o ensaio mais realizado atualmente quando se busca a aplicação de sistemas geotérmicos. Ele consiste na aplicação de calor à uma taxa constante no solo para adquirir dados da variação de temperatura em relação ao tempo. E utiliza-se o teorema da fonte linear para obter os resultados do comportamento geotérmico.

Para trabalhar o modelo matemático, foi utilizado o software MatLab, que produziu todos os cálculos necessários para realizar o ensaio. Também foram feitos todos os cálculos do projeto do aparato experimental com esse software.

Quanto ao projeto do aparato experimental, o software SolidWorks foi utilizado para produzir todos os desenhos técnicos e de conjunto, para melhor visualização do equipamento.

## **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

No primeiro capítulo, encontra-se o tema proposto e a motivação para a realização deste trabalho, seguido pelo breve comentário acerca de cada uma das referências bibliográficas utilizadas neste estudo.

O segundo capítulo consiste inicialmente na abordagem sobre energia geotérmica de maneira ampla. Depois, foca em mostrar a tecnologia de bombas de calor acopladas ao solo. Essa aplicação tem maior eficiência no que se refere à economia de energia elétrica, e, por isso, é mais aplicada.

No terceiro capítulo, são trabalhados os conceitos acerca de transferência de calor possíveis de serem aplicados no problema proposto. Trata-se da convecção de calor do fluido aquecido para a parede da estaca e da condução de calor entre a parede da estaca e o solo.

O quarto capítulo é destinado à apresentação do ensaio de teste de resposta térmica. Primeiramente, há uma contextualização do surgimento deste ensaio e, então, é explicada a sequência de atividades necessárias para a correta obtenção de resultados.

A apresentação do modelo matemático a ser utilizado para a obtenção de resultados com sentido físico do problema ocorre no quinto capítulo. Ele consiste em seguir a norma europeia para a obtenção dos parâmetros de temperatura do solo sem perturbação térmica e a capacidade de troca de calor do solo. Com esses resultados em mãos, será possível dimensionar algum sistema geotérmico.

Resultado dessas necessidades, o sexto capítulo propõe o projeto de uma sonda capaz de realizar a tarefa de acrescentar calor à uma taxa constante no solo. Com a geometria de tubos coaxiais, o aparato é capaz de impor calor à uma potência constante e medir as temperaturas de entrada e de saída da água em relação ao tempo. Por fim, com essas informações, pode-se adquirir os parâmetros necessários para projetar um dispositivo geotérmico.

## 2 SISTEMAS GEOTÉRMICOS

*Neste capítulo são explicitadas aplicações de sistemas geotérmicos já existentes no mundo.*

### 2.1 ENERGIA GEOTÉRMICA E APLICAÇÕES

Compreender e manipular energia é uma atividade que requer bastante atenção, devido à alta complexidade. Viana (et al, 2012) afirmam que a energia, apesar de se apresentar de diversas formas, somente é identificada propriamente durante seus processos de conversão. Ainda de acordo com os autores, o calor é definido como o fluxo energético decorrente de diferenças de temperatura, e que o trabalho é analogamente relacionado à elevação de um peso.

A energia geotérmica, que é definida como a energia térmica oriunda do interior da Terra, é classificada como sustentável e renovável, possuindo um dos menores impactos naturais ao planejar sistemas que permitem essa troca de calor (VILELA, 2004).

Dentre os exemplos explicitados, uma forte tendência comentada na bibliografia é o desenvolvimento de tecnologias que utilizem bombas de calor acopladas ao solo com a finalidade de climatização de residências e edifícios. Tais sistemas são conhecidos mundialmente como Ground Source Heat Pump (GSHP) e sua aplicação tem ganhado destaque pelo fato de grande parte do território nacional ser de formação geológica antiga e considerado uma grande fonte de energia geotérmica de baixa temperatura ou de baixa entalpia.

As fontes geotérmicas, segundo Bandeira (apud ASHRAE, 2015) são analisadas de acordo com as faixas de temperaturas e na forma de obtenção da energia, e podem ser classificadas como recursos de alta temperatura ( $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), recursos de temperatura intermediária ( $90\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e recursos de baixa temperatura ( $< 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). E para o caso de geração de energia elétrica, geralmente deve-se ter recursos de alta temperatura, sendo que o mais comum são regiões de baixa temperatura (BANDEIRA, 2015).

Analisando o panorama do Brasil, é visível que um dos maiores consumos de energia elétrica está relacionado aos setores público e comercial. No ano de 2010, 47,6 % do total de energia consumida no país foi destinada às edificações desses dois setores (MALLMANN, 2011). Mais especificamente, segundo dados da Eletrobrás de 2006, 47 % da energia gasta em edificações comerciais foram destinadas para sistemas de ar-condicionado. Tendo esses

dados, é possível identificar que uma grande parcela do consumo energia no país é direcionado para a climatização predial.

Atrás de métodos de diminuição do consumo de energia elétrica para alimentar sistemas de climatização residencial e predial, observou-se que existe um grande potencial na busca por meios de realizar troca de calor com o subsolo. Tal atividade ainda é bastante recente, tratando da realidade brasileira, o que carece saber medir e analisar o comportamento da transferência de calor do subsolo para que seja possível o correto dimensionamento desses sistemas de climatização.

Este trabalho tem como foco analisar uma característica observada nas propriedades do solo no caso de uma fonte de baixa temperatura. Trata-se de uma faixa de profundidades na qual a temperatura do solo se mantém praticamente constante a maior parte do ano e abaixo da temperatura ambiente, conforme a Figura 2.1.

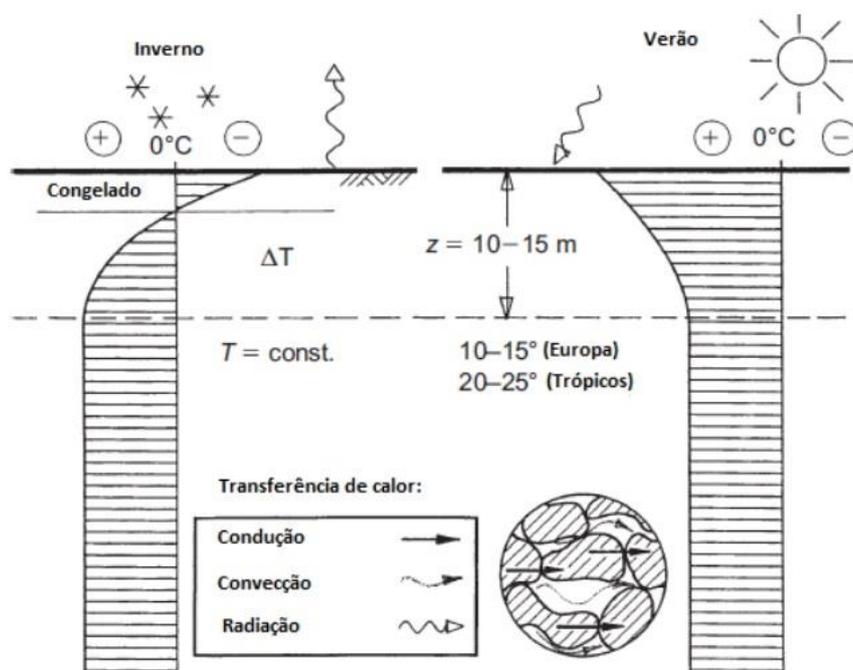


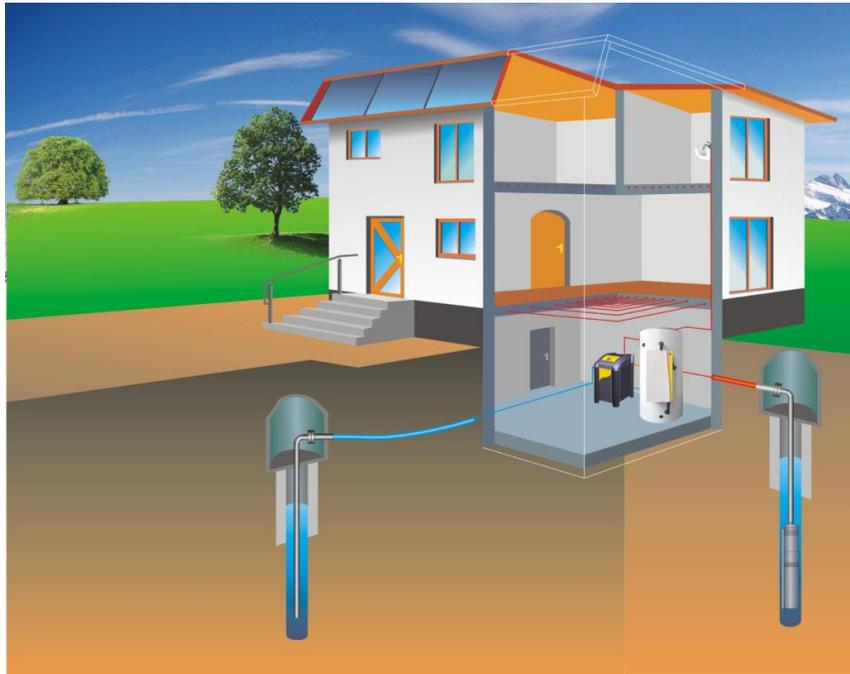
Figura 2.1 - Comportamento da temperatura do subsolo (BANDEIRA, 2015 apud BRANDL, 2006)

Projetos de sistemas de condicionamento de ambientes com utilização de energia geotérmica têm ganhado importância em países europeus e nos Estados Unidos devido à economia de energia elétrica. De acordo com Vilela (2004), esses equipamentos geram economia de 30 %, em média, quando comparados com um sistemas de refrigeração convencionais. Os sistemas de bombas de calor acopladas ao solo têm por função fazer o aproveitamento do calor armazenado no subsolo ou águas freáticas para a produção de águas quentes sanitárias, climatização ou mesmo produção de eletricidade (TAVARES, 2011).

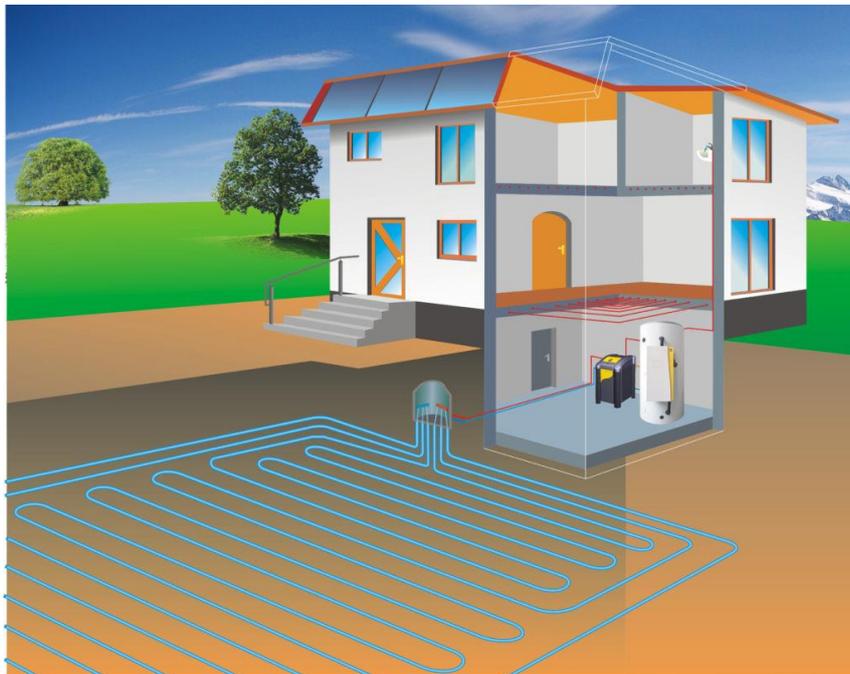
Nos Estados Unidos, por apoio e incentivo de órgãos federais, como DOE e NREL, foi possível ultrapassar a marca de 1 milhão de sistemas implantados (VILELA, 2004), o que traz ganho real em economia de energia por processos que envolvam aquecimento e/ou refrigeração. Uma característica importante dos sistemas GSHP é que eles são reversíveis, podendo utilizar o solo para dissipar ou retirar calor, tornando esses projetos muito atrativos também em invernos rigorosos. Na Suécia, de acordo com Gehlin (2002), no período em que foi publicado tal trabalho, existia uma estimativa de serem implantados cerca de 20.000 novas estacas trocadoras de calor para sistemas GSHP por ano.

Como previamente abordado, as bombas térmicas têm por função transferir energia térmica de um ponto a outro. Isso acontece por meio de acionamento mecânico, que através de circulação transfere energia térmica de baixa qualidade – ou baixa temperatura – de um determinado local, onde é concentrado por um compressor ou bomba, para outro local. A bomba de calor por si só não produz energia térmica (VILELA, 2004).

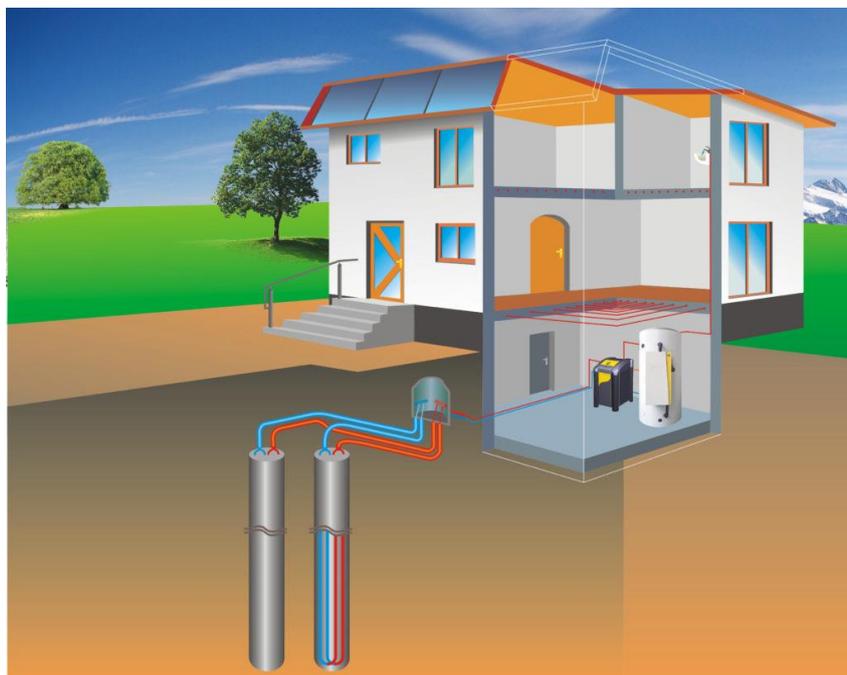
Ainda de acordo com Vilela (2004), os depósitos de energia térmica mais comuns utilizados atualmente com capacidade de transferir de um ponto a outro são: o ar, a terra ou grandes massas de água. Os sistemas que permitem a troca de calor com o solo podem ser classificados por dois tipos: ciclo aberto e ciclo fechado. Os sistemas de ciclo aberto têm como diferença a realização de trabalho diretamente sobre uma fonte da natureza, retirando fluidos que, por processos naturais, retiraram ou dissiparam calor do ambiente. Enquanto os processos de ciclos fechados necessitam realizar trabalhos sobre um fluido que circule e faça a troca de calor entre os dois pontos sem que haja troca material entre os meios. O caso de ciclo aberto é ilustrado na Figura 2.2, já nas Figuras 2.3 e 2.4 são demonstrados exemplos de estacas horizontais e verticais com ciclos fechados.



**Figura 2.2 - Ciclo abierto. (Fonte: Wasser Wärmepumpen)**



**Figura 2.3 - Ciclo fechado horizontal. (Fonte: Wasser Wärmepumpen)**



**Figura 2.4 - Ciclo fechado vertical. (Fonte: Wasser Wärmepumpen)**

O funcionamento de uma bomba de calor engloba princípios básicos de transferência de calor. Isso consiste em utilizar conceitos físicos de troca de calor entre dois corpos, tais como a condução, a radiação e a convecção. Tendo uma fonte com temperatura inferior à outra, esta tem por função dissipar o calor transportado da fonte mais quente.

É importante ressaltar também que a viabilidade econômica nem sempre é uma aliada quando se procura implantar tal sistema, devido ao custo de perfuração do solo para a aplicação dos tubos responsáveis pela troca de calor. Tal sistema se torna atrativo principalmente quando se cogita fazer a adequação desde o processo de construção, pois os pilares de sustentação da residência ou edifício necessitam, em alguns casos, de dezenas ou até centenas de metros abaixo da superfície para garantir que a fundação seja forte suficiente para sustentar a construção. A tubulação é instalada junto à estrutura metálica da fundação. Essa montagem será melhor descrita no capítulo de projeto da estaca.

Essa faixa de temperaturas buscada em função da profundidade do solo é uma característica muito peculiar de cada local, pois como a geologia não é algo uniforme, os tipos de materiais e sua porcentagem encontrada no solo variam de acordo com cada região. É possível estimar as propriedades térmicas do solo a partir de dados da literatura identificando amostras do solo no local de estudo e analisados de acordo com propriedades, como na Tabela 2.1 (BANDEIRA, 2015 apud LHENDUP, 2011).

**Tabela 2-1 – Propriedades térmicas de tipos de solo (BANDEIRA, 2015)**

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Condutividade Térmica [W/mK]</b>	<b>Capacidade calorífica volumétrica [kJ/m<sup>3</sup>*K]</b>
Pedregulho	2.0 – 3.3	0.57
Areia	1.5 – 2.5	1.1
Silte	1.4 – 2.0	0.68
Argila	0.9 – 1.8	0.60
Argilito	2.6 – 3.1	0.81
Arenito	3.1 – 4.3	0.83

Tal tipo de estudo necessita da retirada de uma amostra do solo no local estudado, que deve ser analisada em laboratório. Isso gera custos operacionais excessivos, tais como a perfuração do solo; e a necessidade de ter uma sonda-agulha que retire e armazene corretamente a amostra para a análise de variação de temperatura em relação ao tempo em ambiente controlado (BANDEIRA, 2015).

Para substituir a análise laboratorial das propriedades térmicas do subsolo, foram feitas publicações científicas sobre o Thermal Response Test (TRT), que após apresentar resultados consistentes, se popularizou com certa facilidade. Os primeiros ensaios TRT (Teste de Resposta Térmica, em tradução livre) foram feitos por universidades da Suécia ainda na década de 1980, mas demorou alguns anos adentro a década de 1990 para que fosse construído um equipamento que tornasse o ensaio prático (BANDEIRA, 2015).

A partir de 1995, houve uma popularização de sistemas que medem as faixas de temperaturas e a capacidade de troca de calor com o solo, principalmente nos Estados Unidos e na Suécia. O Brasil, talvez por sua abundância em capacidade de gerar energia por hidrelétricas, se acomodou na procura por fontes energéticas diversificadas, como a geotérmica. Com o crescimento econômico do país, mais precisamente após os anos 2000, aumentou de forma significativa a utilização de fontes de energia não renováveis, como as termelétricas, e também cresceu a busca por fontes de energia renováveis, como a eólica e a fotovoltaica, como matrizes adjacentes. Mas ainda é necessário expandir as atuais fontes energéticas renováveis e buscar novas fontes renováveis (ARBOIT et al, 2013). Ou seja, ainda é preciso descentralizar a geração de energia.

Nos estudos comparativos entre o antigo método de identificar as propriedades térmicas do solo – da retirada de amostra e análise laboratorial com auxílio de tabelas, como a Tabela 2-1 – com o TRT, foi constatado que a maioria dos estudos feitos pelo método laboratorial apresentavam resultados de condutividade térmica consideravelmente menores que os apresentados pelos ensaios TRT. Isso vem de encontro ao fato de que o ensaio TRT é realizado em campo (BANDEIRA, 2015 apud LHENDUP, 2011).

Os primeiros sistemas de ensaio em campo para identificar propriedades térmicas do solo foram construídos na Suécia em 1995, na Universidade de Luleå, por Signhild Gehlin (GEHLIN, 2002) e posteriormente por Austin, em 1996, na Universidade de Oklahoma, nos Estados Unidos (BANDEIRA, 2015 apud AUSTIN, 1998).

Os sistemas capazes de realizar os ensaios de TRT têm por finalidade identificar os parâmetros de transferência de calor com o subsolo. Esses, por sua vez, fornecem a condutividade térmica e a resistência térmica (BANDEIRA, 2015 apud ECES, 2013). O ensaio TRT consiste em impor ou retirar calor no subsolo a uma taxa constante por meio de um furo já existente, que é feito em obras de construção civil e, o que diminui os custos operacionais de realização do ensaio. No furo são colocados dois tubos para entrada e saída de um fluido circulante. Utiliza-se água como fluido por já haver bastante conhecimento sobre o seu comportamento quando se impõe ou se retira calor e por ter boa resposta quanto à troca de calor. Com sensores, são coletadas as temperaturas de entrada e saída do fluido e, por meio de fundamento teórico, é possível interpretar os dados. Por fim, chega-se nos parâmetros de condutividade e resistência térmica do solo em função da profundidade.

Observando poucas dezenas de metros de profundidade, nota-se que essa camada de solo funciona apenas como um grande painel de inércia térmica, capaz de absorver e transmitir calor por convecção, radiação e condução (BANDEIRA, 2015). É comum na literatura que, a partir de certa profundidade, o subsolo possua temperatura praticamente constante durante o ano. De acordo com Vilela (2004), no Brasil, essa faixa se dá a partir de cinco a seis metros de profundidade.

## **2.2 BOMBAS DE CALOR ACOPLADAS AO SOLO**

A bomba de calor foi primeiramente descrita por Lord Kelvin em 1853 e sua aplicação veio dois anos depois por Peter Ritter von Rittinger. As patentes dessa tecnologia datam de 1912 e a primeira aplicação comercial utilizando o solo como fonte de troca de calor aconteceu apenas no final de 1940 (VILELA, 2004). Sua instalação ocorreu no Edifício da Commonwealth (Portland, Oregon), reconhecido pela ASME (American Society of Mechanical Engineers) com o título de “National Historic Mechanical Engineering” (BANDEIRA, 2015).

As bombas de calor acopladas ao solo são dispositivos que têm por principal função permitir a transferência de energia térmica entre dois ambientes, sendo que o equipamento não tem a capacidade de gerar calor de formas significativas. Nos ciclos de bomba de calor

convencionais, como os encontrados em sistemas de refrigeração e climatização, o ciclo é composto por um fluido refrigerante responsável por realizar as trocas térmicas, e também estão presentes um compressor e uma válvula de expansão. O fluido circulante, inicialmente na fase líquida, passa por processo de compressão e, através desse processo termodinâmico, o fluido passa para uma fase gasosa. Nessa fase, tem sua temperatura aumentada (etapa que necessita introduzir energia elétrica externa para o funcionamento do compressor). Então, o gás, ao circular pelo circuito, perde calor para o ambiente e, ao passar por uma válvula de expansão, tem sua temperatura reduzida bruscamente, voltando para o estado líquido. Assim, é possível realizar troca de calor entre dois ambientes.

Quanto à bomba de calor geotérmica, ilustrada na Figura 2.5, observa-se a utilização do solo como fonte de calor, o que é comumente aplicado em países europeus e norte-americanos. São explicitados os componentes dos dois ciclos, interno e externo: compressor, válvula de expansão (descompressor) e direção do escoamento.

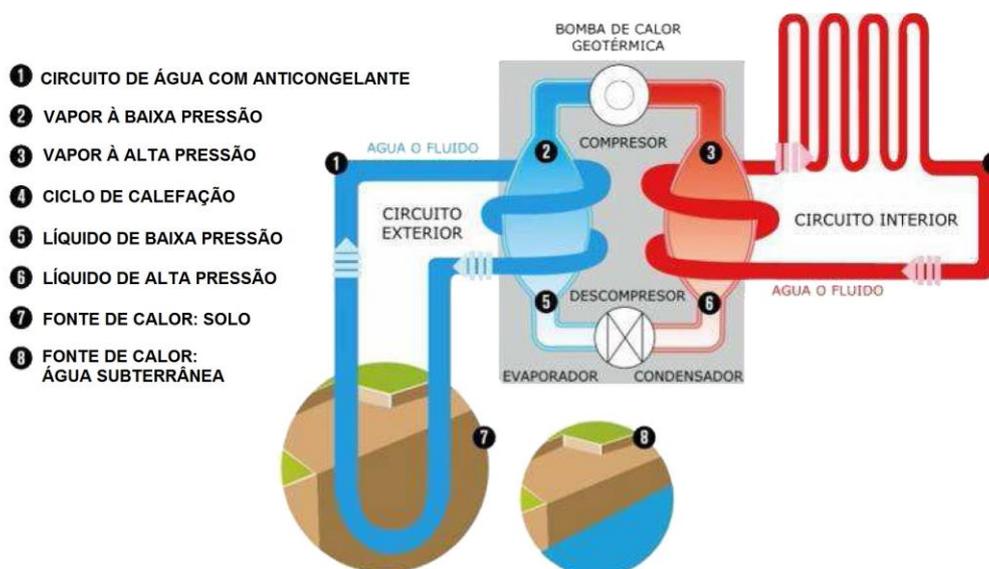


Figura 2.5 - Bomba de calor geotérmica (Fonte: Verano Instalaciones)

Portanto, é possível perceber que a principal fonte de consumo de energia elétrica nesse ciclo é a necessidade de existir uma transformação termodinâmica, responsável pela perda de calor para o fluido refrigerante, e que essa transformação é alimentada por trabalho imposto pelo compressor. Esse fenômeno vem de encontro à Teoria do Ciclo de Carnot, que diz que o ciclo termodinâmico funciona transformando trabalho em energia térmica.

Buscando reduzir o consumo de energia elétrica com esse ciclo, o foco deve estar no melhor desempenho da circulação do fluido em conjunto com a taxa de transferência de calor. Ao considerar os sistemas de bomba de calor acoplada ao solo, é perceptível que existe grande possibilidade de consumir menos energia, pois eles necessitam apenas circular o

fluido, já que a dissipação de calor acontece no solo – diferentemente de um ciclo de refrigeração em que a temperatura do fluido é reduzida por consequência de uma grande taxa compressão.

Dentre as variações dos possíveis tipos de bombas de calor acopladas ao solo, de acordo com Bandeira (2015), a American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) define que são separados de acordo com três nomenclaturas:

- “Ground – Coupled Heat Pumps” (GCHPs) – usa a terra como fonte de calor, com trocadores de calor tanto horizontais quanto verticais;
- “Groundwater Heat Pumps” (GWHPs) – utiliza águas subterrâneas (aquífero) como fonte de calor;
- “Surface Water Heat Pumps” (SWHP) – usa águas superficiais (lagos) como fonte de calor.

Neste trabalho, o foco é entender os sistemas ditos GCHP, buscando compreender o fenômeno de transferência de calor de uma estaca vertical com o solo. Uma vantagem bastante relevante dessa variação é a possibilidade de reversibilidade, tornando o equipamento capaz de absorver ou dissipar calor no subsolo, dependendo da necessidade, de acordo com as diferentes demandas ao longo do ano. Por isso, o sistema GCHP é chamado de sazonal (BANDEIRA, 2015), como pode ser visualizado na Figura 2.6.

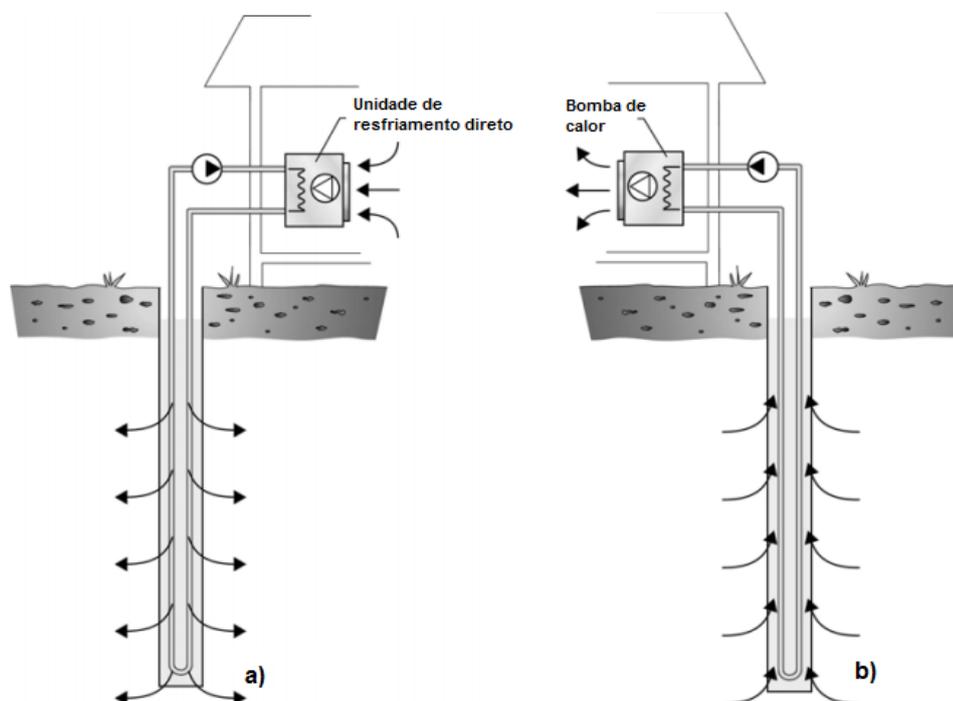


Figura 2.6 - Estaca trocadora de calor na função de dissipador de calor em a), e absorvedor de calor em b) (GEHLIN, 2002)

Outra característica importante é que esse circuito é chamado primário. Nesse caso, a estaca trocadora de calor é responsável por realizar a troca térmica entre o subsolo e a bomba de calor, que, por sua vez, está ligada a um circuito secundário de climatização interna, como explicitado na Figura 2.6. A presença de um circuito secundário não é obrigatória, mas bastante comum nas aplicações mais recentes (BANDEIRA, 2015).

As estacas trocadoras de calor verticais possuem melhor eficiência, utilizam menos tubos, mas têm maior custo de instalação, devido à necessidade de perfurar entre 45 e 150 metros. As estacas horizontais, apesar de necessitarem de uma área maior, têm menor custo de instalação, o que as torna mais adequadas para aplicações de menor porte; essas instalações geralmente estão situadas a cerca de dois metros de profundidade e, por isso, estão sujeitas a maiores flutuações de temperatura (TAVARES, 2011).

### **2.2.1 Vantagens e desvantagens**

Dentre as vantagens desses sistemas listados por Tavares (2011) em relação à eficiência energética, está o fato de que essa característica é medida pelo coeficiente de desempenho, designado por COP, que é relativo à quantidade de energia cedida por unidade de energia elétrica consumida por uma bomba de calor. Esse fator está diretamente relacionado à diferença de temperatura do solo e do ambiente a ser climatizado. O valor do COP médio de um sistema GSHP varia entre 3,5 e 5. Entretanto, as bombas de calor convencionais mais eficientes possuem um COP de 2,2 quando a temperatura ambiente está em  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e um valor de COP de 4,2 quando a temperatura ambiente é de  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , representando uma redução média de 25 % a 60 % do consumo de energia elétrica, considerando uma mesma quantidade de energia fornecida.

Quanto à versatilidade, ele comenta que esse sistema oferece diversas soluções técnicas capazes de satisfazer necessidades de aquecer e arrefecer o ambiente interno. Com uma central concentradora de calor e de frio, não existe limite de potência através de sistema modular.

Há considerável redução de poluição sonora e visual quando comparado com o sistema de condicionadores de ar convencionais, em que as unidades de condensação, além de proporcionarem ruídos desagradáveis, ocupam uma área técnica considerável, enquanto as estacas estão enterradas, ou seja, fora do campo de visão.

Maior durabilidade e menor necessidade de manutenção também são fatores vantajosos, pois é considerado um tempo de vida útil superior a 15 anos, no caso das bombas de calor geotérmicas; para as estacas subterrâneas, a vida útil varia entre 40 e 50 anos. No

caso de manutenção, pelo fato de existirem menos partes mecânicas, há menor incidência de sujeira nos elementos filtrantes, serpentinas e ventiladores presentes no sistema.

Do ponto de vista ecológico, é possível listar ainda que esse equipamento consome menor quantidade de energia elétrica, principalmente em horário de pico. A produção e implantação do sistema resulta em menor emissão de CO<sub>2</sub>, resultado de processos industriais de fabricação de todos os componentes mecânicos, e inclusive o fluido refrigerante dos equipamentos condicionadores de ar convencionais.

Observando também a aplicação em conjunto com as estacas de fundação do edifício, Bandeira (2015 apud HE & LAM, 2006) afirma ainda que o concreto tem propriedades térmicas melhores que a areia e o graute, materiais também utilizados para preencher os espaços do furo no solo.

Quanto às desvantagens listadas por Tavares (2011), está o uso em regiões mais frias, onde é necessária a utilização de anticongelantes do tipo (R-134a), que apesar da baixa toxicidade, podem produzir CFC<sup>2</sup>s e HCFC<sup>3</sup>s. Outro ponto comentado é o alto custo de implantação em conjunto com o alto custo de manutenção das tubagens, apesar de necessitar menos vezes a realização de manutenção visto que está fora da atividade de mau tempo e vandalismos.

### **2.2.2 Instalação em estacas de fundação**

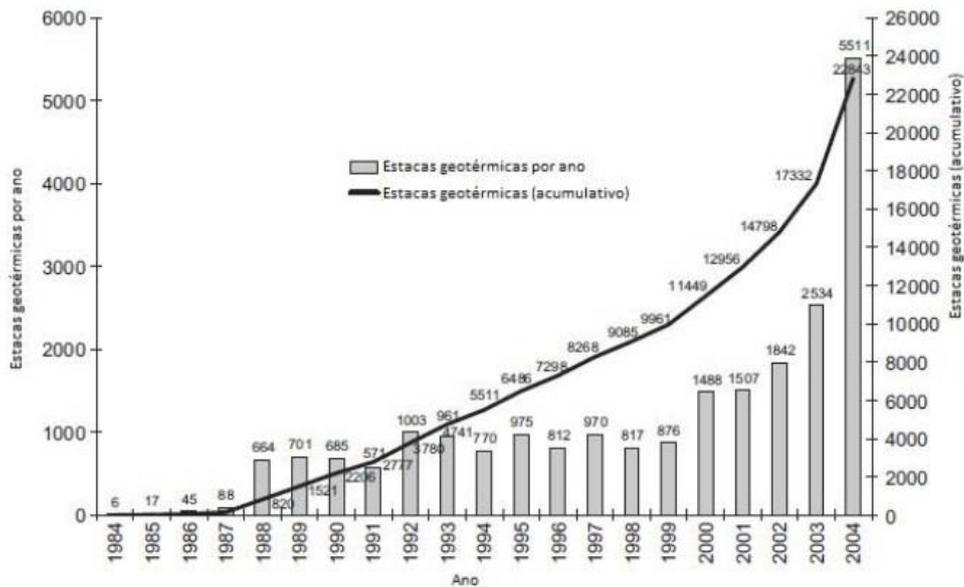
Como já mostrado, um projeto de bomba de calor geotérmica se torna economicamente viável principalmente quando é pensado em sua implantação desde o início da construção da residência ou edifício. Portanto, é necessário que os tubos do circuito primário sejam instalados em conjunto com a fundação dos edifícios, onde funcionariam como sistemas GSHP de estacas verticais. É possível perceber na Figura 2.7 a aplicação da tubulação em uma estaca de fundação.



**Figura 2.7 - Aplicação de estaca na fundação (Fonte: Pompe à chaleur géothermique)**

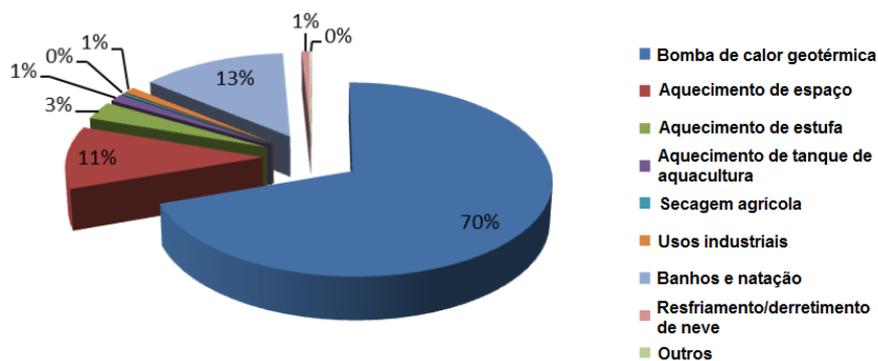
## **2.3 APLICAÇÃO NO MUNDO**

Após a popularização da tecnologia, principalmente na Suécia na década de 1970, a aceitação da bomba geotérmica passou por um lento processo de disseminação no mundo, inicialmente apenas com aplicação de sistemas de ciclo aberto. Com o desenvolvimento de tubos de polibutileno em 1979, os sistemas de ciclo fechado passaram a dominar o mercado por se tornarem os mais economicamente viáveis, principalmente quando se executa a implantação ainda no processo de construção da residência ou edifício (TAVARES, 2011). Outro fator que ajudou sua popularização foi a característica da elevada capacidade térmica do concreto (BANDEIRA, 2015). A disseminação desses sistemas aconteceram de forma bastante acentuada na Suécia e na Áustria. A Figura 2.8 mostra o crescimento do número desses sistemas implantados na Áustria, chegando ao número de 22.843 estacas trocadoras de calor no total, e 5.511 implantadas ao ano.



**Figura 2.8 - Número de estacas trocadoras de calor na Áustria até 2004 (BANDEIRA, 2015 apud BRANDL, 2006)**

De acordo com Tavares (2011), em 2010 já haviam 35.236 MW de potência instalada de sistemas de bombas de calor acopladas ao solo em um total de 43 países; em energia, são 214.782 TJ/ano, o que representa uma parcela de 70% no total de energia geotérmica aproveitada no mundo, como explicitado na Figura 2.9.



**Figura 2.9 - Porcentagem de distribuição de aproveitamento de energia geotérmica mundial (TAVARES, 2011)**

Ainda de acordo com Tavares (2011, apud LUND et al, 2010), o número de sistemas implantados com a capacidade de 12 kW (capacidade mais comum dentre as residências nos Estados Unidos e na Europa Ocidental) é de cerca de 2,94 milhões de unidades, sendo mais do que o dobro das unidades existentes no ano de 2005, provando, portanto, a ascensão rápida desse tipo de aplicação. As unidades individuais, entretanto, variam de 5,5 kW para uso residencial a 150 kW para instalações comerciais e institucionais, e estão instaladas em sua maior parte na América, na Europa e na China.

Segundo Bandeira (2015, apud HE & LAM, 2006), as bombas de calor geotérmicas são a tecnologia ligada a energias renováveis que possui maior crescimento no mundo em aplicação, com um aumento de cerca de 10 % em aproximadamente 30 países ao longo de 10 anos (1995 – 2005). Nesse período, sua aplicação aconteceu nos países do norte europeu e nos Estados Unidos, principalmente. Somente na Noruega, 30 grandes projetos de sistemas GSHP foram iniciados entre os anos de 1998 e 2002.

Tavares (2011, apud LUND et al, 2010) traz a realidade de Portugal, afirmando que o país passava por fase embrionária em relação à oferta no mercado na época. Era estimado que existiam 24 instalações de 12 kW com COP de 3,5 e 1,5 mil horas de operação, o que correspondia a uma potência instalada de 0,3 MWt e 1,1 TJ/ano. Isso indicava que, no total, eram aproveitados pelo país 28,1 MWt e 386,4 TJ/ ano.

É fato que a quantidade de sistemas GSHP existentes no mundo são, na maior parte, destinados a utilizar energia geotérmica para o aquecimento residencial e predial, mas não exclusivamente (VILELA, 2004). No caso do Brasil, com algumas exceções existentes, cogita-se utilizar o solo apenas como dissipador de calor.

## **2.4 BOMBAS DE CALOR ACOPLADAS AO SOLO NO BRASIL**

Vilela (2004) realizou um estudo experimental ao longo de um ano a fim de encontrar os parâmetros necessários para o dimensionamento de um sistema de condicionamento de ar. Suas conclusões mostram que não houve eficiência energética suficiente para existir viabilidade econômica; que deveria haver 30 % ou mais em relação ao sistema convencional de condicionamento de ar, mas por ser um dos primeiros estudos em solo brasileiro, seu foco se manteve em até dois metros de profundidade, o que se mostrou determinante nos resultados obtidos.

Posteriormente foi feita outra aplicação de solução geotérmica, mas dessa vez com um sistema de condensador geotérmico, por Pires (2015). Buscando melhorar a eficiência energética de um sistema de ar-condicionado central na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, seu estudo se concentrou em otimizar uma unidade condensadora de água com torre de resfriamento previamente instaladas. Os resultados mostram que apesar de se deparar com a dificuldade de comportar o sistema geotérmico no prédio estudado, por ser uma construção já existente, a eficiência energética poderia acontecer inclusive em larga escala. No entanto, Pires criticou a falta de informações acerca das propriedades térmicas do solo brasileiro.

Bandeira (2015) realizou um estudo experimental a fim de avaliar a resposta térmica de estacas trocadoras de calor, sendo o primeiro e único trabalho encontrado que viria a obter os parâmetros necessários para um futuro dimensionamento de sistemas de climatização residencial e predial. Seu estudo foi feito no Campo Experimental de Fundações da Universidade de São Paulo, em São Carlos, São Paulo, e propôs medir a resposta de uma estaca com doze metros de profundidade. Segundo esse autor, o desenvolvimento futuro de tecnologias de bombas de calor acopladas ao solo apresentam perspectivas otimistas visando a realidade brasileira.

# 3 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

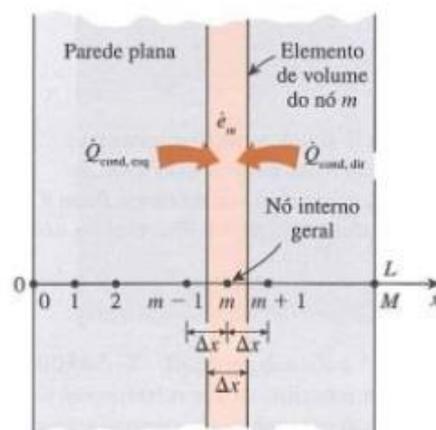
*Neste capítulo é trabalhado os conceitos de transferência de calor aplicáveis ao problema.*

## 3.1 CONDUÇÃO DE CALOR PERMANENTE UNIDIRECIONAL

Considerando o processo de transferência de calor da estaca para o solo, este é comparado à situação de condução de calor em regime permanente da estaca para o solo. Trataremos inicialmente da situação de condução entre a parede da estaca com o solo e posteriormente a situação de convexão de calor entre o fluido e os tubos.

Para trabalhar este problema é utilizado a formulação das diferenças finitas para condução de calor em uma placa plana em conjunto com a abordagem do balanço de energia. Para o método do balanço de energias, de acordo com (Çengel, 2012), este consiste na subdivisão em relação ao espaço a ponto de sermos capazes de estabelecer um balanço energético entre os elementos subsequentes. Ou seja, vamos analisar o comportamento de cada elemento diante da resposta dos elementos nas suas proximidades. Como estamos considerando o caso da transferência de calor de uma fonte linear e contínua trataremos apenas o caso de condução unidirecional.

De acordo com Çengel (2012), para modelar o caso de transferência de calor de uma fonte plana para outro meio devemos considerar uma intensidade de calor ( $\dot{q}$ ) e uma constante de condutividade  $k$ . A fonte deve ser subdividida em 'M' seções de espessura  $\Delta x = L/M$  em relação à direção que estamos analisando,  $x$ . Portanto, de acordo com às marcações da Figura (3.1) teremos as marcações correspondentes no nosso espaço de amostra.



**Figura 3.1 - Pontos nodais e elementos de volume utilizados na formulação de condução de calor, (Çengel, 2012).**

Sendo que nesta situação cada nó 'm' é simplesmente  $x_m = m \cdot \Delta x$  e sua temperatura correspondente é  $T(x_m) = T_m$ . Os elementos são formados pelas linhas médias entre cada um dos nós verticais. Para chegarmos na equação geral das diferenças para os nós internos, devemos considerar os nós 'm' e os vizinhos 'm-1' e 'm+1'.

Considerando a condução de calor para o elemento, o balanço de energia pode ser expresso, de acordo com a Equação (1) (Çengel, 2012):

$$\left( \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{condução de} \\ \text{calor no lado} \\ \text{esquerdo} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{condução} \\ \text{de calor no} \\ \text{lado direito} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{geração de} \\ \text{calor dentro} \\ \text{do elemento} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Taxa de mudança} \\ \text{de conteúdo} \\ \text{de energia do} \\ \text{elemento} \end{array} \right) \quad (1)$$

ou então,

$$\dot{Q}_{cond,esq} + \dot{Q}_{cond,dir} + \dot{E}_{ger,elem} = \frac{\Delta E_{elem}}{\Delta t} = 0 \quad (2)$$

Considerando que a quantidade de energia no meio, ou no volume de controle analisado não muda sob condições permanentes, a variação de energia do elemento  $\Delta E = 0$ . E portanto a taxa de geração de calor dentro do elemento pode ser expressa como (Equação 3)

$$\dot{E}_{ger,elem} = \dot{e}_m V_{elem} = \dot{e}_m A \Delta x$$

No qual  $\dot{e}_m$  é a taxa de geração de calor por unidade de volume [W/m<sup>3</sup>] no nó 'm', e este sendo considerado com constante para todo o elemento 'm', e A é a área de transferência de calor no problema. Em termos práticos significa apenas a área da superfície externa dos tubos do sistema.

Considerando que a condução de calor em um corpo contínuo varia linearmente, é possível descrever matematicamente esta relação através da Equação (4):

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (4)$$

Onde  $\Delta T$  é a variação de temperatura da parede na direção da transferência de calor, que é a direção de menor temperatura. Como estamos tratando de variações de temperaturas

entre os nós, podemos então considerar a relação como linear entre os nós equivalentes. Tomando o limite do comprimento deste elemento tendendo à zero, é possível chegar à formulação diferencial à seguir (Equação 5):

$$\dot{Q}_{cond,esq} = kA \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} \quad e \quad \dot{Q}_{cond,dir} = kA \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \quad (5)$$

Substituindo os parâmetros das equações 4 e 5, chegamos à formulação à seguir:

$$kA \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + kA \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} + \dot{e}_m A \Delta x = 0 \quad (6)$$

E portanto ao aplicar as devidas condições de contorno é possível identificar o parâmetro de temperatura no nó subsequente.

### 3.2 CONVECÇÃO DE CALOR

A ocasião de convecção de calor no problema proposto acontecerá no escoamento turbulento do fluido com a parede da estaca trocadora de calor. Para isso é possível considerar um volume de controle no qual podemos afirmar que a taxa de fluxo de massa entrando neste volume de controle é igual à taxa de fluxo de massa que sai deste mesmo volume.

Esta formulação é baseada na segunda lei de Newton do movimento aplicada para um elemento diferencial do volume de controle previamente comentado. “A força líquida que age sobre o volume de controle é igual à massa vezes a aceleração do elemento fluido dentro do volume de controle, que também é igual à taxa líquida de quantidade de movimento que sai do volume de controle” (ÇENGEL, 2012, p. 389).

Portanto esta formulação do balanço de massas fica (Equação 7):

$$(Massa) \left( \begin{array}{c} \text{Aceleração na} \\ \text{direção especificada} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Força líquida (corpo e superfície)} \\ \text{atuando na mesma direção} \end{array} \right) \quad (7)$$

ou também pode ser representado como (Equação 8):

$$\delta m \cdot a_x = F_{superficies,x} + F_{corpo,x} \quad (8)$$

onde a massa do elemento fluido contido no volume de controle é expresso pela Equação (9):

$$\delta m = \rho(dx \cdot dy \cdot 1) \quad (9)$$

lembrando que o escoamento é permanente e bidimensional, temos que  $u = u(x,y)$ , e a derivada de 'u' é descrito pela Equação (10):

$$du = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (10)$$

Portanto a aceleração deste elemento fluido na direção 'x' pode ser descrito pela expressão (Equação 11):

$$a_x = \frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{dt} = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \quad (11)$$

Realizando as devidas simplificações acerca dos termos da equação de Navier – Stokes aplicado para a camada limite, podemos chegar à conclusão que este balanço de forças superficiais são resultados apenas da componente 'x', e chegamos então a Equação (12):

$$\begin{aligned} F_{superfície,x} &= \left( \frac{\partial \tau}{\partial y} dy \right) (dx \cdot 1) - \left( \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) (dy \cdot 1) = \left( \frac{\partial \tau}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial x} \right) (dx \cdot dy \cdot 1) \\ &= \left( \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial P}{\partial x} \right) (dx \cdot dy \cdot 1) \end{aligned} \quad (12)$$

que representa o balanço da quantidade de movimento na direção do escoamento.

## 4 TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA

*Este capítulo descreve o ensaio proposto para o mapeamento do comportamento geotérmico brasileiro.*

### 4.1 HISTÓRIA

A bomba de calor acoplada ao solo, como previamente abordado, tem por função a captação e a transferência de calor destinado ao aquecimento ou arrefecimento de um ambiente, ou seja, seu funcionamento é diretamente dependente das propriedades térmicas do solo. No mundo, a maior parte das aplicações foram voltadas para o aquecimento, por se tratar de países mais frios. Já no Brasil, com clima mais quente, o consumo de energia é voltado para diminuir a temperatura ambiente. É importante lembrar que o solo brasileiro pode ter características que trazem desempenho superior aos sistemas já existentes, devido à formação geológica antiga, e que é necessário medir tais propriedades.

Chega-se, então, à proposta deste trabalho: identificar uma relação da faixa de temperatura do solo em função da profundidade, e também saber identificar as propriedades influentes na taxa de transferência de calor entre a estaca e o solo.

Como já abordado na revisão bibliográfica, é possível estimar tais características a partir da descoberta do tipo do solo, em conjunto com a análise das proporções de tipo de solo e suas propriedades térmicas (Tabela 1). Mas realizar tal atividade, como era feito inicialmente, demandava maior orçamento e, ao comparar os resultados dessa análise com o ensaio TRT, o segundo apresentava valores consideravelmente inferiores. Por isso, testes capazes de apresentar o comportamento real do solo in situ se popularizaram rápido.

O primeiro artigo que traz a possibilidade de construir um equipamento TRT foi apresentado em uma conferência “Stock” em Estocolmo no ano de 1983 por Morgesen. Mas apenas na metade da década de 1990 ocorreu a construção do primeiro equipamento. Hoje mais de 20 países apresentam aplicações a respeito do ensaio. Desde 2000, a conferência “Terrastock Conference”, em Stuttgart, também possui uma seção exclusiva de publicações sobre bombas geotérmicas (BANDEIRA, 2015 apud ECES, 2013).

O teste a ser realizado para identificar os parâmetros de condutividade térmica e resistência térmica (BANDEIRA, 2015 apud ECES, 2013) se trata de retirar ou injetar calor no solo a uma taxa constante em um tubo enterrado em um furo previamente feito. Trata-se de injetar água a uma temperatura constante diferente da temperatura ambiente, e esse fluido

injetado irá retornar com outra temperatura. A partir de fundamentos teóricos de transferência de calor, é possível identificar os parâmetros necessários para o dimensionamento de qualquer sistema que utilize propriedades geotérmicas.

O ensaio possui norma própria de realização na Europa, no Eurocode (CEN/TC 341 N525 2011). Mas, principalmente pela particularidade da geologia de cada local, existem diversas particularidades que variam de acordo com a literatura disponível (BANDEIRA, 2015).

## 4.2 ENSAIO TRT

Quanto à preparação do ensaio de teste de resposta térmica, Gehlin (2002) descreve a realização do furo citando alguns métodos de realizá-lo, sendo que o método mais comum é utilizar um maquinário chamado “water-driven down-hole hammer” (martelo acionado por água para furar, em tradução livre). Ele basicamente utiliza água para amolecer o solo e, ao bater o martelo no furo, o solo acaba cedendo. Excessos de terra são retirados por um tubo metálico. Gehlin (2002) explicita também, de acordo com sua experiência, a necessidade de se impor um estabilizador do furo para evitar desmoronamentos. Segundo a autora, é interessante a presença de um tubo de metal ou de plástico que, em consonância a regulamentação sueca, deve proteger pelo menos seis metros de profundidade, sendo que no mínimo os últimos dois metros do tubo devem ser concretados, a fim de garantir a estabilidade, conforme a Figura 4.1, abaixo.

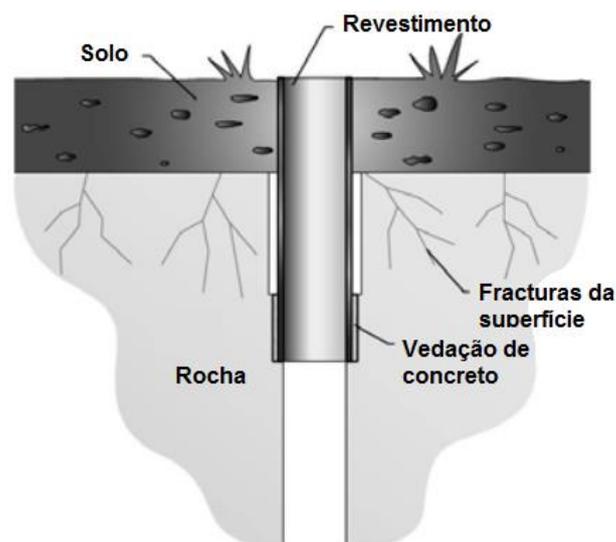
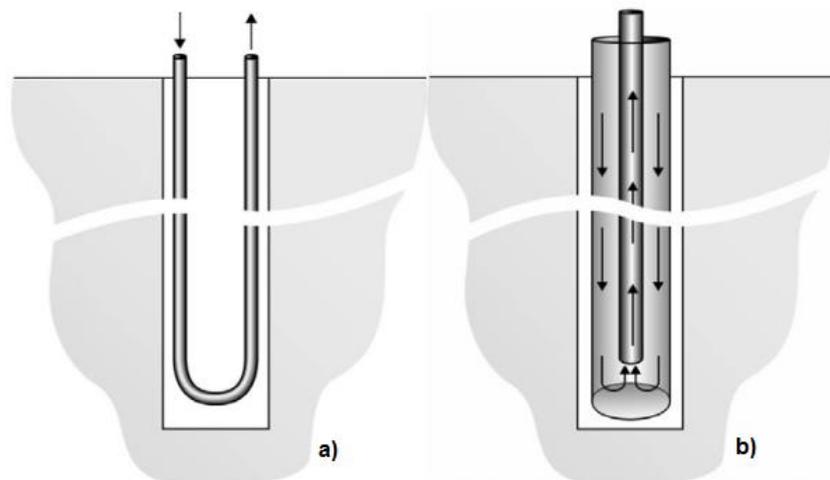


Figura 4.1 - Tubo estabilizador do furo (GEHLIN, 2002)

Ainda segundo Gehlin (2002), existem dois tipos de estacas já desenvolvidas a respeito da forma mecânica de se injetar e retirar o fluido responsável por permitir a troca de

calor. Esses coletores são conhecidos popularmente por sistema de tubos em “U” e tubos coaxiais, conforme a Figura 4.2 a) e b), respectivamente.



**Figura 4.2 - Desenho dos dois tipos principais de estacas trocadoras de calor (GEHLIN, 2002)**

As diferenças existentes nesses dois tipos de coletores na estaca trocadora de calor são bastante discutidas na literatura, existindo trabalhos que descrevem especificamente as diferenças a serem consideradas ao optar por qual tipo de coletor será mais vantajoso de se implantar.

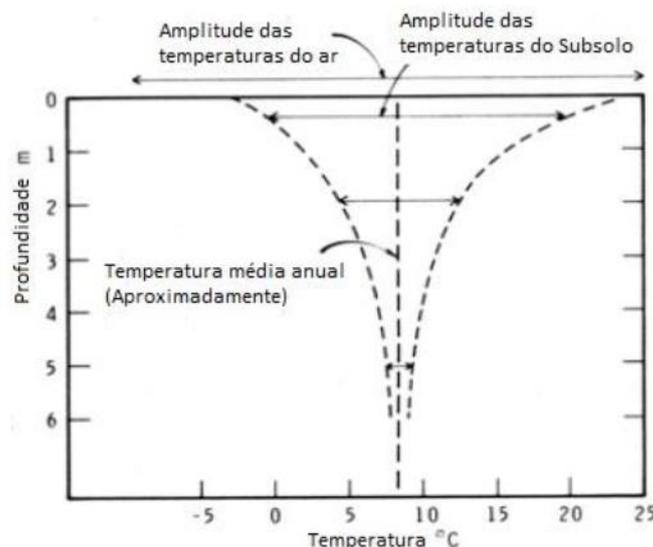
Ao analisar aspectos financeiros a respeito da aquisição de materiais e maior facilidade de montagem do equipamento, se torna bastante atrativo considerar o tubo em “U” para se realizar os ensaios. Ao cogitar dois tubos concêntricos, há a necessidade de um tubo com diâmetro consideravelmente maior que o outro, e que também tenha um comprimento considerável, pois este deverá atingir profundidades preferencialmente próximas a 10 metros. Em contrapartida, ao considerar a utilização de dois tubos conectados por uma ligação em “U”, atualmente, os materiais utilizados para essa aplicação são chamados de tubos de PEAD (polietileno de alta densidade). Eles são fáceis de encontrar no mercado, pela alta aplicabilidade. Tratando do ensaio realizado no Brasil, Bandeira (2015) optou pela aplicação do tipo tubo em “U” em detrimento dos tubos concêntricos.

Outro fator importante é o preenchimento dos espaços vazios presentes entre os tubos de circulação do fluido e a parede do furo. Existem algumas variedades de materiais utilizados para realizar tal preenchimento, e Gehlin (2002) comenta a existência de estudos com o intuito de identificar os melhores materiais para preenchimento dos espaços vazios entre o tubo e a parede. Esses têm por função garantir um bom contato entre as superfícies para garantir eficiência quanto à troca de calor da estaca.

É comum entre os autores citados recomendar o preenchimento desses espaços com a própria terra retirada na escavação, pela praticidade de já ter o material que voltará para sua origem. Mas também é bastante cogitada a utilização de areia como opção. Para o caso de se criar um campo de ensaios, onde não será necessária a retirada de nenhum equipamento do local, é também comentada a aplicação de argamassa ou graute para preencher o furo em alguns casos. Porém, o essencial a se observar é que esse material deve garantir boa condução térmica e apresentar estabilidade química e física (BANDEIRA, 2015).

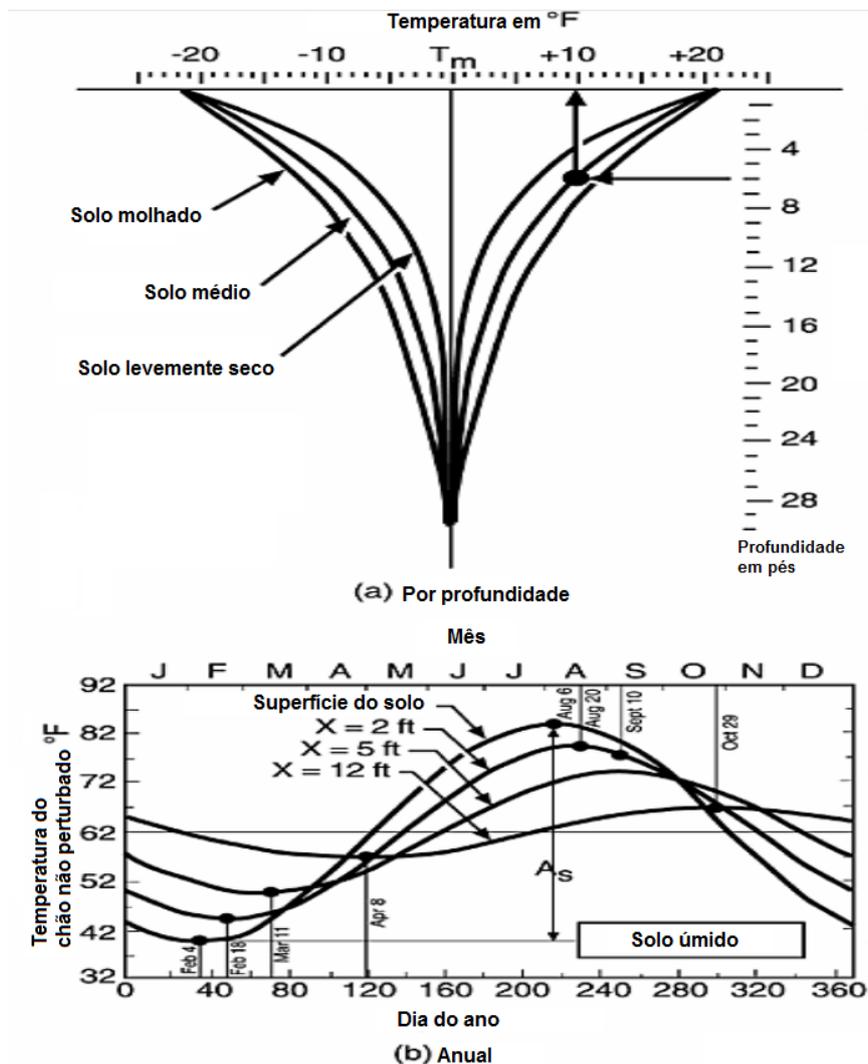
Observando que ocorre apenas troca de calor, não é interessante que exista também algum fluxo de massa, como o existente em casos de lençol freático. Se existir a presença de fluxo de água, isso também irá permitir trocas térmicas inesperadas para a realização do ensaio. Inclusive, de acordo com Bandeira (2015), a presença de um fluxo de lençol freático foi o motivo pelo qual o ensaio em solo brasileiro ocorreu com profundidade máxima de 12 metros – apesar de suas conclusões apontarem que houve momentos em que o lençol freático atingiu profundidade de 10 metros sem alterar significativamente os resultados encontrados pelo ensaio.

Já considerando os resultados encontrados ao realizar esse teste em diversas localidades no mundo, é possível perceber qual comportamento do solo é esperado. Para ilustrar uma média de temperaturas encontradas em um ensaio em Ottawa, Canadá, Vilela (2004) fornece o seguinte gráfico na Figura 4.3.



**Figura 4.3 - Comportamento da faixa de temperatura do solo de Ottawa (VILELA, 2004)**

Outra imagem (Figura 4.4) combina dois gráficos interessantes que descrevem o comportamento da temperatura média do solo nos Estados Unidos.



**Figura 4.4 - Variação de temperatura média nos Estados Unidos (VILELA, 2004 apud U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1998)**

Com auxílio da Figura 4.4 (a), é possível identificar as variações de comportamento da temperatura do solo do país norte-americano em relação às diferentes condições de umidade do solo em conjunto com a profundidade. Enquanto na Figura 4.4 (b), percebe-se que a sazonalidade desta temperatura tem uma relação de senóide ao longo do ano, sendo que essa se torna cada vez menos acentuada de acordo com a profundidade.

O ensaio é relativamente simples, pois para identificar os parâmetros, é necessário injetar ou retirar calor a uma taxa constante e analisar a resposta do solo diante dessa situação.

O ensaio consiste em um reservatório de água revestido termicamente. Na saída do reservatório, é conectado o aquecedor seguido por uma bomba, e o medidor de vazão, este é conectado na tampa superior da estaca, previamente instalada. Isso faz com que a entrada de água ocorra pelo tubo externo, no qual a maior parte da troca de calor com o solo acontecerá.

O tubo interno coaxial é responsável pela subida da água e é conectado na tampa superior que, através de tubos, são conectados na alimentação do reservatório, fechando o ciclo. Quanto aos termopares, é necessário medir ao menos a temperatura de entrada e de saída da estaca, o que é capaz de trazer boa estimativa do comportamento térmico do solo.

### 4.3 PROCEDIMENTOS

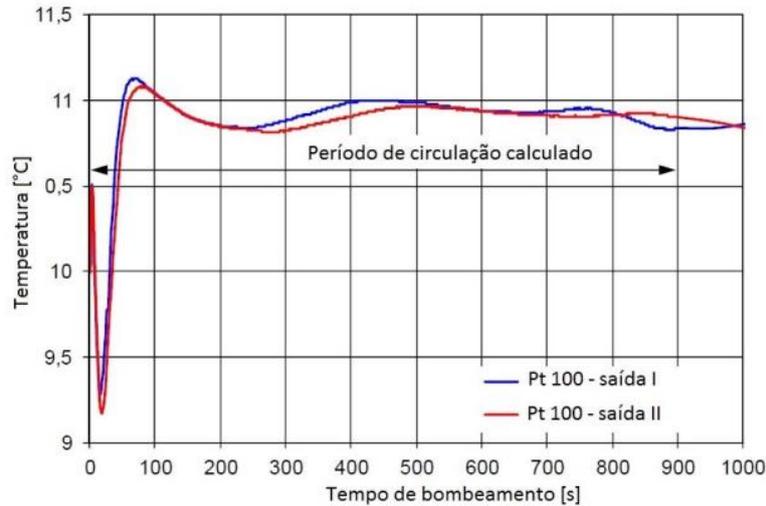
Para a realização de um ensaio utilizando-se de boa prática, é necessário identificar se o equipamento utilizado é adequado para garantir a validade dos resultados. De acordo com o Eurocode (CEN/TC 341 N525, 2011), utilizado por Bandeira (2015), é necessário garantir que o escoamento na estaca seja turbulento. Por isso, é preciso fazer o cálculo de velocidade crítica do escoamento, utilizando os parâmetros corretos de rugosidade do tubo utilizado.

Outro fator importante para ser considerado, lembrando que a busca é por maiores taxas de transferência de calor por condução entre a parede da estaca e o solo, é necessário haver aderência entre a estaca e o solo. Por isso é recomendado à espera de alguns dias após a aplicação para realizar experimentos.

Bandeira (2015) comenta novamente a norma CEN/TC 341 N525 (2011) para destacar a importância de esperar ao menos três dias desde a aplicação da estaca ao solo em casos onde se espera alta taxa de condutividade térmica do solo; e cinco dias para casos onde se espera baixa condutividade térmica.

Para também alimentar as equações de análise de dados, é necessário identificar a temperatura do solo sem a perturbação térmica. É possível identificar tais parâmetros simplesmente ligando a circulação de água sem o aquecimento e registrar a temperatura em função do tempo. É preciso garantir que o escoamento seja turbulento para a máxima troca de calor, e também considerar que os dados registrados no início do experimento são bastante flutuantes e deverão ser descartados (BANDEIRA, 2015 apud ECES, 2013).

Outro ponto interessante é que não há necessidade de identificar a temperatura em diferentes pontos ao longo da estaca, caso o desejo seja apenas utilizar aplicações de armazenamento energético, como é o caso de aplicações de bombas de calor acopladas ao solo com finalidade de climatização predial (BANDEIRA, 2015 apud ESKILSON, 1987). Mas como a intenção deste projeto é identificar as diferentes faixas de temperatura do solo a fim de mapear o solo brasileiro, no projeto da estaca será considerada a aplicação de diferentes termopares em termos de profundidade. Um exemplo de resultado referente à circulação sem potência térmica encontra-se na Figura 4.5.



**Figura 4.5 - Medição de temperatura com circulação de água sem aquecimento (BANDEIRA, 2015 apud ECES, 2013)**

Definido esse parâmetro, é possível ligar o aquecedor, mas também é importante saber que somente após um determinado tempo, haverá a estabilização da taxa de transferência de calor. O tempo mínimo de realização do experimento, de acordo com a norma CEN/TC 341 N525, deverá ser de pelo menos 48 horas. Ou, em casos particulares, o tempo mínimo deverá ser calculado pela Equação 13 (GEHLIN, 2002):

$$t_1 = \frac{20 \cdot r_0^2}{\alpha} \quad (13)$$

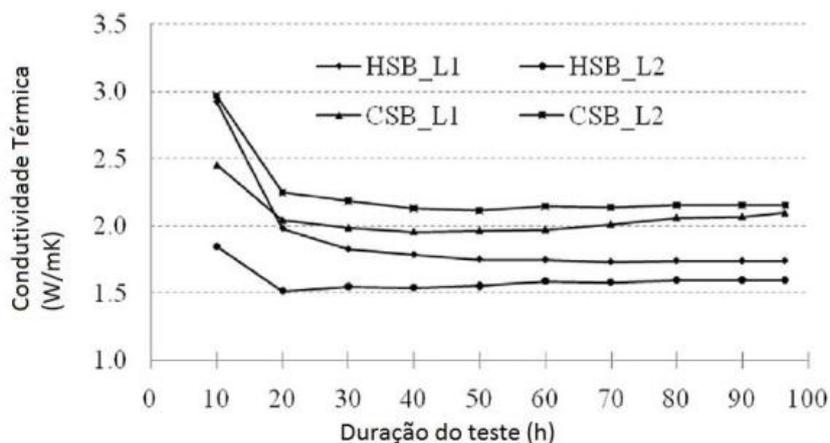
Sendo que os parâmetros  $t_0$  e  $r_0$ , são o tempo de ensaio em segundos e o raio da estaca em metros. O termo  $\alpha$  é calculado pela Equação 14:

$$\alpha = \frac{\lambda_{est}}{\rho c_p} \quad (14)$$

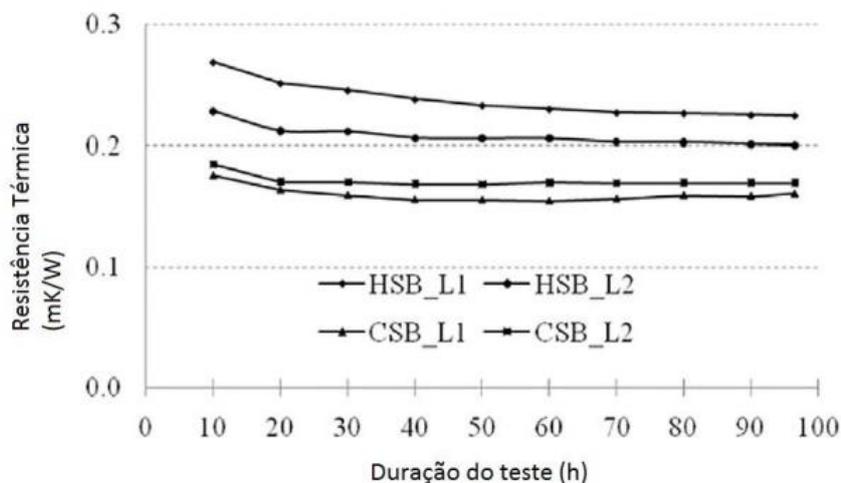
Onde  $\lambda$  é a condutividade térmica esperada, em (W/m/K), e  $\rho c_p$  é a capacidade térmica volumétrica em (J/m<sup>3</sup>/K) e  $\alpha$  é chamado de difusividade térmica.

Como é possível perceber, na Figura 15 existe um período de estabilização da temperatura medida. O mesmo acontece para quando o aquecedor é ligado, e considerando o tratamento de dados, é necessário o descarte do início do experimento. Existem várias recomendações por parte da bibliografia, sendo que de acordo com Gehlin (2002) seria necessário descarte de 12 a 20 horas iniciais, enquanto Bandeira (2015, apud LHENDUP, 2011) mostra em termos práticos de ensaios TRT que deve-se considerar o descarte das 20 horas iniciais do experimento.

Na Figura 4.6, compreende-se que ao relacionar a condutividade térmica do solo em relação ao tempo, calculado a partir dos dados de temperatura recolhidos do experimento, é possível constatar que existe alta flutuação dos valores nas 20 primeiras horas do experimento. O mesmo padrão também é percebido na Figura 4.7 quanto ao cálculo da resistência térmica do solo em relação ao tempo.



**Figura 4.6 - Condutividade térmica em relação ao tempo para quatro experimentos (BANDEIRA apud LHENDUP, 2015)**



**Figura 4.7 - Resistência térmica em relação ao tempo para quatro experimentos (BANDEIRA apud LHENDUP, 2015)**

Ainda de acordo com Bandeira (2015), em casos de testes em solos de alta condutividade térmica, se houver a necessidade de descartar algum experimento deve-se esperar 10 dias para realizar um novo experimento. Em casos de experimento em solos de baixa condutividade térmica, deve-se esperar 14 dias para a realização.

O ensaio completo deverá ter um sistema de aquisição de dados capaz de medir: a temperatura do fluido circulante logo antes de entrar na estaca trocadora de calor; a temperatura do mesmo, logo após sair da estaca; a quantidade de calor acrescentada ao

sistema; a tensão de alimentação; e as condições ambientes. Esses fatores fazem parte do método de análise de resultados descritos no capítulo seguinte.

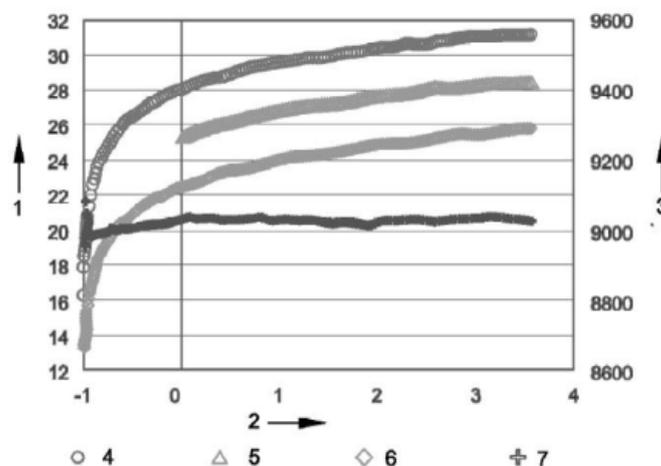
Com os valores de resistência e condutividade térmica em mãos, é possível, então, rever o cálculo de tempo de ensaio necessário de acordo com as Equações 13 e 14, caso os valores estimados previamente sejam muito diferentes dos medidos.

## 5 ANÁLISE TEÓRICA DO PROBLEMA

*Este capítulo visa apresentar algumas instruções à serem consideradas na elaboração do problema matemático para o Teste de Resposta Térmica.*

Ao iniciar uma busca quanto ao método a ser utilizado para a análise de dados, encontram-se duas alternativas dispostas pela norma europeia do Teste de Resposta Térmica. De acordo com Bandeira (apud CEN/TC 341 N525, 2015), elas são o método da aproximação da fonte linear ou o método numérico de simulação com fonte cilíndrica. O método mais utilizado na Europa é o teorema da fonte linear, enquanto nos Estados Unidos o mais comum é a utilização do teorema da fonte cilíndrica. Neste trabalho, a opção escolhida foi analisar o método da fonte linear.

Uma característica importante referente a esse teorema é o fato de que ele só deve ser utilizado caso a relação temperatura pelo tempo mantenha uma reta ao sofrer linearização logarítmica. Esse comportamento pode ser visualizado nas Figuras 5.1 e 5.2, pois o coeficiente angular de tal reta possui significado físico nos cálculos.



**Figura 5.1 - Gráfico em relação ao tempo de experimento TRT de exemplo apresentado na norma (BANDEIRA apud CEN/TC 341 N525, 2015)**

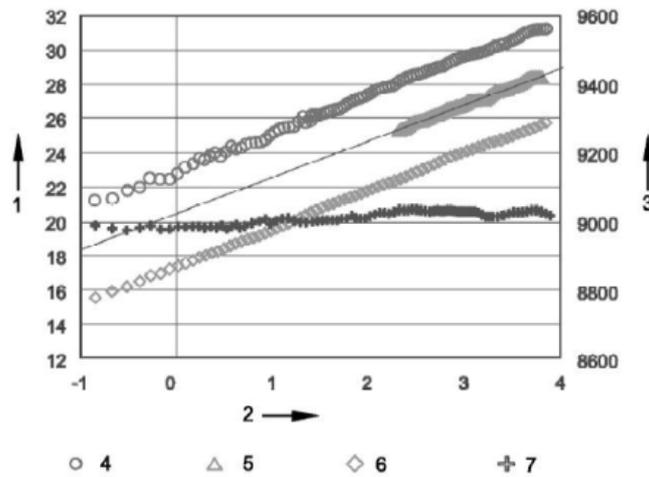


Figura 5.2 - Gráfico de experimento TRT com o tempo em escala logarítima apresentado na norma (BANDEIRA apud CEN/TC 341 N525, 2015)

No qual: 1 - Temperatura [°C]; 2 - Tempo [s]; 3 - Aquecimento [W]; 4 - Temperatura na entrada; 5 - Média de temperaturas entre 10 e 43.3 horas; 6 - Temperatura na saída; 7 - Taxa de calor.

## 5.1 TEOREMA DA FONTE LINEAR

A respeito do teorema da fonte linear, é importante ressaltar as considerações feitas para a determinação do problema matemático. A simplificação do teorema da fonte linear de Kelvin considera a situação de uma fonte de calor infinitamente longa e permanente, imersa em ambiente homogêneo e transferindo calor a uma taxa constante para o meio, que se encontra à uma temperatura inicial (BANDEIRA, 2015 apud ELMOZUGHY, 2009). O que seria bastante coerente com a situação da estaca, sendo uma fonte de calor constante imersa em um solo homogêneo com temperatura inicial  $T_0$ . Também é desconsiderada a presença de fluxo de água subterrânea e efeitos de ponta da estaca.

De acordo com Gehlin (2002, apud CARSLAW & JAEGER, 2002), chega-se, então, à Equação 15, que fornece a relação entre a temperatura do solo em função do tempo e o raio ao redor de uma fonte linear de injeção de calor a uma taxa constante, o que seria a situação de estaca trocadora de calor.

$$T^q(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1(r^2/4\alpha t) \quad (15)$$

Segundo Gehlin (2002), considera-se agora que se  $\alpha t / r^2 \geq 5$ , o erro esperado será de 10 % e caso seja  $\geq 20$ , o erro associado cai para 2,5 %. Também é sabido que  $E_1$  é uma integral exponencial e que pode ser aproximada pela relação disposta na Equação 16:

$$E_1(r^2/4\alpha t) = \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \quad (16)$$

Onde  $\gamma$  representa a constante de Euler (0.5772...)

Com os dados da temperatura do fluido medidas no ensaio em mãos, a relação entre essa temperatura e a parede da estaca é descrita pela Equação 17.

$$T_f^q(t) = T_e^q(t) + q \cdot R_b \quad (17)$$

Sabendo que  $R_b$  corresponde à resistência térmica entre o fluido nos tubos e a parede do solo. Importante comentar também que o índice 'q' mostrado nos parâmetros de temperatura significa que esta é a temperatura resultante devido ao pulso de calor 'q'. Portanto podemos escrever a Equação 18 que representa a variação de temperatura do fluido em função do tempo (GEHLIN, 2002).

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \left( \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right) + q \cdot R_b + T_0 \quad (18)$$

Na qual  $T_0$  significa a temperatura do solo sem o distúrbio energético provocado. Ainda segundo (GEHLIN, 2002) é possível utilizar diferentes aproximações para este teorema, o que é discutido por diversos pesquisadores.

Segundo Gehlin (2002), esse método foi utilizado por Gehlin e Eklof (1996), por Gehlin e Nordell (1998), por Sanner (et al, 2000) e por Cruickshanks (et al, 2000) para a determinação da condutividade térmica do solo com o propósito de aplicar sistema de reserva energética. Essa implementação é concluída determinando o coeficiente angular da curva encontrada na Figura 5.2, que pode ser aproximada pelas Equações 19 e 20.

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (19)$$

Sendo que 'k' é o coeficiente angular da curva.

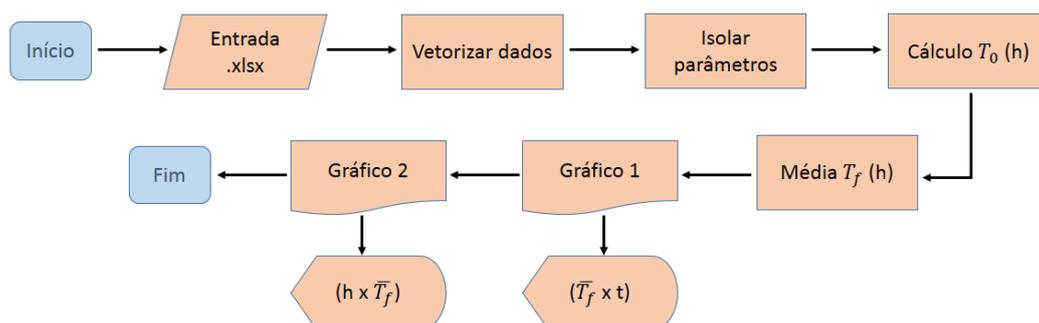
$$k = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (20)$$

É necessário lembrar se existem possíveis fontes de distúrbios energéticos na região, como dutos de esgoto em que circula água a diferentes temperaturas, podendo afetar a correta determinação dos parâmetros desejados.

## 5.2 ALGORITMO DESENVOLVIDO

Buscando desenvolver um método efetivo para o tratamento dos dados dispostos pelo sistema de aquisição, é preciso lembrar quais parâmetros serão registrados por esse sistema. Sabe-se que o método do teorema da fonte cilíndrica é muito complexo e, por isso, menos utilizado. É baseado na simulação, percorrendo vários resultados até que os valores de condutividade térmica e resistência térmica converjam para valores esperados experimentalmente. Isso significa que o modelo busca prever os resultados registrados na calibração do equipamento e isso torna o método inviável.

Foi utilizado neste projeto o software MatLab para o desenvolvimento do algoritmo computacional do teorema da fonte linear, que se encontra no Anexo A. Utilizando uma função para importar um arquivo .xlsx contendo colunas que representam na primeira posição os diferentes tempos medidos; e nas colunas subsequentes os valores correspondentes a cada variação em relação à profundidade. Então, o algoritmo calcula os valores correspondentes às temperaturas do solo sem a perturbação energética em relação a cada profundidade em que os termopares foram posicionados. O diagrama de blocos contendo os passos a serem executados pelo algoritmo é representado na Figura 5.3.



**Figura 5.3 - Diagrama de blocos das atividades do algoritmo.**

Portanto, os dados a serem coletados, que também governam as equações do algoritmo, são a temperatura de entrada e de saída da estaca, a temperatura ambiente, a energia depositada na estaca e a tensão de alimentação, todos esses em relação ao tempo.

Para o desenvolvimento desse algoritmo, foi levado em conta que o tempo de ensaio é variável, e, portanto, o código deve repetir o cálculo de acordo com a quantidade de medidas

registradas pelo sistema de aquisição de dados. Neste projeto, também foi considerada a possibilidade de adequar mais termopares ao longo da estaca e, assim, identificar diferentes faixas de temperatura em função da profundidade.

### 5.3 RESULTADOS DO ALGORITMO

Como resultado, o algoritmo plota curvas importantes para a compreensão do problema. Estes gráficos são as relações de temperatura de entrada e de saída do fluido pelo tempo e a temperatura do fluido em cada profundidade medida.

Como este trabalho não obteve coleta de dados experimentais, pode-se apenas estimar qual a forma da curva esperada pelo problema.

Assim, chega-se ao resultado do modelo matemático nas Figuras 5.4 e 5.5, que trazem a relação esperada do comportamento térmico do solo.

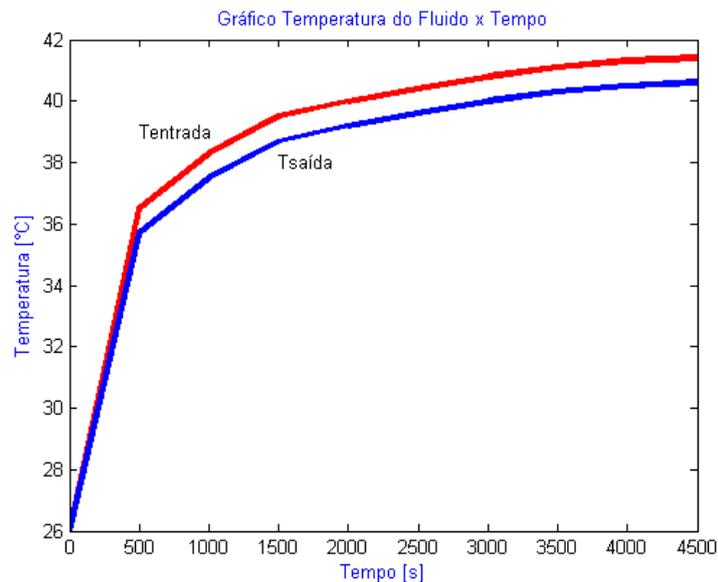
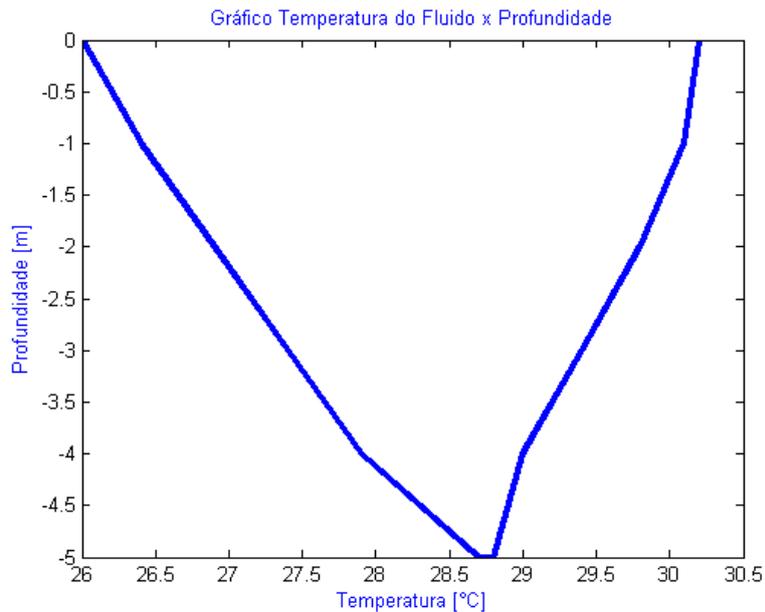


Figura 5.4 - Gráfico do comportamento esperado da temperatura do fluido em função do tempo



**Figura 5.5 - Gráfico do comportamento esperado da temperatura do fluido em relação à profundidade**

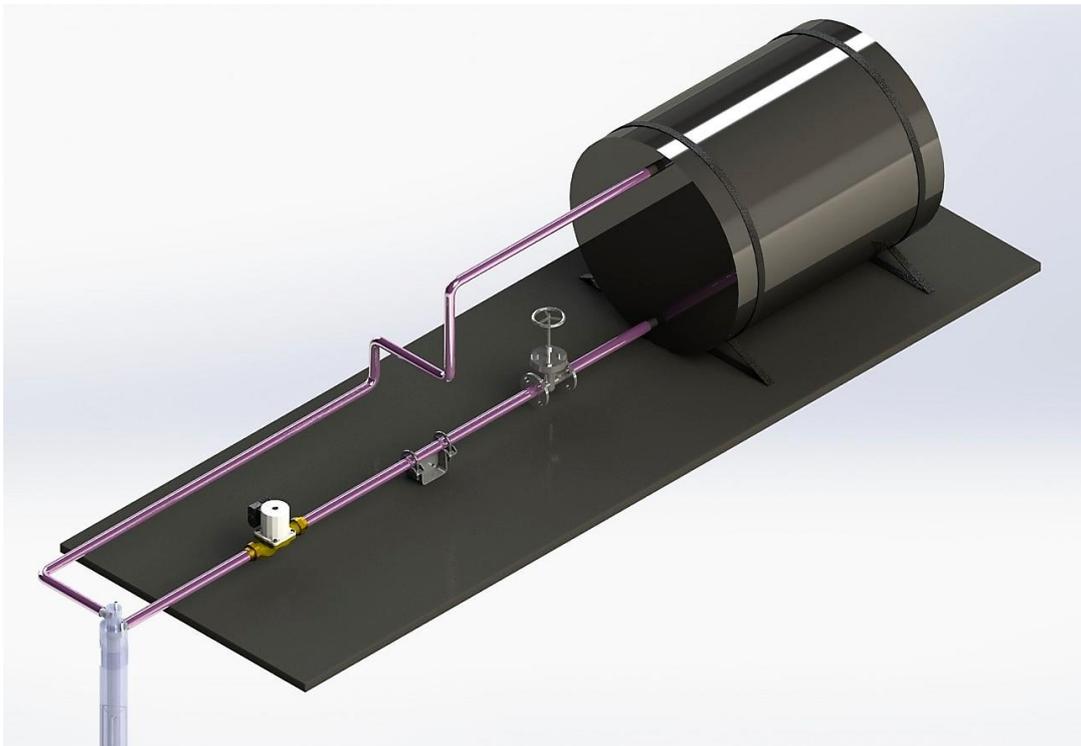
Com relação à Figura 5.4, é possível perceber que as duas curvas, de temperatura de entrada e de saída da sonda, iniciam o experimento com valores bem próximos. Tal fato ocorre devido à necessidade de o sistema estabilizar a taxa de transferência de calor, que, como comentado previamente, pode levar até 20 horas para acontecer.

No gráfico apresentado na Figura 5.5, é visível que a transferência de calor do fluido para o solo acontece nos sentidos de descida e de subida do fluido, pois a temperatura do fluido sempre tende a diminuir. De acordo com a configuração da geometria da estaca, esta curva sofre alterações no ponto de maior profundidade, significando que houve maior transferência de calor na descida ou na subida do fluido.

## 6 PROJETO DO APARATO EXPERIMENTAL

*Este capítulo contém o projeto do equipamento necessário para a análise do comportamento geotérmico brasileiro.*

O equipamento necessário para a realização do ensaio consiste em uma bomba para forçar a circulação de água, um medidor de vazão, tubos flexíveis e rígidos, conexões, reservatório de água com isolante térmico, aquecedor de água, sensores de temperatura e sistema de aquisição de dados apropriado. A Figura 6.1 mostra um esquema simplificado do projeto. O desenho de conjunto encontra-se no Anexo C.



**Figura 6.1 - Desenho esquemático do sistema (GEHLIN, 2002)**

Além dos componentes identificados na Figura 6.1, é necessário lembrar que a estaca enterrada será alimentada por tubos flexíveis de PEAD.

Para identificar as faixas de temperatura do solo em função da profundidade e melhor ajustar os parâmetros de resistência térmica entre o fluido aquecido e à estaca, este projeto também oferece a possibilidade de adequar termopares ao longo da estaca. Ao obter valores da temperatura do fluido em cada profundidade, em ambos os sentidos, é possível identificar a resistência e a condutividade térmica da estaca. A temperatura do solo não perturbado por este acréscimo energético devido ao aquecedor, em cada faixa de profundidade, também é calculada com esses valores.

Como a busca está focada na maior taxa de transferência de calor, ao idealizar a estaca trocadora de calor, foi pensada a maior área de contato com o solo para, então, obter maior

precisão quanto aos resultados obtidos. Para isso, o projeto foi baseado na estaca de cilindros concêntricos, mostrado na Figura 4.2. Ao longo deste capítulo, encontram-se todos os componentes necessários para a construção da sonda.

## 6.1 SELEÇÃO DA BOMBA

Para o projeto da estaca, é necessário considerar buscar a maior taxa de dissipação de calor para o solo. Então, de acordo com Bandeira (2015, apud CEN/TC 341 N525, 2011) deve-se ter o escoamento transiente durante todo o ensaio. Para isso, é preciso garantir que a velocidade do fluido nas determinadas condições seja maior que o valor calculado na fórmula de velocidade crítica do escoamento. Para manter o escoamento turbulento em tubos de paredes lisas, deve-se considerar o número de Reynolds (BANDEIRA, 2015) de acordo com a expressão  $Rey \geq 3000$ .

Portanto, chega-se à Equação 21:

$$\frac{u \cdot \epsilon}{\nu} \geq 70 \quad (21)$$

Na qual o termo “u” é a velocidade de atrito do fluido,  $\epsilon$  é a rugosidade da parede do tubo considerado (0.005) e  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Portanto, chega-se à Equação 22, que representa o fator de atrito da tubulação.

$$f = \left[ \left( \frac{64}{Rey} \right)^8 + 9.5 \left[ \ln \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.4}{Rey^{0.9}} \right) - \left( \frac{2500^6}{Rey} \right) \right]^{-16} \right]^{0.125} \quad (22)$$

Considerando “D” como o diâmetro da tubulação e utilizando os valores equivalentes aos materiais utilizados, encontra-se o valor de  $f = 0.1076$ .

E então, chega-se à velocidade média necessária do fluido para garantir que o escoamento seja turbulento de acordo com a Equação 23.

$$\frac{v}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (23)$$

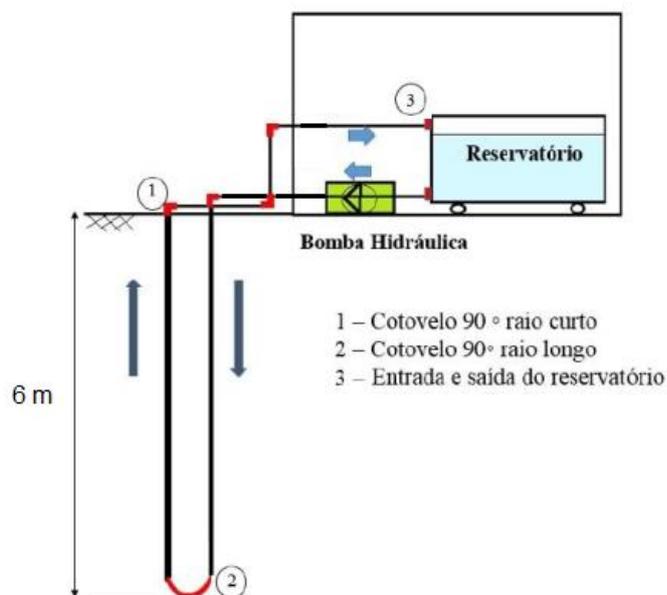
Aplicando valores conhecidos na Equação 23, o valor obtido da velocidade média do fluido será de 0.1207 m/s. Considerando, também, que a vazão é uma relação da velocidade e da área da seção na qual o fluido circula, há a Equação 24 para informar a vazão necessária para a situação, considerando a maior área entre os tubos.

$$Q = VA \Rightarrow Q = 0.6071/s \quad (24)$$

A partir disso, é possível calcular a potência da bomba necessária para garantir o escoamento turbulento pela Equação 25 a seguir.

$$P = \frac{9.8QH}{\nu} \quad (25)$$

Importante ressaltar que a potência calculada está em cavalo vapor [cv] e que H significa a perda de carga referente ao problema. Ao considerar o cálculo de perda de carga, foi utilizada a equação da Tabela 6.1, de acordo com Bandeira (2015, apud FAIR-WHIPPLE-HSIAO, 1981). E no caso da rugosidade específica do material, foi considerada a utilização de PVC, pelo motivo de não haver bibliografia a respeito de PEAD (Polietileno de Alta Densidade). Então, com auxílio de Bandeira (2015 apud LUCCHESI, 2014), foi feito o cálculo de perda de carga aproximada, pois como pode-se ver na Figura 6.2, trata-se de uma aproximação devido ao sistema ser do tipo coaxial. Portanto, foi considerada a perda de carga como um cotovelo 90° raio longo.



**Figura 6.2 - Esquema simplificado utilizado para cálculo estimado de perda de carga (BANDEIRA apud LUCCHESI, 2015)**

Para o cálculo desta perda de carga foi considerada a existência de perda de carga localizada e distribuída. Para concluir esta etapa do projeto, seguiu-se as Equações 26 e 27.

$$J = 0.0008695 \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} \quad (26)$$

Sendo que,

$$\Delta H = J \cdot L_{total} \quad (27)$$

E, portanto, chega-se à Tabela 6.1, que contém os resultados do cálculo de perda de carga total na tubulação do sistema.

Tabela 6.1 – Perdas de cargas na tubulação.

Componente	Equação correspondente	L resultante [m]
Entrada/Saída	$L_b = -0.05 + 30.98D$	0.73
Cotovelos longos	$L_t = 0.054 + 20.90D$	0.58
Cotovelos curtos	$L_e = 0.0189 + 30.53D$	0.96
Total	$(4L_e + 2L_t + 2L_b) \cdot J$	6.06

A partir disso, é possível fazer o cálculo da potência da bomba necessária para garantir que o escoamento ocorra como esperado pela Equação 28.

$$P = \frac{9.8QH}{\eta} = 0.0288[cv] = 21.1562[W] \quad (28)$$

Como é possível perceber, o resultado do cálculo da potência necessária é baixo, tornando a aquisição da bomba facilitada. Trata-se de um escoamento de baixa intensidade, pois como foi calculado previamente na Equação 24, a vazão a ser imposta no sistema é da ordem de 0.6 [l/s] ou 2.16 [m³/h].

Portanto, utilizou-se o modelo Solaris 200, do catálogo do fabricante Schneider Motobombas (Anexo B). A bomba selecionada tem capacidade de vazão de 2.6 [m³/h] e altura manométrica total de 7 [m.c.a], atendendo aos requisitos necessários.

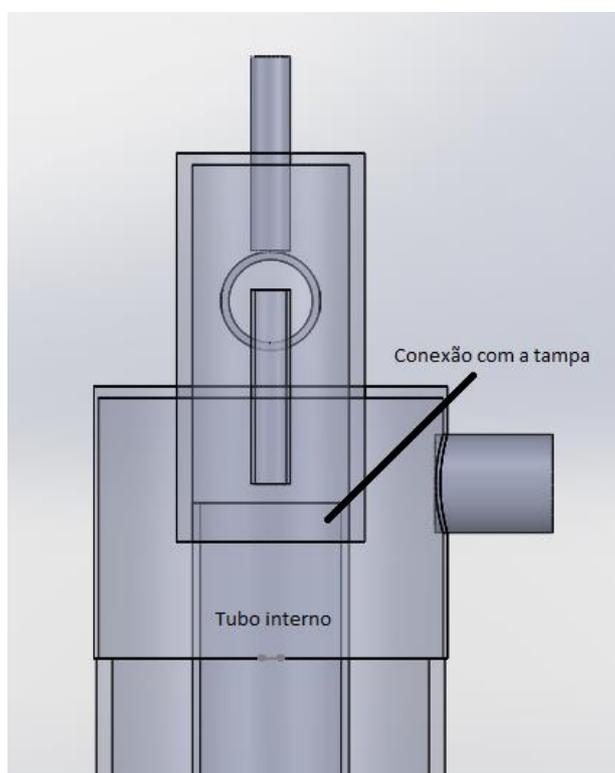
## 6.2 DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DA ESTACA

Pensando nos materiais a serem utilizados na sonda coaxial, foi feita uma seleção de acordo com o catálogo de tubos de aço carbono da empresa Cemil, no Anexo 2, optando pelo tubo externo de aço galvanizado de 3 polegadas (aproximadamente 76.2 mm) de diâmetro externo e 3.05 mm de parede. Quanto à espessura da parede do tubo, foi selecionada a menor encontrada, pois o mesmo não possui carregamentos consideráveis de carga nem a situação de esforço por fadiga; e, também, a transferência de calor será superior devido à menor inércia térmica.

No catálogo comentado também é possível selecionar o tampão inferior do tubo externo, responsável por isolar a alimentação de água, para que não seja despejada no solo. A

adequação do tampão inferior será feita por rosqueamento. O fabricante dá a opção de escolher o tipo de rosca, NPT ou BSP, e foi optada a rosca no padrão NPT.

Quanto ao tubo interno, foi utilizado outro catálogo, da empresa Aflon (Anexo B), que contém as informações referentes a tubos de PEAD em relação aos diâmetros. Foi selecionado, então, o tubo com 40 mm de diâmetro externo e 2.3 mm de espessura da parede. Uma etapa importante do projeto é o desenvolvimento da tampa superior, que é responsável por permitir a entrada e a saída de água e também deve ser capaz de separar os compartimentos com fluxos diferentes. Como externamente a água descera e internamente ela subirá, a tampa deve ser capaz de isolar principalmente o retorno da água. Para isso, o tubo interno será encaixado em outro tubo da tampa logo antes da saída, como pode-se perceber na Figura 6.3.



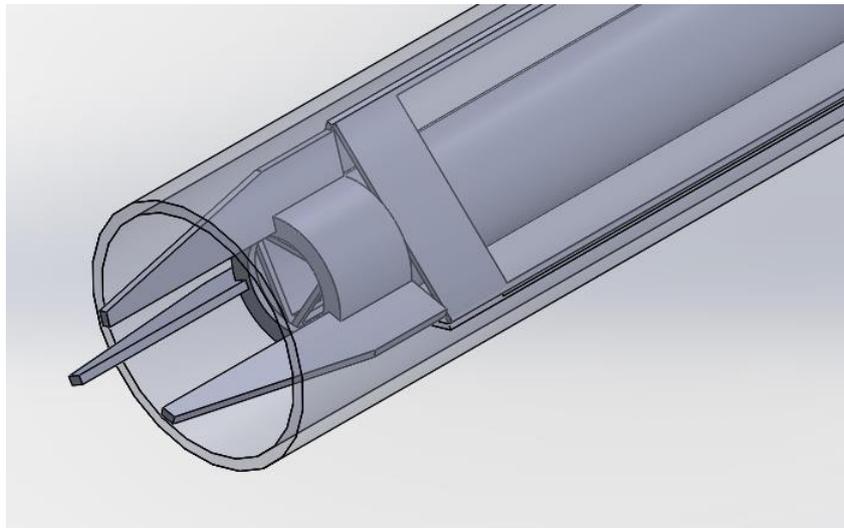
**Figura 6.3 - Detalhe conexão entre tubo interno e tampa superior.**

Para o projeto desta tampa, será necessário usinar um tarugo de aço de 4 polegadas de diâmetro (aproximadamente 101.6 mm) e 100 mm de comprimento para ser a primeira parte da tampa. Essa etapa é a responsável pela alimentação de água da estaca. Enquanto para a construção da segunda etapa da tampa será necessário usinar um tarugo de aço de 50 mm de diâmetro e 170 mm de comprimento. Esses valores já consideram as perdas relacionadas à usinagem.

Ainda para completar a construção da tampa, é necessário soldar os tubos responsáveis pela circulação de água e também os dois pequenos tubos adequados para a saída dos cabos

dos termopares que estarão alocados dentro da sonda. Como a tampa não sofre esforço mecânico, a solda é apenas para vedação. São, então, dois tubos de 1 polegada de diâmetro, 3 mm de parede e 100 mm de comprimento soldados, para entrada e saída de água e dois tubos de 10 mm de diâmetro, 2 mm de espessura e 50 mm de comprimento.

Também foi necessário pensar em uma solução para garantir que o tubo interno não chegue a ficar encostado no fundo da sonda e, dessa forma, interrompa o fluxo de água. Para isso, foi dimensionado um suporte que será adequado em um anel que estará encaixado na ponta do tubo, como é possível ver na Figura 6.4. O suporte será feito de chapa de aço de 3 mm de espessura, e como o peso total do tubo interno que será apoiado neste suporte é pequeno, não houve necessidade de cálculo de esforços no mesmo.



**Figura 6.4 - Detalhe suporte inferior - vista isométrica**

Outros pontos importantes são garantir a excentricidade entre os dois tubos e permitir a fixação dos termopares. Para isso, idealizou-se uma estrutura interna, que por não necessitar de muitos esforços estruturais, será feita em arame de 2 [mm] de espessura de fio, o que pode ser facilmente encontrado no mercado. Pode-se perceber na Figura 26 que esse suporte possui design triangular inscrito no tubo maior, com aresta de 69 [mm], e circunscrito ao tubo menor, com aresta de 31 [mm]. Serão utilizados cerca de 40 metros de arame para a construção desses suportes.

### **6.3 SELEÇÃO DO RESERVATÓRIO E AQUECEDOR**

Concluída a etapa da concepção e dimensionamento das peças a serem utilizadas para a construção da sonda, pode-se fazer o estudo responsável por equipamentos que não possuem

viabilidade de projeto, pois são facilmente encontrados no mercado. São eles: o reservatório de água, o aquecedor a ser utilizado, o controle de vazão e o sistema de aquisição de dados.

Em busca da maior viabilidade, visando alguns aspectos como a funcionalidade, o espaço a ser alocado, o custo e também a versatilidade do dispositivo, foi selecionado o reservatório de água com revestimento térmico. Devido à alta procura no mercado de soluções de aquecimento solar, é possível encontrar esse tipo de reservatório com certa facilidade e, por consequência, é possível também encontrar menores custos do que o esperado com o selecionado neste relatório.

Analisando o catálogo da empresa Jelly Fish, Anexo B, de equipamentos para soluções em aquecimento de água por meio de energia solar, foi selecionado um reservatório com capacidade de 200 litros, que pode ser acoplado a um aquecedor elétrico de 3000 W de potência. Ele será responsável pela energia dissipada no solo. Apesar de ser possível encontrar na bibliografia experimentos TRT que utilizaram semelhantes reservatórios do tipo boiler com capacidade de 100 litros, não foi possível encontrar nos catálogos pesquisados – por isso, permaneceu a opção encontrada.

## **6.4 SELEÇÃO DO CONTROLE DE VAZÃO**

Quanto ao sistema de controle de vazão, é necessário apenas que exista controle quanto aos valores medidos. Seria possível utilizar até mesmo algum modelo utilizado pela concessionária de distribuição de água; basta fazer o correto registro do relógio mostrador exatamente antes do ensaio e exatamente depois de realizado.

Diante dessas informações, foi selecionado no catálogo do fabricante Tecno Fluid um medidor de vazão que se adequa às especificações necessárias. O modelo selecionado foi o de código 025 com diâmetro de 1 polegada, que é o diâmetro da tubulação de alimentação e retorno ao reservatório, e com capacidade de medição de 0.9 a 13.8 [m<sup>3</sup>/h] no caso de líquidos. Para garantir exatidão na medida, é preciso espaçar o controle de vazão em 1 metro de distância da bomba, o que está previsto no esquema da Figura 6.1. O catálogo encontra-se no Anexo B.

## **6.5 SELEÇÃO DE DISPOSITIVOS CONTRA VAZAMENTOS**

Visto que é necessário garantir que não exista vazamento de água em nenhum ponto, a adequação dos tubos alimentadores saindo da bomba e chegando no reservatório (retorno) serão feitos com abraçadeiras. Outro ponto importante à respeito disso são as saídas dos fios

dos termopares, que utilizarão um dispositivo de prensa cabos selecionado pelo catálogo, no Anexo B, que utiliza a norma DIN 46320.

Outro fator pensado quanto à concepção desta sonda é que deve-se garantir que não haverá contaminação por parte de fluidos na união entre o tubo interno e a tampa superior. Tal falta de aderência entre estes componentes pode provocar a invalidação do experimento, e portanto foi pensado em adequar anéis de borracha para garantir a vedação. Para isso utilizou-se o catálogo do fabricante Parker Seals para a seleção dos anéis, e o selecionado é feito de etileno propileno com resistência à temperaturas entre  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sua recomendação de aplicação é para baixas temperaturas, água, vapor, fluidos de silicone, álcool e fluido de freio automotivo. O catálogo encontra-se no Anexo B.

## **6.6 SELEÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS**

Também foi feita uma análise de qual sistema de aquisição se adequaria ao projeto, pois sem o correto equipamento os resultados estariam comprometidos. Diante disso foi recomendado pela orientação do projeto que utilizasse termopares do Tipo T, e então buscou-se catálogos referentes aos termopares disponíveis no mercado. Tal informação só foi encontrada através de contato via email direto com a parte comercial de empresas, que no caso apenas a empresa Ecil forneceu os catálogos de sensores de temperatura e dos fios a serem utilizados.

Como está prevista a incorporação de uma série de termopares ao longo da estaca, também é importante garantir que eles tenham uma seção de área na saída pela tampa superior suficiente para a passagem de todos os fios dos termopares alocados. Ressaltando que haverá duas saídas para esses cabos, uma para o sentido de descida no fluxo de água e uma para o sentido de retorno do fluxo.

Finalmente, de acordo com o catálogo disposto no Anexo B, o tipo de sensor selecionado foi o Termopar Tipo T MS-10, e quanto ao fio utilizado será o do tipo TX, feito de cobre e constantan, com a espessura do fio de 20 AWG, equivalente à  $0.52\text{ [mm}^2\text{]}$  de área. Totalizando seis termopares em cada sentido e dois fios por sensor, chega-se ao total de  $6.24\text{ [mm}^2\text{]}$ , sendo que o raio da área disponível para essa transposição dos fios é de aproximadamente  $4\text{ [mm]}$  e a área correspondente é de  $50\text{ [mm}^2\text{]}$ . Então, é possível passar todos os fios pela tampa superior.

Observando que todos os componentes metálicos utilizados não sofrem esforços mecânicos consideráveis, selecionou-se a série 1010, devido ao menor custo de aquisição.

Portanto, é possível organizar todos os materiais a serem adquiridos de acordo com este projeto na Tabela 6.2:

**Tabela 6.2 – Lista de materiais e equipamentos selecionados**

<b>Descrição</b>	<b>Especificação</b>	<b>Qtd.</b>
Tubo Externo	Dext= 76.2 [mm], Dint = 70.1 [mm] x 6 [m]	1
Tubo Interno	Dext= 40 [mm], Dint = 36 [mm] x 6 [m]	1
Chapa Aço	Dimensões (3x150x150) [mm]	1
Tubo Aço	Dext= 10 [mm], Dint = 6 [mm] x 150 [mm]	1
Tubo Aço	Dext= 10 [mm], Dint = 6 [mm] x 150 [mm]	1
Tarugo Aço	D = 50 [mm], Comp. = 170 [mm]	1
Tarugo Aço	D = 115 [mm], Comp. = 110 [mm]	1
Rolo Arame	e = 2 [mm] x 40 [m]	1
Tubo Conexão	Dext= 30 [mm], Dint = 25.4 [mm] x 3 [m], PEAD	1
Abraçadeiras	D = 30 [mm] e D = 10 [mm]	12
Bomba	245[W]	1
Boiler	200 [l]	1
Aquecedor	3000 [W]	1
Controle Vazão	0.9 – 13.8[m <sup>3</sup> /h]	1
Aquisição Dados	16 canais	1
Termopares	Tipo T –MS-10	16
Fio Termopar	20 [AWG]	150 [m]

## 7 CONCLUSÃO

Existe uma grande falha no Brasil na abrangência dos mais variados tipos de fontes de energia, especialmente daqueles que são sustentáveis e renováveis, já que possuem menor impacto ambiental. A energia geotérmica tem espaço (e condições) para grandes aplicações no país e, neste relatório, foi possível adentrar nesse desafio, que é compreender a geotermia e cogitar aplicá-la. Encontrou-se um método bastante utilizado em outros lugares do mundo, que é a teoria da fonte linear, e também houve uma proposta de utilização deste teorema através da coleta de dados em campo e tratados com auxílio computacional.

Paralelo a isso, também houve a concepção total de uma sonda capaz de causar uma perturbação térmica no solo e, registrando seu comportamento, será possível identificar os parâmetros de resistência térmica, condutividade térmica, difusividade térmica e a temperatura do solo sem perturbação térmica.

Para o desenvolvimento do equipamento, foi utilizada a ideia de uma estaca de cilindros concêntricos, que permite maior taxa de transferência de calor devido à área de contato com o solo. Também para melhor aproveitar as transferências de calor o tubo interno deverá ser revestido com manta isolante térmica. Tais realizações permitem maiores precisões nos resultados obtidos.

Equipamentos de teste de resposta térmica, como o projetado neste relatório, ajudam a promover o mapeamento geotérmico do Brasil, o que é de grande importância para conseguir reduzir a emissão de gases de efeito estufa. A possibilidade de compreender esse comportamento do solo se dá pela maneira mais simples até hoje produzida: pela aplicação do teste de resposta térmica.

Por fim, como a literatura a respeito desse tipo de equipamento ainda é escassa no país, trabalhos que proponham soluções geotérmicas de climatização de ambientes devem ser incentivados nas universidades. Apenas com a pesquisa, o levantamento de dados e a divulgação de possibilidades não só acadêmicas, mas aplicáveis à realidade, uma produção em larga escala (que descentralize as fontes, evitando graves crises energéticas) será possível.

Quanto ao prosseguimento do experimento proposto, é indicado iniciar a construção da sonda assim que possível, e aplicá-la em campo para medir as características do solo. É possível, também, fazer a estimativa teórica desses parâmetros através da utilização de dados geológicos da região. Mas como abordado na revisão bibliográfica, esse resultado não é

suficiente para o projeto de soluções geotérmicas e serve apenas como opção de comparação entre métodos.

É também interessante a busca de melhores sistemas de aquisição de dados, pois como foi visto nas referências, são muito utilizadas tecnologias com cabos ópticos, possibilitando a aquisição de dados da temperatura da parede da estaca. Assim, é possível refinar o tratamento de dados e encontrar melhores aproximações com a realidade.

Por fim, outra alternativa interessante de ser trabalhada é a criação de uma estaca com maior alcance de profundidade. Para isso, é necessário uma nova concepção de sonda capaz de promover esta circulação de água carregada termicamente para, então, identificar a possibilidade real de utilização de energia geotérmica para tecnologias que auxiliem o ser humano sem prejudicar o meio ambiente.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBOIT, N. K. S. et al. **Potencialidade de Utilização da Energia Geotérmica no Brasil**. Revista do Departamento de Geografia – USP, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 155-168, 2013.

BANDEIRA NETO, L. A. **Estudo Experimental da Resposta Térmica de Fundações por Estacas Trocadoras de Calor em Solo não Saturado**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2015.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J.; KANOGLU, M. **Transferência de Calor e Massa. Uma Abordagem Prática**: 4. ed.; AMGH Editora Ltda., 2012.

EKLÖF, C; GEHLIN, S. **TED – A Mobile Equipment for Thermal Response Test**. 1996. 66 f. Tese (Mestrado em Water Resources Engineering) – Department of Environmental Planning and Design, Lulea University of Technology, Lulea, 1996.

GEHLIN, S. **Thermal Response Test: Method Development and Evaluation**. 2002. 191 f. Tese (Doutorado em Water Resources Engineering) – Department of Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea. 2002.

WASSER WARMEPUMPEN, **Bomba de Calor Geotérmica Vertical, Bomba de Calor Geotérmica Horizontal e Bomba de Calor de Ciclo Aberto** <[http://www.elektroschubert.de/html/wp\\_arten.html](http://www.elektroschubert.de/html/wp_arten.html)>. Acesso em: 10 de novembro de 2017.

MALLMANN, B. M. **Análise computacional do impacto da iluminação e dos vidros na demanda energética de um edifício comercial**. 2011. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011.

PIRES, J. A. F. MICHLES, A. **Estudo de um Trocador de Calor Geotérmico para Água de Condensação de um Sistema de Ar Condicionado Central, nas Condições de Solo de Santa Maria, RS**. 2015. 40 f. Monografia (Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Novo Hamburgo. 2015.

POMPE À CHALEUR GÉOTHERMIQUE, **Aplicação em estacas de fundação** <<https://www.batiproduits.com/liste/produits/pompe-a-chaleur-geothermique-o2226.html#>>. Acesso em 11 de novembro de 2017.

TAVARES, J. C. **Integração de Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas em Edifícios**. 2011. 62 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra. 2011.

VILELA, M. M. **Estudo de Método Experimental para Determinar a Potencialidade do Uso de Energia Geotérmica a Baixa Profundidade**. 2004. 273 f. Tese (Doutorado em Energia), Programa Interunidades de pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. 2004.

VERANO INSTALACIONES, **Ciclo de Bomba de Calor Geotérmica** <<http://www.veranoinstalaciones.com/que-es-una-bomba-de-calor-geotermica>>. Acesso em: 11 de novembro de 2017.

# ANEXOS

	Pág.
Anexo A Códigos de MatLab.	63
Anexo B Trechos dos catálogos utilizados no projeto e desenhos técnicos	67
Anexo C Desenhos	71

## ANEXO A: Códigos de MatLab

---

```
%% Calculo de Vazão - Estaca de Teste de Resposta Térmica

% Projeto de Graduação

% Eduardo Alves do Prado Reis - 09/0111494

%% Cálculo escoamento em tubo de parede lisa

clc;

clear all;

Rey = 3000; %numero de reynolds parede lisa

ep = 0.005; %rugosidade absoluta da parede da tubulação

v = 10 ^ -6; %viscosidade cinemática da água [m ^ 2/s]

D = 0.080; %diâmetro de tubo externo[m]

d = 0.036; %diâmetro do tubo interno [m]

rs= 4; %raio tubo fio sensores [mm]

u=70*v/ep; %velocidade de atrito

$f=(((64/Rey)^8)+9.5*(log((ep/(3.7*d)))+(5.74/Rey^0.9))-(2500/Rey)^6)^(-16))^0.125;

%fator de atrito da tubulação

vm=u*sqrt(8/f); %velocidade média agua [m/s]

%% Geometrias

Asensor=(rs^2)*pi; %Área para fio sensor[mm^2]

Amaior=((D/2)^2)*pi; %Área do tubo maior[m^2]

Amenor=((d/2)^2)*pi; %Área do tubo menor [m^2]

Q1=vm*Amaior; %Vazão tubo maior [m^3/s]

Q2=vm*Amenor; %Vazão tubo menor (real) [m^3/s]

Qreal=Q1-Q2; %Vazão da bomba [m^3/s]

Q1l=Q1*1000; %vazão litro [l/s]

Q2l=Q2*1000; %vazão litro [l/s]

Q2lm=Q2l*60; %vazão por minuto [l/min]
```

```

Qreal=Qreal*1000; % vazão [l/s]

h=6; % comprimento estaca [m]

vaestaca = A maior*h; % volume [m^3] de água na estaca

%% Cálculo potência bomba

pol=0.0254; % 1" diametro tubulação [m]

J=0.0008695*(Qreal^1.75)/d^4.75; % fator para calculo de perda de carga

le=0.189+30.53*pol; % perda de carga cotovelo curto 90 [m]

lt=0.054+20.90*pol; % perda de carga medidor vazão [m]

lb=-0.05+30.98*pol; % perda de carga entrada e saída borda [m]

l=4*le+2*lt+2*lb; % soma perda de carga tubulação [m]

dh=J*1; % altura correspondente de perda de carga [m]

H=dh+h; % perda de carga total [m]

P=9.8*Qreal*H; % potencia bomba [cv]

PW=P*735.49875; % Potência em Watt [W]

%% Cálculo aquecimento água

q=948; % 3000; % Potência aquecedor [W],[J/s]

m ponto=Qreal; % vazão massica [kg/s]

Sc=4186.8; % calor especifico agua [J/kg.K]

% q=m ponto*Sc*vartemp; % quantidade de calor [J/s]

vartemp=q/(m ponto*Sc); % \% variação de temperatura [K]

% P real=Sc*m ponto*(Tout-Tin); % Potência a considerar nas equações

%% Teorema da fonte linear

ti=25; % Temperatura ambiente medida[C]

rb=0.045; % raio da estaca [m]

rs=0.9; % raio no solo a partir da estaca [m]

lambda=2.8; % q/(4*pi*h); % condutividade térmica solo [W/mK]

Scv=2.91*10^6; % Capacidade calorífica volumétrica solo [Ws/m^3K]

```

```

%a=lambd/Scv; %difusidade térmica [lambda/c]
a=1.03*10^-6;$ %difusidade Bandeira[m^2/s]
qc=79; %(vartemp*mpono*Sc)/h; %taxa calor [W/m]
texp=(20*rb^2)/a;$ %calculo do tempo de experimento [s]
euler=0.5772; %numero Euler
f1=(vartemp/qc);%fator 1 eq abaixo
f2=(1/(4*pi*lambda));%fator 2 eq abaixo
f3=(log(4*a*texp/rb^2)-euler);%fator 3 eq abaixo
Rb=(vartemp/qc)-(1/(4*pi*lambda))*(log(4*a*texp/rb^2)-euler);%Resistência térmica solo
[K/(W/m)]
Rb=0.14; %resistência térmica[mK/W] %5*vartemp/qc; %eq.2.1 gehlin
faterro=a*texp/(rb^2)$; %(n fourrier)erro:2,5% se>20;10% se>5
E1=log(4*faterro)-euler; %Equação exp(3)Gehlin
Tf=(qc/(4*pi*lambda))*log(texp)+ti ; %Temperatura fluido [C]
Tq=(qc/(4*pi*lambda))*E1*((rs^2)/(4*a*texp));%Temperatura solo aquecido [C]
T0=Tf-(qc/(4*pi*lambda)*E1+qc*Rb); %Temperatura solo não perturbado [C]
t2=(qc/(4*pi*lambda)*E1+qc*Rb); %fator temp
%% Tratamento de dados de entrada
%Projeto de Graduação
%Eduardo Alves do Prado Reis - 09/0111494
%Teste de Resposta Térmica
clc
clear all
dados = 'entrada.xlsx'; %importa arquivo dados entrada
in = xlsread (dados); %vetoriza arquivo dados entrada
int= in.'; %dados entrada transposto
T1=int(2,:); %dado termopar 1

```

```

T2=int(3,:); %dado termopar 2
T3=int(4,:); %dado termopar 3
T4=int(5,:); %dado termopar 4
T5=int(6,:); %dado termopar 5
T6=int(7,:); %dado termopar 6
rb= 0.045; %raio da estaca [m]
Q=948; %3000; %Potência aquecedor [W],[J/s]
h=12; %profundidade estaca [m]
q=Q/h; %taxa calor da estaca
Rb=0.14; %resistência térmica[mK/W]
c1=q*Rb; %fator 1 da eq. governante
%Sc=4186.8; %calor especifico agua [J/kg.K]
a=1.03*10^-6; %difusidade Bandeira[m^2/s]
euler=0.5772; %numero Euler
lambda=2.8; %q(4*pi*h); %condutividade térmica solo [W/mK]
texp= (20*rb^2)/a; %tempo de experimento [s]
fln= (a*texp)/(rb^2); %fator para ln
E1=log(4*fln)-euler; %ln(rb^2/4*a*t)$ Bandeira
k1=q/(4*pi*lambda); %fator eq. governante
c2=k1*E1+c1; %fator 2 eq. governante
t0=int(2:7,:)-c2; %temp solo
%plot(int(1,:),t0(1:6,:), 'b',int(1,:),int(2:7,:), 'r')
%plot(int(1,:),int(7,:), 'b',int(1,:),int(2,:), 'r')
%plot(int(1,:),int(6,:), 'b',int(1,:),int(3,:), 'r')
%plot(int(1,:),int(5,:), 'b',int(1,:),int(4,:), 'r')

```

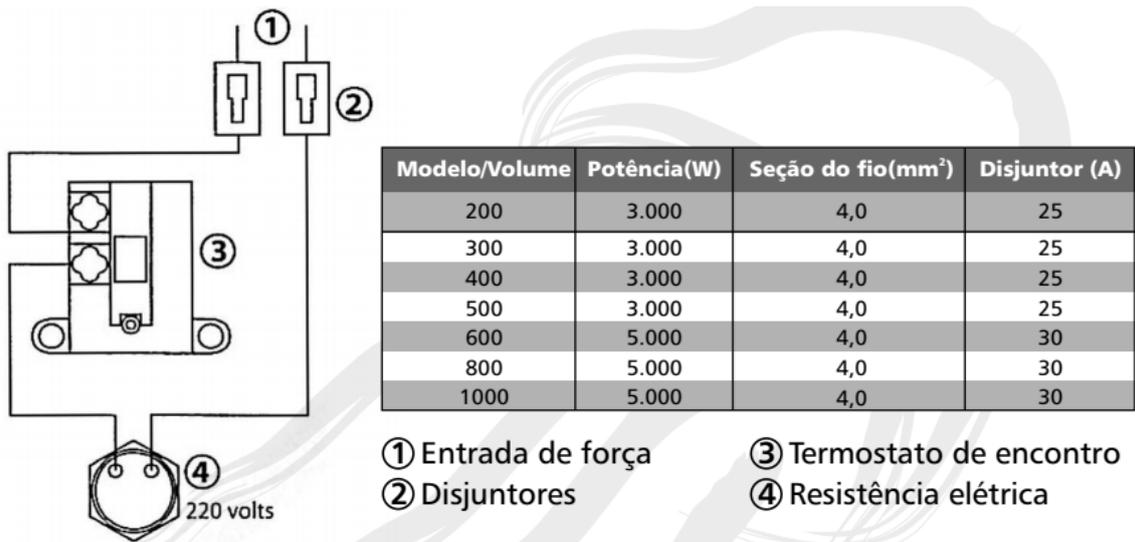


Figura - B.1 - Catálogo do aquecedor da empresa Jelly Fish

MODELO	Potência (cv)	Potência (W)	Monofásico	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Pressão máxima sem vazão (m.c.a.)	Altura máxima de sucção (m.c.a.)	Ø Rotor (mm)	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS															
									Altura Manométrica Total (m.c.a.)															
									2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
Vazão em m <sup>3</sup> /h válida para sucção de 0 m.c.a.																								
Solaris 100	1/6	100	x	1	1	6	0	62	2,6	2,1	1,6	0,9												
Solaris 200	1/3	245	x	1	1	11	0	80	4,0	3,8	3,5	3,2	2,9	2,6	2,2	1,8	1,4							



Figura - B.2 - Catálogo Schneider Motobombas

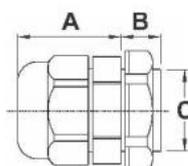
## Compostos dos O'Rings Parker

Composto Parker	Polímero Básico	Dureza Shore "A"	Resistência à temperatura em serviço	Designação ASTM D 2000 ou SAE J 200	Aplicação / uso recomendado e especificação	Classe de contração
E 3352-80B	Etileno	80	-50 à +120°C	M2AA 710 A13 EA14	Baixa temperatura, água, vapor	+1
	Propileno			F17 Z1 Chromassure	fluidos de silicone, álcool, e	
	(EPDM)	± 5		(Cor Violeta)	fluidos de freio automotivo.	

Figura - B.3 - Catálogo de anéis de borracha Parker Seals

## Linha: Prensa Cabos / Tampões

Prensa Cabo - Grau de proteção IP 67

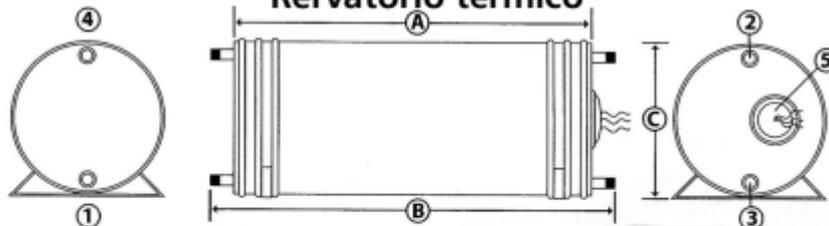


Rosca Métrica	Referência				Medidas em mm						
	Rosca Curta		Rosca Longa		A	B		C	Chave	Ø Cabos	
	Cor Cinza	Cor Preta	Cor Cinza	Cor Preta		Curta	Longa			Mín.	Máx.
M12 x 1,5	S870C	S870CPT	S870L	S870LPT	20	8	15	12	15	3	6

Figura - B.4 - Catálogo prensa cabos

## Especificações Técnicas

### Reservatório térmico



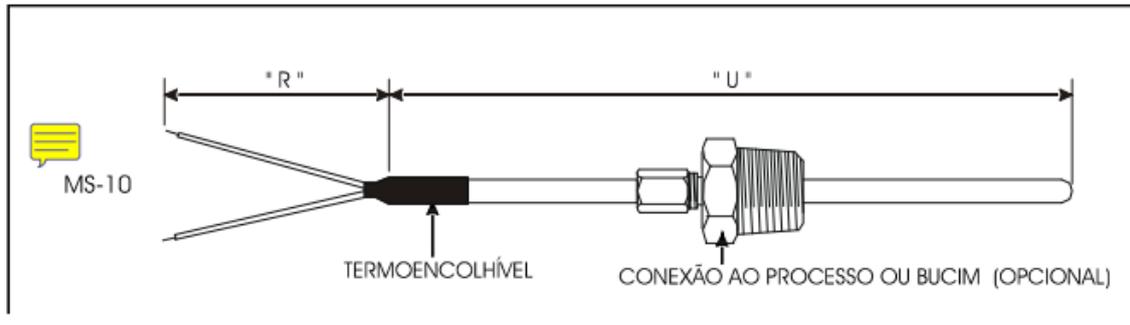
- ① Entrada de água fria
- ② Saída de água quente
- ③ Ida para coletor solar
- ④ Retorno do coletor solar
- ⑤ Parte elétrica

Volume (Litros)	Dimensões (mm)			Apoio elétrico			Peso em vazio (kg)	
	A	B	C	Potência (W)	Tensão (V)	Disjuntor (A)	Baixa Pressão	Alta Pressão
200	840	900	690	3.000	220	25	22	31

Figura - B.5 - Catálogo do reservatório da empresa Jelly Fish

# SÉRIE MS

## TERMOPAR DE ISOLAÇÃO MINERAL



### CABOS DE EXTENSÃO OU COMPENSAÇÃO (Flexíveis)

TIPO DE FIO	BITOLA	ISOLAÇÃO		CATÁLOGON°
		Condutores	Externa	
TX (Cobre Constantan)	20AWG	FEP	FEP	BT-20-F-990
	20AWG	Fibra de Vidro	Fibra de Vidro	BT-20-F-550
	1,0 mm <sup>2</sup>	PVC	PVC	BT-1,0-R-330

TABELAS DE CABOS FABRICADOS PELA ECIL

MATERIAL DA BAINHA	TIPO	CÓDIGO DO CABO	Ø DA BAINHA
Aço Inox 304 L	K	BKQK-2B-60	6,0
		BKQK-4B-60*	6,0
		BKQK-2B-30	3,0
		BKQK-4B-30*	3,0
		BKQK-2B-15	1,5
		BKQJ-2B-60	6,0
	J	BKQJ-4B-60*	6,0
		BKQJ-2B-30	3,0
		BKQJ-4B-30*	3,0
		BKQJ-2B-15	1,5
		BKQT-2B-60	6,0
		BKQT-2B-30	3,0
T	BKQT-2B-15	6,0	

Figura - B.6 - Catálogo Ecil de termopares e fios para sensores

Tubos Pretos e Galvanizados - NBR 5590 - Schedule 10				
DN	Externo m/m	Interno m/m	Parede m/m	Kg/m
½"	21,30	17,08	2,11	0,998
¾"	26,70	22,48	2,11	1,279
1"	33,40	27,86	2,77	2,092
1 ¼"	42,20	36,66	2,77	2,693
1 ½"	48,30	42,76	2,77	3,110
2"	60,30	54,76	2,77	3,93
2 ½"	73,00	66,90	3,05	5,261
3"	76,20	70,10	3,05	6,457
3 ½"	101,60	95,50	3,05	7,412
4"	114,30	108,20	3,05	8,368

Figura - B.7 - Catálogo de tubos aço galvanizado da empresa Cemil

## TUBO PEAD / PE 80 / PE 100

ISO 4427 / DIN 8074 / ABNT NBR 15561

SDR	32,25			26			21			17			13,6			11			9			7,4		
PE 80 - PN	4			5			6			8			10			12,5			16			20		
PE 100 - PN	5			6			8			10			12,5			16			20			25		
Ø DIAMETRO	Esp. (mm)	DIAM INTER. (mm)	Peso (Kg/m)	Esp. (mm)	DIAM INTER. (mm)	Peso (Kg/m)	Esp. (mm)	DIAM INTER. (mm)	Peso (Kg/m)	Esp. (mm)	DIAM INTER. (mm)	Peso (Kg/m)	Esp. (mm)	DIAM INTER. (mm)	Peso (Kg/m)	Esp. (mm)	DIAM INTER. (mm)	Peso (Kg/m)	Esp. (mm)	DIAM INTER. (mm)	Peso (Kg/m)	Esp. (mm)	DIAM INTER. (mm)	Peso (Kg/m)
1/2"	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	15,4	0,131	2,8	14,4	0,152
3/4"	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	20,4	0,168	2,8	19,4	0,197	3,5	18,0	0,238	
1"	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,4	27,2	0,228	3,0	26,0	0,275	3,6	24,8	0,323	4,5	23,0	0,390
1 1/4"	40	-	-	-	-	-	2,3	35,4	0,280	2,4	35,2	0,290	3,0	34,0	0,351	3,7	32,6	0,425	4,5	31,0	0,504	5,6	28,8	0,605

Figura - B.8 - Catálogo de tubos de PEAD da empresa aflon

### DADOS TÉCNICOS

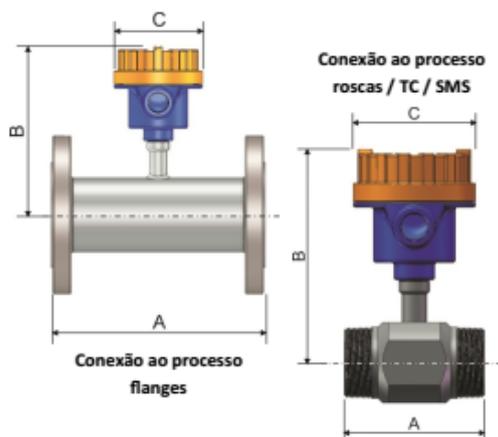
Código TVT	DN interno	Conexão ao processo						Faixa de medição (m³/h)	
		DN	Roscas externas BSP	Roscas externas NPT	Flanges ANSI B16.5 # 150 lbs RF	Flanges ANSI B16.5 # 300 lbs RF	Flanges DIN PN 10 a PN 25	Líquido	Gás
025	1"	1"	•	■	■	■	■	0,9 - 13,8	8,5 - 85

CT-TV-00264

Medidor de Vazão  
Tipo Turbina – Série TVT



### DIMENSIONAL



DN	"A"		Sem indicador local		Com indicador local	
	Rosca	Flange	"B"	"C"	"B"	"C"
1/2"	62,2	85,0	173,4	105,0	155,0	130,0
3/4"	83,0	100,0	176,5	105,0	158,5	130,0
1"	89,0	139,7	179,2	105,0	161,0	130,0
1 1/4"	102,0	143,4	186,1	105,0	168,0	130,0
1 1/2"	111,0	152,4	186,1	105,0	168,0	130,0
2"	120,0	160,0	187,0	105,0	169,0	130,0
2 1/2"	-	178,0	193,5	105,0	175,5	130,0
3"	-	254,0	201,4	105,0	183,0	130,0
4"	-	300,0	214,0	105,0	196,0	130,0
6"	-	335,6	241,1	105,0	223,0	130,0
8"	-	420,0	266,5	105,0	248,5	130,0

Dimensões em mm, para flanges ANSI B16.5 # 150 lbs RF.

Figura - B.9 - Catálogo de medidores de vazão da empresa Tecno Fluid

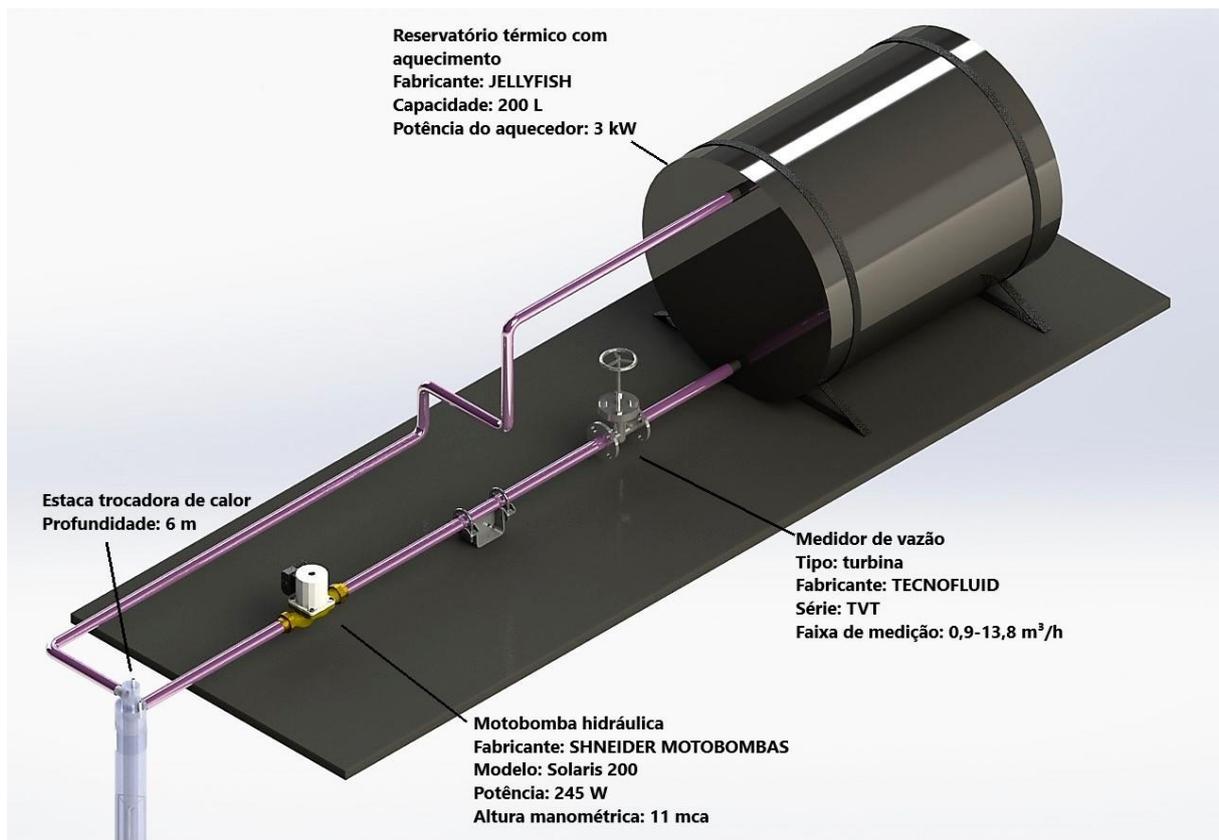
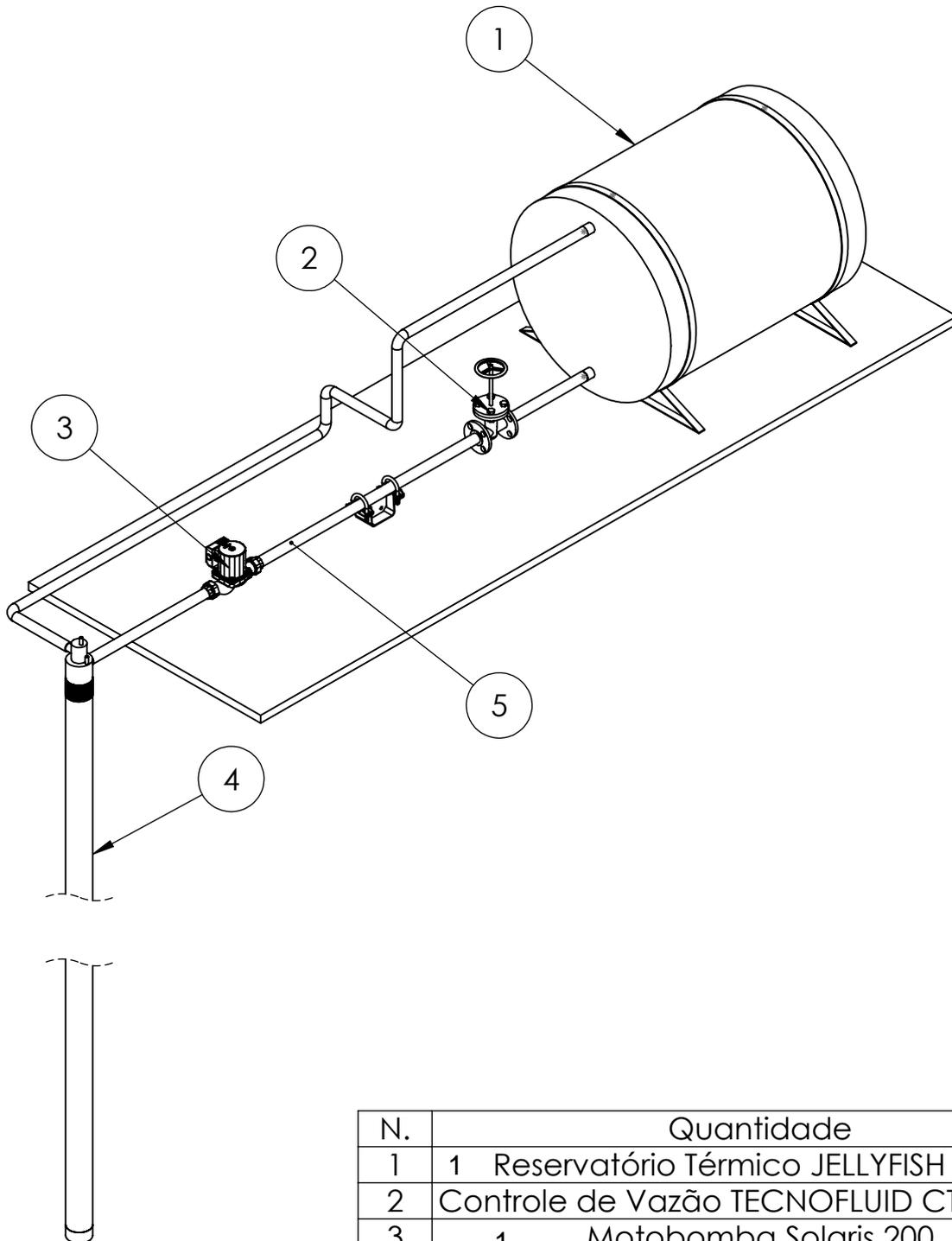


Figura C.1 - Desenho de conjunto



N.	Quantidade
1	1 Reservatório Térmico JELLYFISH 200 L
2	Controle de Vazão TECNOFLUID CT-TV-0025
3	1 Motobomba Solaris 200
4	1 Estaca trocadora de calor
5	Tubulação flexível de 1" 6 [m]

Autor: Eduardo Alves do Prado Reis

TÍTULO: DT suporte base - Projeto de Graduação UnB

SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS

REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

DES. Nº

**DT de conjunto**

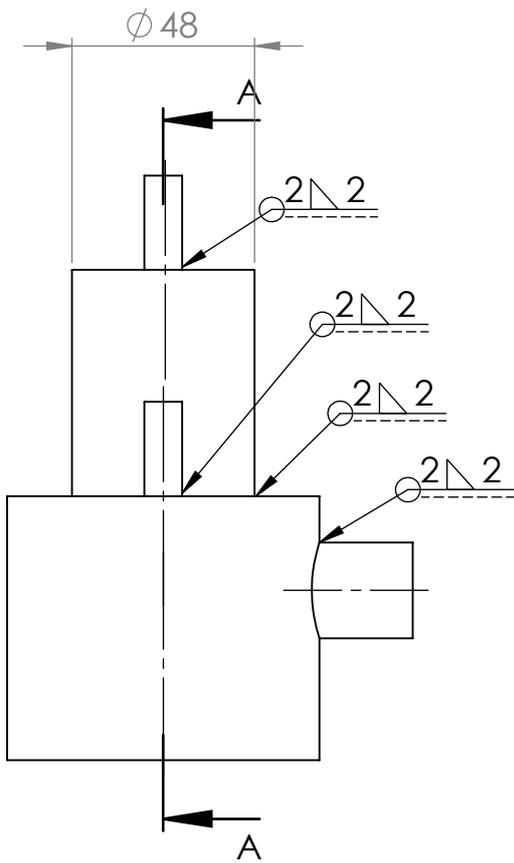
A4

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

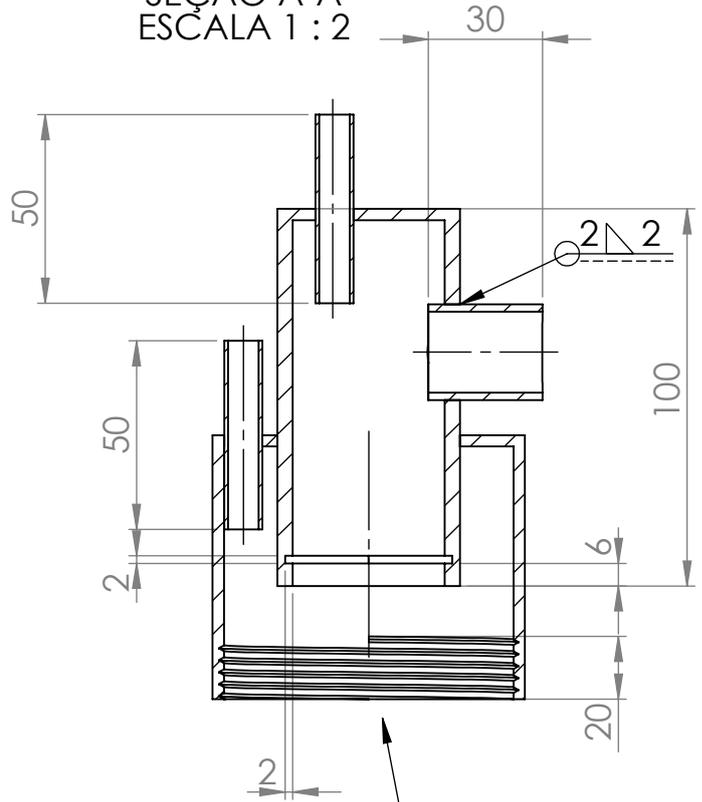
MATERIAL: Aço serie 1000

ESCALA:1:100

FOLHA 1 DE 1

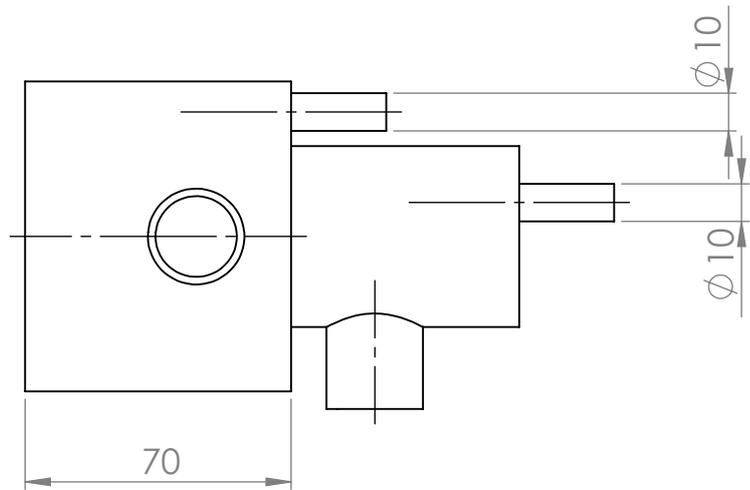
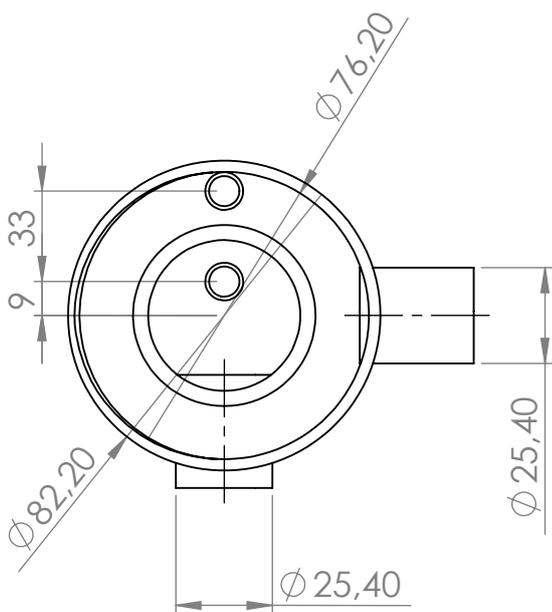


SEÇÃO A-A  
ESCALA 1 : 2



Rosca NPT - 3[in]

A



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

Autor: Eduardo Alves do Prado Reis

TÍTULO: DT suporte base - Projeto de Graduação UnB

REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

MATERIAL: Aço série 1000

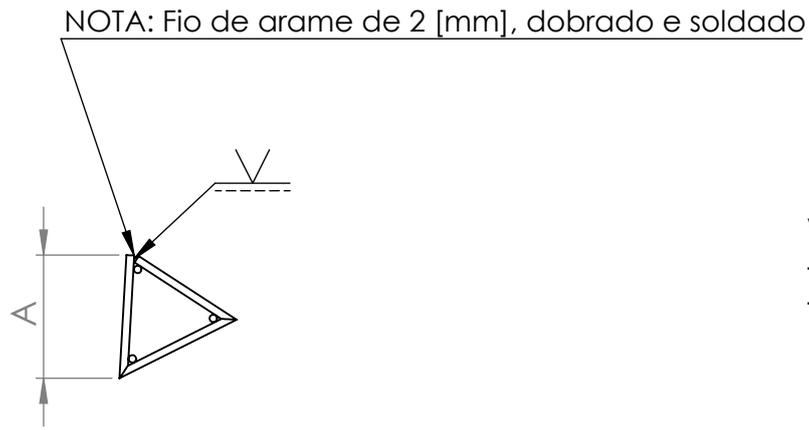
DES. Nº

DTtampa2

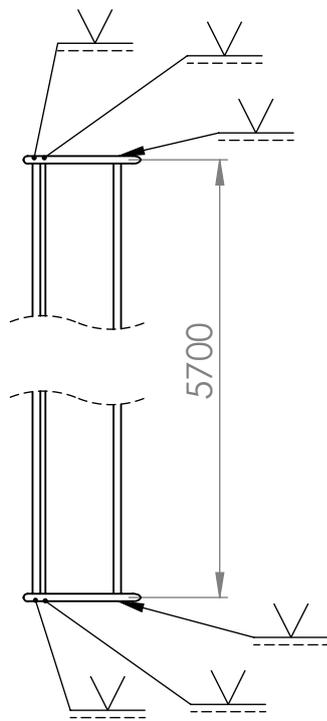
A4

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1



Valores para A:  
 - 31 [mm];  
 - 69 [mm].



Para cada dimensão 'A':  
 - Construir 12 triângulos equiláteros;  
 - Fixar com solda a cada 500 [mm]  
 até o limite de 5700[mm].

Autor: Eduardo Alves do Prado Reis

TÍTULO: DT suporte base - Projeto de Graduação UnB

SE NÃO ESPECIFICADO:  
 DIMENSÕES EM MILÍMETROS

REBARBAR E  
 QUEBRAR  
 ARESTAS  
 AGUDAS

DES. Nº

DT Estrut

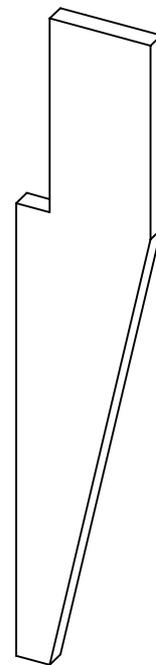
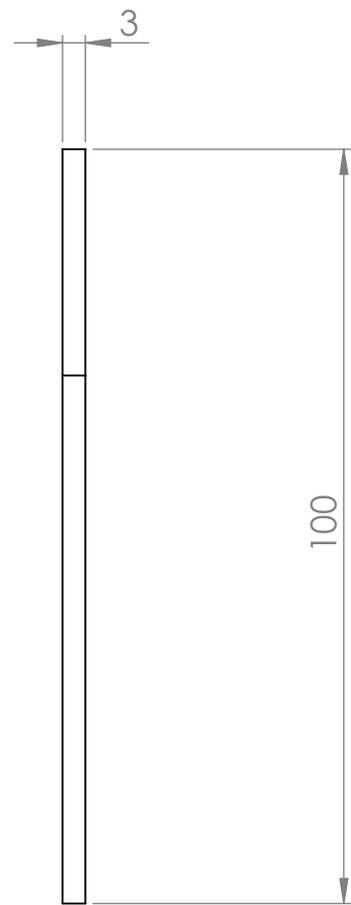
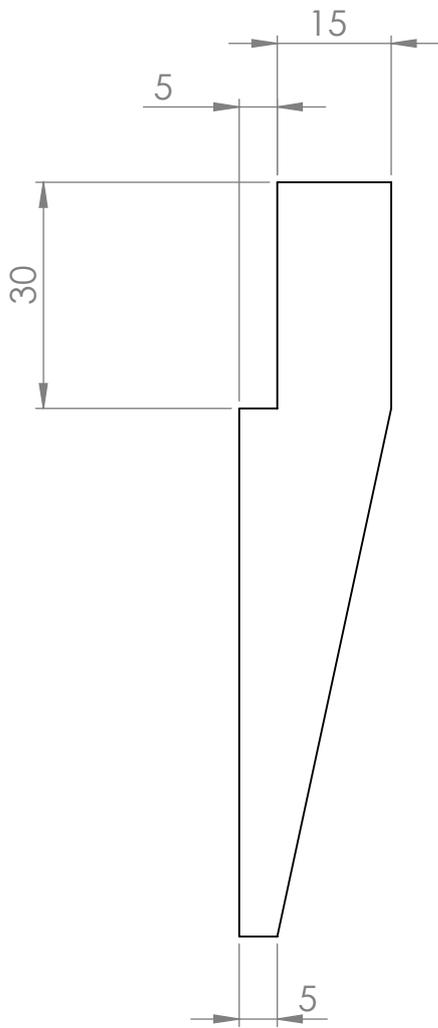
A4

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

MATERIAL: Aço serie 1000

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1



Autor: Eduardo Alves do Prado Reis

TÍTULO: DT suporte base - Projeto de Graduação UnB

SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS

REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

DES. Nº

suportebase

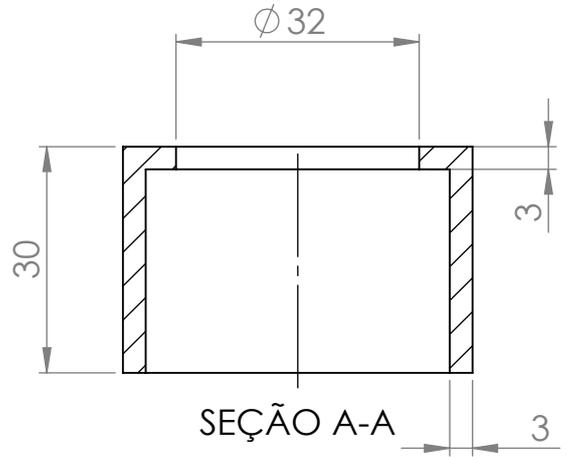
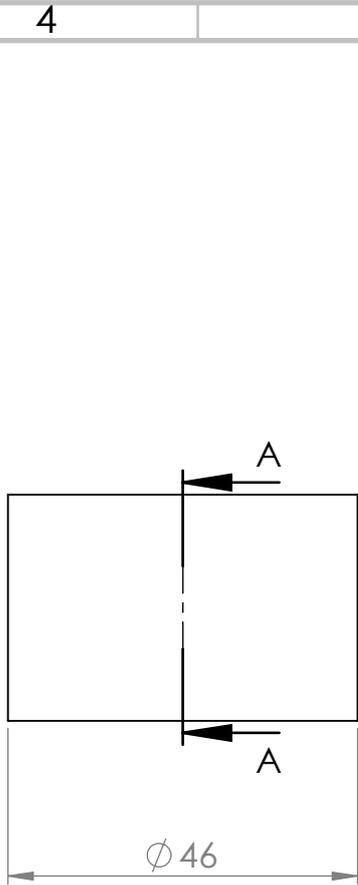
A4

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

MATERIAL: Aço serie 1000

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



Autor: Eduardo Alves do Prado Reis		TÍTULO: DT anel do suporte base - Projeto de Graduação UnB	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	DES. Nº	A4
NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		MATERIAL: Aço serie 1000	ESCALA:1:1
FOLHA 1 DE 1			

4

3

2

1

A

B

C

D

E

F

A

B

C

D

E

F

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

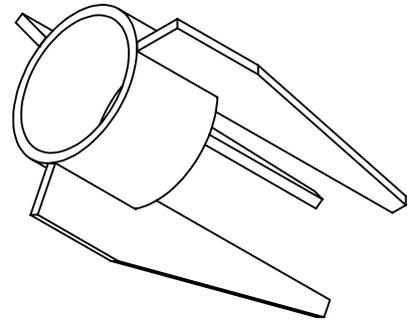
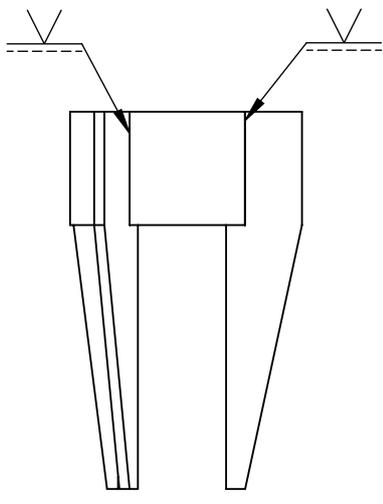
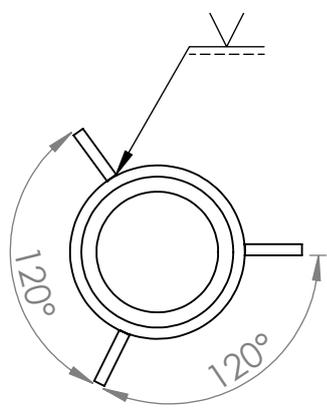
C

B

B

A

A



Autor: Eduardo Alves do Prado Reis

TÍTULO: DT suporte base - Projeto de Graduação UnB

SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS

REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

DES. Nº

# Uniao suporte

A4

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

MATERIAL: Aço serie 1000

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1