UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PERFIS DE TEMPERATURA NA LOCAÇÃO DE
POÇOS TUBULARES NO CRISTALINO DO
NORDESTE BRASILEIRO**

PESQUISA DA VIABILIDADE TÉCNICA E AVALIAÇÃO DE
EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

José Geilson Alves Demetrio

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ellert

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Pesquisa Mineral e Hidrogeologia

SÃO PAULO
1998

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PERFIS DE TEMPERATURA NA LOCAÇÃO DE POÇOS
TUBULARES NO CRISTALINO DO NORDESTE BRASILEIRO -
PESQUISA DA VIABILIDADE TÉCNICA E AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTOS, MATERIAIS
E PROCEDIMENTOS

JOSÉ GEILSON ALVES DEMETRIO

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ellert

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

Nome

Assinatura

Presidente: Prof. Dr. Nelson Ellert
Examinadores: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça
Prof. Dr. Fábio Taioli
Prof. Dr. João Carlos Dourado
Prof. Dr. Olivar Antônio Lima de Lima

Nelson Ellert
Carlos Mendonça
Fábio Taioli
João Carlos Dourado
Olivar Antônio Lima de Lima

SÃO PAULO
1998

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900004855

**PERFIS DE TEMPERATURA NA LOCAÇÃO DE
POÇOS TUBULARES NO CRISTALINO DO
NORDESTE BRASILEIRO**

PESQUISA DA VIABILIDADE TÉCNICA E AVALIAÇÃO DE
EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

JOSÉ GEILSON ALVES DEMETRIO

ORIENTADOR: PROF. DR. NELSON ELLERT

TESE DE DOUTORAMENTO
Programa de Pós-graduação em Pesquisa Mineral e Hidrogeologia

SÃO PAULO - 1998

Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha mãe, Maria do Carmo
Alves Demetrio, por ter me colocado na trilha do saber...
E à minha esposa Renimar (Rena) e às minhas filhas
Kelaine e Carina, que são hoje minhas principais fontes de
inspiração para continuar na trilha.*

RESUMO

A região semi-árida do Brasil, na sua maior parte, é coberta por rochas cristalinas. Tais rochas apresentam baixa vocação hidrogeológica, o que dificulta ainda mais as condições de sobrevivência nessa região. Outro agravante é a qualidade físico-química das águas subterrâneas do cristalino no semi-árido. Cerca de 80% dos poços apresentam águas com teores de resíduo seco acima do máximo permitido pelo Ministério da Saúde. Porém, com a atual viabilização dos dessalinizadores, poços contendo água com teores de sais elevados podem ser aproveitados, porém, a utilização dos dessalinizadores ainda é incipiente.

As diversas metodologias empregadas atualmente pelos hidrogeólogos para locarem poços no cristalino do semi-árido nordestino, apresentam no geral uma possibilidade de insucesso em torno de 25% (poços com vazões inferiores a 500 l/h). Poços considerados bem sucedidos têm vazões de exploração variando entre 500 l/h e 5.000 l/h. Porém, alguns poços produzem vazões superiores a 10.000 l/h. Foi com o intuito de tentar melhorar os índices de sucesso das locações e a compreensão das variáveis que condicionam as vazões excepcionais que se propôs este trabalho, além de marcar o início de uma nova frente de pesquisa.

A maior parte do tempo consumido neste trabalho foi para desenvolver uma sonda de temperatura confiável, resistente, prática no manuseio e para definir o método de instalação da mesma.

Foram realizados apenas nove perfis de temperatura, sendo dois em aluviões, dois para definição de contato entre rochas sedimentares e o embasamento cristalino e cinco em solos de rochas cristalinas.

Apesar da pequena quantidade, os perfis realizados foram suficientes para trazerem uma série de novas informações, tal como, a possibilidade dos perfis de temperatura serem realizados a 1,0 m ou 0,5m de profundidade. Os perfis realizados também foram importantes para mostrarem os rumos da continuação dos trabalhos aqui iniciados.

As conclusões obtidas mostraram que é plenamente possível a utilização dos perfis horizontais de temperatura do solo, como mais uma ferramenta, para auxiliar o hidrogeólogo na locação de poços profundos no cristalino do nordeste brasileiro, tendo como principal limitação a pouca espessura dos solos e os constantes afloramentos rochosos, dificultando bastante o posicionamento dos perfis de temperatura.

ABSTRACT

A poor water bearing Pre-Cambrian basement outcrops on the major part of the Northeast Semi-Arid Zone of Brazil, where water shortage is a permanent outcome. The prevalence of very high salt contents in its crystalline rock reservoirs contributes to make this situation still worse. The installation of reverse osmosis desalting units is still incipient and so, those conditions keep affecting badly inhabitants, herds, and crops as well.

Groundwater in crystalline rocks occurs in fracture zones. Water wells yields in these rocks usually range from 500 l/h to values above 5.000 l/h with average values about 1000 l/h, the later ones being found occasionally.

The possibilities of soil temperature profiles in the research of fracture zones were investigated, aiming primarily at the improvement of success scores in well positioning, which still remain today around 75%. The research work was also intended to get a better understanding of hard rock aquifers, with special interest on the variables concerned with the highest yields.

The design and development of reliable, strengthened and handy temperature probes took most of the time and effort in the research work. For this reason, no more than nine temperature profiles were run. This amount of experimental data, as small as it may appear at first sight, brought nevertheless a great deal of new and significant information on the possibilities of the approach, pointing in addition new paths to be followed in the forthcoming steps.

Soil temperature profiles are expected to be in the near future one more tool, besides the ones already known, to be used in the detailed research of water bearing fractures in hard rock territories of Northeast Brazil, aiming at the positioning of water wells. By now, the main procedure drawbacks are the small thickness and, in most case, the absence of soils, which barely leave room for the installation of the probes.

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho seria impossível se não houvesse a colaboração de dezenas de pessoas. Assim, além do lado gratificante que é a realização da pesquisa em si, também alegra o fato do mesmo ter propiciado o contato com tantas pessoas e a conquista de novos amigos.

A seguir são enumeradas entidades e pessoas, que de alguma forma tiveram uma participação mais direta neste trabalho.

À CAPES pela concessão de uma bolsa de estudos, no período de quatro anos, sem a qual não haveria a menor possibilidade de enfrentar nosso programa de doutoramento.

Ao Banco do Nordeste – BNB e à Fundação de Amparo a Ciência de Pernambuco – FACEPE, que apoiaram, através de convênios, com recursos financeiros para aquisição de equipamentos fundamentais no desenvolvimento das pesquisas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nelson Ellert, por ter acreditado em nosso projeto de tese, pelo incentivo, pelas discussões realizadas e pelos ensinamentos transmitidos. O prof. Nelson foi um dos grandes amigos conquistados durante este trabalho.

Ao amigo Prof. Edilton Carneiro Feitosa, pelo incentivo e todo apoio dado durante as diversas etapas deste trabalho e por todos os 15 anos que trabalhamos juntos, durante os quais tem sido exemplo de probidade, competência técnica, científica e administrativa.

Às minhas tias Conceição, Bia e Lou, ao meu tio Maurício e às minhas primas Lane e Micheline, pela fraternal acolhida e por tudo que fizeram para tornarem minha estada em São Paulo a mais agradável possível.

Ao Geólogo José Rubismá de Miranda e sua esposa Maria de Lourdes Rodrigues de Miranda (Lourdinha), meus compadres e cunhados. A “Seu” Rosaivo e “Dona” Branca, meus sogros, pela acolhida fraterna que me deram durante as etapas de campo em Santa Maria da Boa Vista e durante a fase de redação desta tese.

Ao Sr. Laudemiro Guimarães Costa (“Seu” Mirim) e a toda sua família pela acolhida e serviços prestados nos testes e perfis realizados em Santa Maria da Boa Vista.

À Tereza Maciel, secretária do Laboratório de Hidrogeologia – LABHID da UFPE, pelos seus relevantes serviços, que sem dúvida foram fundamentais na solução das inúmeras dificuldades surgidas durante a vigência do Convênio com o BNB.

À Geóloga Aline Marcelino Passerat de Silans, ex estagiária do LABHID, por sua dedicação, pois, sem ela dificilmente teríamos colocado o equipamento de VLF para operar a tempo de ser utilizado junto com os perfis de temperatura.

À amiga Eng. Simone Rosa da Silva, pelo incentivo e revisão de texto.

Ao amigo Geólogo Fernando Antonio Carneiro Feitosa, atualmente geólogo da CPRM-CE, pelo incentivo e pela época que passamos juntos “pagando” os créditos das disciplinas em São Paulo.

Ao Prof. Marcelo Rodrigues da Silva do Departamento de Eng. de Minas da UFPE, por ter colocado a nossa disposição o laboratório de Geoquímica, sob sua responsabilidade, para a determinação da umidade das amostras.

À Ana Paula e Magali, da Secretaria da Pós-graduação do Instituto de Geociências da USP, pela presteza e delicadeza com que atenderam todas nossas solicitações.

A todos aqueles que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho, os nossos sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

Pág.

DEDICATÓRIA	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
AGRADECIMENTOS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ÍNDICE DE FOTOS	XII
1- APRESENTAÇÃO	1
2- JUSTIFICATIVAS	1
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
4- METODOLOGIA	7
4.1- AS SONDAS DE TEMPERATURA	7
4.2- CALIBRAÇÃO DAS SONDAS DE TEMPERATURA	26
5- PERFIS HORIZONTAIS DE TEMPERATURA DO SOLO	41
5.1 – PERFIS REALIZADOS EM SANTA MARIA DA BOA VISTA	42
5.2 – PERFIS REALIZADOS EM ROÇAS VELHAS	49
5.3 – PERFIS REALIZADOS EM ALAGOINHA	53
5.3.1 – Caracterização e Estudos Complementares	53
5.3.2 – Perfis de Temperatura	59
5.3.2.1 – Perfil 1	65
5.3.2.2 – Perfil 2	70
5.3.2.3 – Perfil 3	73
5.3.2.4 – Análise Integrada dos Perfis 1, 2 e 3	79
5.3.2.5 – Perfil 4	81
5.3.2.6 – Perfil 5	85
5.3.2.7 – Análise integrada dos cinco perfis	91
5.4 – COMENTÁRIOS FINAIS	92
6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil de Temperatura Horizontal Hipotético	2
Figura 2 – Curva $\Delta T/\Delta t$ x Tempo.....	5
Figura 3 – Projeto da Sonda Tipo1	8
Figura 4 – Sonda de Mangueira Plástica – Sonda Tipo 2.....	9
Figura 5 – Variação de Resistência x Tempo (Sonda Tipo 2).....	9
Figura 6 – Sonda de Temperatura Tipo 3	10
Figura 7 – Análise da Variação de Temperatura entre a Sonda 3 e Sonda 2.....	11
Figura 8 – Análise do Termistor em Ambiente de Temperatura Controlada.....	11
Figura 9 – Monitorização de Temperaturas Durante 48 Horas em Sta. Maria da Boa Vista - PE	13
Figura 10 – Medidas de Temperatura a 1,0 m de Profundidade.....	15
Figura 11 – Superposição das Medidas de Temperatura Feitas com Sonda de Mangueira e Sonda de Alumínio	16
Figura 12 – Acompanhamento da Temperatura do Solo em Diferentes Profundidades	19
Figura 13 – Evolução da Temperatura do Solo a Diferentes Profundidades	20
Figura 14 – Projeto da Sonda de Temperatura Tipo 4.....	22
Figura 15 – Curva de Calibração da Sonda 2	29
Figura 16 – Relação entre a Temperatura (Y) e as Resistências (X)	30
Figura 17 – Curvas de Calibração	32
Figura 18 – Curvas de Calibração (continuação)	33
Figura 19 – Relação entre a Temperatura da Água e a Resistência da Sonda 1	34
Figura 20 – Perfil Roças Velhas – Calumbi / PE	36
Figura 21 – Relação Temperatura x Resistência da Sonda 1 de Alumínio após a Segunda Calibração..	38
Figura 22 – Curvas de Calibração das Sondas de Aço	40
Figura 23 – Temperatura x Resistência da Sonda 1 (sonda de aço)	41
Figura 24 – Situação das Áreas Estudadas	42
Figura 25 – Localização da Área Estudada em Sta. Maria da Boa Vista	43
Figura 26 - Posicionamento dos Perfis de Temperatura em Sta Maria da Boa Vista	44
Figura 27 – Perfil de Temperatura do Solo Aluvial – Perfil 1	45
Figura 28 – Perfil de Temperatura do Solo Aluvial – Perfil 2	45
Figura 29 – Posição das Anomalias Térmicas nos Perfis de Sta. Maria da Boa Vista.....	46
Figura 30 – Análise de Regressão do Perfil 1	47
Figura 31 – Perfis de Temperatura Corrigidos	48
Figura 32 – Análise de Regressão do Perfil 2	48
Figura 33 – Mapa de Localização de Rochas Velhas.....	49
Figura 34 – Localização do Perfis de Temperatura em Rochas Velhas.....	50
Figura 35 – Perfil Realizado em Rochas Velhas – Perfil 1	51
Figura 36 – Perfil Realizado em Rochas Velhas – Perfil 2	52
Figura 37 – Localização da Área Estudada em Alagoinha	54
Figura 38 – Detalhe da Área Estudada em Alagoinha e Localização dos Perfis de Temperatura	55
Figura 39 – Localização dos Perfis de Eletro-resistividade, Sondagens Elétricas e Resultados Obtidos.	57
Figura 40 – Localização dos Perfis de VLF e Resultados Obtidos.....	58
Figura 41 – Localização dos Perfis 1, 2 e 3 Realizados em Alagoinha	63
Figura 42 – Perfil Topográfico dos Três Perfis de Temperatura	64
Figura 43 – Mapa Topográfico no Local dos Três Perfis de Temperatura.....	65
Figura 44 – Primeiro Perfil de Temperatura do Solo de Alagoinha	66
Figura 45 – Reinterpretação do Perfil 1	67
Figura 46 – Perfil 1 de Temperatura do Solo em Alagoinha	69
Figura 47 – Segundo Perfil de Temperatura do Solo de Alagoinha	70
Figura 48 – Reinterpretação do Perfil 2	71
Figura 49 – Gráficos do Perfil 2	72
Figura 50 – Relação entre o Número de Golpes e a Temperatura para 1,0 m de Profundidade no Perfil 2.....	73
Figura 51 – Gráficos do Perfil 3	74
Figura 52 – Análises de Regressão para o Perfil 3	76
Figura 53 – Análises Granulométricas de Amostras do Perfil 3	77

Figura 54 – Comparação do Perfil de Temperatura com os Teores de Cascalho, Areia e Silte/Argila – Perfil 3	78
Figura 55 – Integração da Análise dos Perfis 1, 2 e 3	79
Figura 56 – Mapa de Temperatura no Local dos Perfis 1, 2 e 3	80
Figura 57 – Localização do Perfil 4	81
Figura 58 – Perfil 4	82
Figura 59 – Detalhes das Proximidades do Perfil 5	86
Figura 60 – Gráficos do Perfil 5	88
Figura 61 – Análises Granulométricas de Amostras do Perfil 5	89
Figura 62 – Comparação do Perfil de Temperatura com os Teores de Cascalho, Areia e Silte/Argila – Perfil 5	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo de $\Delta T/\Delta t$	5
Tabela 2 – Resultado da Monitorização de 48 Horas em Sta. Maria da Boa Vista – PE	14
Tabela 3 – Acompanhamento das Temperaturas em Graus Centígrados em Diferentes Profundidades Durante 95 Horas	18
Tabela 4 – Medidas de Temperatura e Resistência para as Sondas 1 e 2	28
Tabela 5 – Dados da Primeira Calibração das Sondas de Alumínio	31
Tabela 6 – Constantes de Calibração	34
Tabela 7 – Temperatura da Água x Resistência Elétrica da Sonda 1	34
Tabela 8 – Evolução das Constantes de Calibração das Sondas de Alumínio	37
Tabela 9 – Análise da Variação das Equações de Ajuste de Temperatura x Resistência para a Sonda 1	38
Tabela 10 – Dados da Calibração das Sondas de Aço	39
Tabela 11 – Constantes de Calibração das Sondas de Aço	41

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1 – Cravação da Haste para Instalação das Sondas de Alumínio	21
Foto 2 – Sistema Hidráulico para Instalação de Sondas de Temperatura.....	23
Foto 3 – Tripé para Instalação das Sondas de Aço.....	24
Foto 4 – Cavalete para Instalação das Sondas de Aço	25
Foto 5 – Calibrador Caixa de Isopor	27
Foto 6 – Detalhes do Calibrador	27
Foto 7 – Sondas de Aço que Tiveram a Instalação Forçada	60
Foto 8 – Sonda 4 Danificada por Seixos de Quartzo.....	60
Foto 9 – Perfil Típico de Solo da Área Estudada.....	61
Foto 10 – Afloramentos Rochosos Comuns na Área Estudada	61
Foto 11 – Proximidades do Poço Salambaia I	62
Foto 12 – Proximidades do Poço Salambaia dos Cordões.....	62
Foto 13 – Detalhe do Perfil 1	68
Foto 14 – Aspectos do Solo no Local do Perfil 4.....	83
Foto 15 – Detalhes do Processo de Instalação das Sondas no Perfil 5	87

1- APRESENTAÇÃO

A pesquisa objeto desta tese de doutoramento, busca verificar, por meios experimentais, a possibilidade de utilizar perfis horizontais de temperatura do solo, como uma nova técnica auxiliar na locação de poços em terrenos de rochas cristalinas no nordeste brasileiro. Portanto, os trabalhos realizados tiveram por meta pesquisar a viabilidade técnica, mostrar diretrizes, estabelecer vantagens e limitações do uso dos perfis de temperatura, bem como avaliar equipamentos, materiais e procedimentos.

2- JUSTIFICATIVAS

Um dos principais problemas da região Nordeste, sem dúvida, é a baixa oferta de recursos hídricos, agravada ciclicamente pelos longos períodos de estiagem. Na tentativa de minimizar a carência d'água, várias medidas são implementadas, algumas emergenciais, como a distribuição de água por carros-pipas, outras de caráter duradouro, tais como construção de barragens e poços tubulares.

A litologia do nordeste brasileiro é composta, aproximadamente, por 50% de rochas sedimentares e a outra metade por rochas cristalinas (metamórficas, plutônicas e vulcânicas). Excluindo o Estado do Maranhão, que normalmente é menos afetado pelos problemas das estiagens, a proporção para os terrenos de rochas cristalinas cresce para cerca de 60%. Dos 40% restantes de terrenos sedimentares, boa parte estão nas zonas costeiras, onde ocorrem índices pluviométricos bem substanciais. Portanto, a grande maioria do semi-árido nordestino é dominada por rochas cristalinas.

As rochas cristalinas por sua vez não são boas armazenadoras de água. A acumulação é limitada às zonas fendilhadas, caracterizando o aquífero fissural. A identificação de zonas fraturadas é de fundamental importância para locação de poços tubulares em terrenos de rochas cristalinas. Várias são as técnicas utilizadas para localização dessas fraturas: estudo de aerofotos, geofísica (eletroresistividade, VLF e outros), imagens de satélites, análise de mapas, visita de campo, etc.

Localizar fraturas normalmente não é uma tarefa difícil. A dificuldade está em identificar previamente se as mesmas têm possibilidades de produzir água em quantidade e com qualidade. Os métodos acima citados, em geral, localizam fraturas com água em torno de 75% dos casos (Informações obtidas a partir de relatórios das companhias de perfuração e instituições de pesquisa que atuam no Nordeste). Os outros 25% são considerados secos (vazão inferior a 500 litros/hora). Em relação à qualidade, cerca de 80% dos poços perfurados apresentam água com teores de sais acima do máximo permitido para o consumo humano (Demetrio et al., 1993).

É com o intuito de poder fazer inferências sobre as potencialidades hídricas de zonas fendilhadas, que se pretende verificar a possibilidade da utilização de perfis horizontais de temperatura do solo.

Foi admitida como hipótese inicial de trabalhos que os solos acima de zonas fraturadas com água, apresentem níveis de umidade maiores do que nas áreas de rocha não fraturada ou fraturada sem água. Esta evidência às vezes é percebida até em fotografias aéreas, sendo fraturas detectadas apenas pelo alinhamento de

em fotografias aéreas, sendo fraturas detectadas apenas pelo alinhamento de vegetação mais densa ou por alinhamento de manchas de solo mais escuras, que certamente devem estar associadas às áreas mais úmidas.

As propriedades térmicas que caracterizam o solo são definidas por três parâmetros: a condutividade térmica k [cal/(s.cm.°C)], a difusividade térmica α [cm²/s] e o calor específico c [cal/g°C], sendo a relação entre eles expressa pela seguinte equação (Mosciki, 1987).

$$\alpha = kc^{-1}\rho^{-1}, \text{ sendo } \rho \text{ a densidade do solo [g/cm}^3\text{]}$$

A consulta de tabelas de valores destes parâmetros para diferentes tipos de rocha (Moscicki, op.cit.), revela que praticamente não há grande diferença entre a condutividade térmica de um solo arenoso seco (0,35 – 0,55 [10³cal/s cm °C]) e um solo argiloso seco (0,25 [10³cal/s cm °C]), porém, a relação entre a condutividade térmica de um solo arenoso seco e solo arenoso úmido, bem como, entre um solo argiloso seco e solo argiloso úmido, em ambos os casos, chega ser de 10 vezes, sendo a condutividade térmica maior nos solos úmidos.

Custodio & Llamas, 1983, afirmaram que "o grau de saturação influi (na temperatura do solo), sendo as variações menores em terrenos saturados. Em terrenos não saturados existe um fluxo convectivo de vapor, ascendente no inverno ou durante a noite e descendente no verão ou durante o dia que tende a aumentar as flutuações" de temperatura do solo.

Após a realização de cada perfil de temperatura, que deverá ser transversal ao fraturamento detectado previamente (basicamente por aerofoto), espera-se obter uma resposta semelhante à esquematizada na figura 01. A variação de temperatura, logo acima da zona fraturada, terá duas medidas importantes, a amplitude (A) e a intensidade (I). Poderá ser através destas duas medidas que se estabeleça alguma relação com a capacidade de produção de água da fratura.

Figura 1 –Perfil de Temperatura Horizontal Hipotético

A decisão de utilizar medidas de temperatura do solo, ao invés de medidas diretas de umidade, decorre do fato dos equipamentos destinados à medida de umidade do solo serem mais caros do que os equipamentos necessários para a realização dos perfis de temperatura e por dispensar a coleta e análise de amostras. Outro objetivo desse trabalho é testar uma metodologia simples e de baixo custo. Para verificar as relações existentes entre a temperatura e a umidade do solo do local estudado, serão coletadas amostras de solo para determinação da umidade em laboratório.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica inicialmente realizada, nas bibliotecas do CTG da UFPE, IG e IAG da USP, não teve sucesso devido à grande quantidade de periódicos, sendo humanamente impossível a busca de um determinado assunto, pois, seria necessário folhear todo material disponível. Foi então que se percebeu a necessidade de que essas informações estivessem informatizadas. Embora as bibliotecas de ambas universidades disponham de um banco de dados, este basicamente contém apenas informações de livros e teses, não estando disponível, eletronicamente, os artigos contidos nos periódicos que estão em suas estantes.

Na tentativa de suprir essa deficiência, foi feita uma pesquisa pela Internet em busca de trabalhos que versassem sobre o tema da nossa pesquisa. Vários "sites" foram visitados, porém, o da Sociedade de Geofísica Exploratória (<http://www.seg.org>) destacou-se pelo número de informações disponíveis e por ser de livre acesso, pois, em alguns "sites" havia a cobrança de uma taxa para se ter acesso ao banco de dados, por exemplo o da União Internacional de Geofísica – IGU. Na Internet foram encontrados vinte artigos relacionados com o tema em questão. Anotados os respectivos periódicos, foi fácil encontrá-los nas estantes das bibliotecas.

O primeiro fato que chamou a atenção foi a pequena quantidade de publicações sobre o tema ora pesquisado. Moscicki (op. cit.), constatou que medidas de temperatura em pequenas profundidades e outras investigações geotermiais rasas, tinham raramente sido realizadas no passado.

É grande o número de publicações tratando sobre perfis térmicos verticais, normalmente utilizando poços para a realização das medições, como por exemplo Byerly (1965), Sammel (1968), Lee (1977), Reiter et. all. (1980), Pozini et all. (1989), Beck et all. (1989), del Rey e Hanza (1989) e Wang (1992). Outros estudaram por meio de modelos numéricos as distribuições de temperatura em torno de domos salinos, tais como Selig e Wallick (1966) e Jensen (1983). Larson (1988), discutiu sobre as medições de temperatura do solo para definição de suas propriedades térmicas e Shumway (1958), analisou a relação entre a temperatura e a velocidade do som em sedimentos saturados por água. (Costa, 1982), utilizou perfis verticais de temperatura na determinação de fluxo vertical de até 1mm/dia. Embora não sejam artigos que tratem diretamente do tema deste trabalho, a leitura desses foi bastante útil para se ter uma visão mais abrangente do problema.

Kappelmeyer (1957), fez uma abordagem matemática dos valores de temperatura em pequenas profundidades e afirmou que medidas de temperaturas poderiam ser aplicadas para detectar fissuras, fraturas e estruturas similares que

facilitassem o transporte de calor convectivo proveniente de profundidades maiores. Mostrou que a variação de temperatura do solo, no período de um ano, devido aos efeitos de aquecimento e esfriamento, é percebida até à profundidade de 20 metros, tendo essa variação forma senoidal. A amplitude, a fase e a forma da oscilação de temperatura a uma certa profundidade, dependem das *complicadas* condições acima da superfície e também da natureza do solo. Assim, as medidas de temperatura, a uma determinada profundidade e tempo, dependem da difusividade térmica do solo, da amplitude e fase da curva de variação da onda de temperatura e da temperatura média anual.

Para verificar a aplicabilidade do método, Kappelmeyer (op. cit.), realizou uma série de perfis de temperatura, no vale do Rio Neckar, próximo a Kiebingen, Alemanha, onde há uma fratura com profundidade de 100 a 150 metros, em calcários, e através da qual percola água no sentido ascendente, misturando-se às águas do aquífero superficial. A profundidade do freático na área é cerca de 4 a 6 metros. As temperaturas foram tomadas a uma profundidade de 1,5 metros e a equidistância entre os pontos foi de 20 metros. O mapa elaborado a partir das medidas de temperatura, revelou claramente um aumento da temperatura do solo acima da fratura pesquisada. Segundo o autor, a pesquisa foi realizada em local favorável, pois a superfície era completamente plana e coberta apenas por uma relva. Concluiu dizendo: *"a princípio é possível descobrir fraturas na subsuperfície pela qual percola água proveniente de grandes profundidades que vem se juntar ao fluxo superficial"*.

Poley e van Steveninck (1970) utilizaram perfis de temperatura do solo, com medidas feitas a 1,5 metros de profundidade, na delimitação de domo salino, fraturas e falhas. Como os perfis levavam várias semanas para serem realizados, era necessária a correção dos valores de temperaturas medidos, devido à variação de temperatura que normalmente ocorre ao longo do ano. Para isso, instalava-se em local adequado, uma sonda de temperatura para medidas diárias durante toda a pesquisa, a exemplo do que se faz nos levantamentos magnetométricos e gravimétricos. O espaçamento entre as sondas foi de 25 metros, definido a partir da análise do espectro de energia da distribuição lateral de temperatura em Zoetermeer, Holanda, utilizando análise de Fourier. Porém, ressaltaram a necessidade de investigar a adequação desse espaçamento para outros locais. A aplicação dessa metodologia na determinação de fraturas e falhas, Poley e van Steveninck, 1971, foi possível basicamente à diferença de condutividade térmica entre a zona fraturada e a rocha sã. Esta diferença é decorrente de uma alteração na textura, porosidade, etc da rocha ao longo da falha e até mesmo devido às mineralizações secundárias. Dois perfis realizados, para estudar a aplicabilidade do método, mostram nítidas anomalias térmicas sobre falhas. Eles concluíram dizendo que o método era simples, barato, rápido e que requer pequenas correções durante a interpretação. Os perfis também podem ser feitos diretamente sobre os fundos de lagos e pântanos.

Parasnis (1971), analisando o trabalho de Poley e van Steveninck, 1970, desenvolveu uma metodologia, a partir dos valores de temperaturas obtidos nos 10 primeiros minutos após instalação da sonda de temperatura, para inferir qual seria a temperatura de equilíbrio. Esta metodologia foi desenvolvida para abreviar o tempo previsto por Poley e van Steveninck, que sugeriram aguardar pelos menos 1 hora após instalação do último termômetro para tomar as temperaturas. Parasnis (op. cit.) sugeriu

instalar a sonda de temperatura e fazer medidas a intervalos regulares de dois minutos, contados a partir do momento da instalação da sonda, durante 6 a 10 minutos. Para ilustrar o método são apresentados, na tabela 1 a seguir, valores de temperatura medidos com um termômetro Hewlett-Packard, Bh 281, a uma profundidade de 30 metros.

Tabela 1 – Cálculo de $\Delta T/\Delta t$

Tempo (min)	Temperatura (°C)	$\Delta T/\Delta t$ (°C/min)
2	7,395	
3		0,035
4	7,325	
5		0,015
6	7,295	
7		0,0075
8	7,280	
9		0,0035
10	7,273	

Instalada a sonda de temperatura, foram feitas leituras no termômetro a cada 2 minutos, durante 10 minutos. Em seguida foram calculadas as razões entre a diferença de temperatura (ΔT) e o intervalo de tempo (Δt) entre duas leituras sucessivas, nesse caso, constante a 2 minutos. Os valores encontrados foram consignados ao tempo médio do respectivo intervalo de tempo, nesse exemplo, 3, 5, 7 e 9 minutos. Os valores da razão $\Delta T/\Delta t$ foram anotados na terceira coluna da tabela 1. A partir dos pares tempo médio e a razão acima calculada foi elaborado o gráfico da figura 2, em papel mono-log, ajustando os pontos a uma curva exponencial.

Figura 2 – Curva $\Delta T/\Delta t \times$ Tempo

Segundo Parasnis (op. cit.), a temperatura final de equilíbrio é dada pela seguinte expressão:

$$T_f = T_{(\tau)} + \frac{(\Delta T / \Delta t)_{\tau}}{k}$$

Sendo:

T_f = a temperatura de equilíbrio.

$T_{(\tau)}$ = temperatura para o intervalo de tempo τ , calculada a partir da equação de ajuste da figura 2.

k = coeficiente angular da curva exponencial de ajuste.

Para o exemplo foi calculada a seguinte temperatura de equilíbrio:

Para $\tau = 4$ minutos $T_{(\tau)} = 7,325$ °C e

$$(\Delta T / \Delta t)_4 = 0,105957 * e^{(-0,380045 * 4)} = 0,0232$$

Como $k = -0,380045$, tem-se

$$T_f = 7,325 + 0,0232 / -0,380045, \text{ assim}$$

$$T_f = 7,325 - 0,061 = 7,264$$
 °C.

Embora seja um método bastante simples, é mais prático e mais seguro aguardar pelo menos uma hora após a instalação da última sonda para iniciar as leituras de temperatura. Uma hora não é um tempo tão prolongado, se for computado o tempo necessário para os cálculos da correção acima para 20 sondas e mais os 10 minutos para obter os dados necessários, o ganho de tempo não será significativo.

Geertsma (1971) fez uma análise numérica, utilizando o método dos elementos finitos, dos casos estudados por Poley e van Steveninck, 1970 e 1971. Os resultados apresentados mostraram uma perfeita concordância entre os valores calculados e os valores de campo. Ressaltou, nas conclusões, a necessidade de mais trabalhos experimentais, bem como, a dificuldade do problema inverso, ou seja, obter uma interpretação unívoca de uma anomalia térmica. Isto significa dizer que uma mesma anomalia pode ser freqüentemente explicada por diferentes estruturas geológicas.

Moscicki (op. cit.), utilizou medidas de temperatura do solo, à profundidade de 20 cm, para determinar cavernas no subsolo de várias localidades polonesas. Realizou perfis de temperatura em diversas épocas do ano de 1977 e mostrou que havia um bom ajuste entre os dados observados em campo e os dados obtidos por modelos matemáticos.

Oelsner (1989), utilizou termômetros infravermelhos para a realização de perfis de temperatura da superfície do terreno, cobrindo longas distâncias (550 km). Eram simultaneamente feitas as medidas de temperatura do ar e da superfície do solo.

As medições eram sempre realizadas entre o ocaso e a alvorada. Mostrou que há uma relação direta entre a topografia e a temperatura da superfície do solo, bem como a possibilidade de detectar a presença de estruturas geológicas. Esse método tem a vantagem de ser barato e rápido, pois os instrumentos de medição são montados em um carro e os perfis são realizados a uma velocidade de 50 a 80 km/h, porém, tem como desvantagem não se prestar à investigação de detalhe.

Khesin e Eppelbaum (1994) apresentaram um trabalho em que fazem uma revisão do processamento e interpretação da prospecção termal com medidas de temperatura próximas à superfície. Alertaram para a necessidade da correção dos valores de temperatura obtidos durante uma pesquisa, de modo que sejam eliminados os efeitos da variação sazonal e do relevo. Para corrigir os efeitos deste último, sugeriram fazer uma regressão entre os valores de temperatura (T) e os valores das cotas (H), e calcular os coeficientes de regressão a e b, obtendo a seguinte relação linear:

$$T_{\text{appr}} = a + bH$$

O valor T_{appr} é subtraído do valor T observado no campo, tomado na cota H, encontrando o valor de campo corrigido T_{corr} , o qual deverá refletir apenas a heterogeneidade geológica da seção estudada.

Khesin e Eppelbaum (op. cit.) também relataram dois casos estudados por eles, nos quais as medidas de temperatura foram feitas a 1,0 metro de profundidade. Estes dois casos serviram para os autores fazerem analogias com perfis magnéticos e interpretações quantitativas, basicamente inferindo sobre a profundidade das anomalias térmicas.

4- METODOLOGIA

Os trabalhos realizados podem ser divididos em três etapas distintas, que são: a) confecção das sondas de temperatura e definição do modo de instalação das mesmas. b) calibração das sondas e c) realização dos perfis de temperatura.

4.1- AS SONDAS DE TEMPERATURA

Os sensores de temperatura utilizados foram termistores Sanyo, referência SDT100, em forma de disco (diâmetro = 5mm), com dois fios e resistência elétrica de 1000 Ohms a 25°C, operando na faixa de -20°C até 70°C. Apesar dos esforços junto ao fornecedor destes termistores em São Paulo, estas foram todas as informações técnicas conseguidas. Mais adiante será relacionada uma série de testes com esses termistores para verificar sua aplicabilidade à pesquisa ora desenvolvida.

As medidas de resistência elétrica (*a partir deste ponto, onde se lê resistência entenda por resistência elétrica*) foram feitas por um multímetro digital de 4½ dígitos True RMS da Extech Instruments, importado dos EUA à Cole Parmer. A precisão dos valores de resistência obtidos na faixa 0,1kΩ a 100 kΩ é de ±0,1% (±3 dígitos).

Toda pesquisa que necessita fazer medições em um meio natural, tem por inconveniente as interferências causadas pelos próprios instrumentos de medição, as quais podem inviabilizar completamente uma pesquisa. Na intenção de minimizar essas perturbações foram desenvolvidos e testados diferentes tipos de sondas de temperatura.

O principal enfoque no projeto da primeira sonda foi a possibilidade da transmissão de calor, através da mesma, da superfície para o subsolo. Outro aspecto importante observado no projeto foi o encapsulamento do termistor, pois, este é um componente frágil, tendo que ser protegido. Portanto, o material da cápsula para o termistor teria que ser resistente ao choque e à abrasão e ser um bom condutor térmico. Dentre os materiais disponíveis, o que melhor atendeu esses requisitos foi o aço inoxidável. Com base nessas variáveis foi feito o projeto da primeira sonda de temperatura, tal como apresentado na figura 3. A primeira sonda era segmentada em três partes. A primeira em aço inoxidável na qual foi alojada o termistor. A segunda uma conexão em teflon e terceira uma haste de alumínio. Na cápsula de aço o espaço vazio, entre o termistor e as paredes internas da cápsula, foi preenchido com uma mistura de pó de cobre e graxa de silicone, com o propósito de melhorar a condutividade térmica do conjunto. A conexão de teflon teve como objetivo impedir a transmissão de calor, através da haste de alumínio, da superfície até a cápsula de aço inoxidável. A haste de alumínio servia apenas para permitir a instalação da sonda a um metro de profundidade. A extremidade superior da haste de alumínio foi selada com silicone e massa epóxi, para evitar a circulação de ar e a penetração de umidade para seu interior. Os testes da primeira sonda revelaram a fragilidade da conexão de teflon. Frequentemente a conexão se rompia quando a sonda era extraída do solo, o que inviabilizou sua utilização.

Figura 3 – Projeto da Sonda Tipo1

Com o insucesso da primeira sonda, foi elaborado um segundo projeto, tendo ainda como principal balizamento evitar a condução de calor da superfície até o termistor. Sendo assim, a segunda sonda, como mostra a figura 4, foi construída substituindo a conexão de teflon e a haste de alumínio por uma mangueira de plástico transparente.

Figura 4 – Sonda de Mangueira Plástica – Sonda Tipo 2

Foram realizados alguns testes com esta sonda no município de Cachoeirinha, cidade do agreste pernambucano, distante do Recife cerca de 160 km. O primeiro ensaio de campo teve duração de, aproximadamente, 3 horas. Os resultados das leituras da resistência do termistor ao longo do tempo, a partir do instante da instalação a 80 cm de profundidade, são apresentados no gráfico da figura 5.

Figura 5 – Variação de Resistência x Tempo (Sonda Tipo 2)

A curva registrada mostra um contínuo aumento do valor da resistência do termistor, o que é equivalente a uma diminuição gradual da temperatura. Passadas 2h30min o sensor não revelou qualquer sinal de estabilização da temperatura. Inicialmente tal fato foi interpretado como uma consequência do material utilizado no corpo da sonda, a mangueira plástica. Especulou-se que devido à baixa condutividade térmica do plástico, este demorava para equilibrar sua temperatura com o solo, influenciando as leituras obtidas.

Para verificar a influência da mangueira plástica nas leituras da resistência do termistor, foi confeccionada uma nova sonda com a haste toda de alumínio, conforme mostra a figura 6, sendo esta instalada, em um novo teste, ao lado da sonda de mangueira plástica.

Figura 6 – Sonda de Temperatura Tipo 3

Esse teste foi realizado no dia 20/06/96, iniciado às 7 horas, sendo as variações de temperatura observadas por cerca de 12 horas. Após este período foi obtido como resultado o gráfico da figura 7. Para ambas as sondas o gradiente da reta de ajuste diminuiu significativamente após 18 minutos de observação. Após este instante ambas as curvas apresentavam o mesmo gradiente até 300 minutos, quando a sonda de alumínio, que estava mais rasa, apresentou na sua curva evidências do aquecimento diurno. Esse ensaio mostrou que a mangueira plástica não influenciou o esfriamento gradual registrado durante o primeiro teste.

Como é bastante nítido nas curvas da figura 7, após cinco horas de observação não se verificou nenhum sinal de estabilização da temperatura. Podiam então estar acontecendo dois fenômenos. A temperatura do próprio solo estaria evoluindo conforme o registrado, ou os termistores utilizados não eram confiáveis. Para verificar essas hipóteses, foi feito um experimento em ambiente de temperatura controlada. Para tanto foi montado o seguinte aparato: Em uma caixa de isopor de 45 litros, foi instalada uma lâmpada incandescente de 40 W ligada a um potenciômetro para regulagem da intensidade luminosa (variando a

corrente elétrica). A luminosidade foi ajustada de modo que a temperatura dentro da caixa de isopor não ficasse muito alta ($\pm 37^\circ\text{C}$). Em uma das laterais da caixa, na parte superior, foi instalado um termômetro digital com leitura em décimos de grau centígrado e, ao lado deste, um termistor sem nenhum revestimento (sensor limpo). Fechada caixa, aguardou-se a temperatura interna ficar mais ou menos equilibrada ($35,6^\circ\text{C}$), para introduzir a sonda de alumínio utilizada na experiência anterior. A partir deste instante foi marcado o tempo e medidos os valores de temperatura e as resistências (termistor e sonda) em diferentes instantes. Os resultados destas observações são apresentados na figura 8.

Figura 7 – Análise da Variação de Temperatura entre a Sonda 3 e Sonda 2

Figura 8 – Análise do Termistor em Ambiente de Temperatura Controlada

A análise da figura 8 mostra de imediato que a introdução da sonda perturbou o ambiente dentro da caixa de isopor. Este fato fica evidenciado pela queda de temperatura e aumento da resistência do termistor *limpo* a partir do instante da introdução da sonda de alumínio, como também, pelo aumento de temperatura e diminuição dos valores de resistência do sensor *limpo* após a retirada da sonda de alumínio. Essas observações podem ser interpretadas do seguinte modo: ao introduzir a sonda, com uma temperatura inicial menor ($\pm 26^{\circ}\text{C}$) do que aquela no interior da caixa, houve troca de calor entre a sonda e o ar do interior da caixa, buscando atingir um novo equilíbrio térmico. O esperado, porém, seria que todo o conjunto, passado algum tempo, voltasse a temperatura registrada antes da introdução da sonda de alumínio, pois, havia uma fonte constante de calor no interior da caixa. No entanto tal situação não foi verificada e a temperatura interna da caixa de isopor equilibrou em torno dos $34,8^{\circ}\text{C}$. Tal fato deve ter ocorrido devido a impossibilidade de pôr toda sonda dentro da caixa de isopor. Foram instalados no interior da caixa apenas 40 cm, ficando de fora 80 cm. Esta porção externa da haste de alumínio deve ter facilitado trocas de calor entre a parte interna e externa da caixa.

Outra observação importante é feita comparando as curvas da sonda e do termistor sem revestimento. A evolução dessas duas curvas, durante o período em que a sonda de alumínio esteve dentro da caixa de isopor, é praticamente paralela, mostrando que o encapsulamento do termistor não alterou significativamente sua sensibilidade.

Esse experimento ainda mostrou que foram necessários 20 minutos para a sonda apresentar leituras estabilizadas. É importante ressaltar que esse tempo foi o necessário para todo o sistema atingir um novo equilíbrio e não apenas o termistor.

As observações de campo e as de laboratório mostraram que os valores medidos nos testes das sondas não foram afetados pelos materiais utilizados na confecção das mesmas. Portanto, as temperaturas obtidas foram representativas do solo naquele momento e local. Assim, pelo menos, as medições feitas após uma hora de instalada a sonda, refletem o comportamento térmico do solo daquele período de observação. Para corroborar esta afirmação, há os seguintes fatos:

- Coincidentemente as leituras foram feitas no mês que inicia o trimestre mais frio na área (junho, julho, agosto).
- Foram registradas temperaturas de até 15°C durante a madrugada na época das experiências.
- O trimestre concentra as maiores precipitações e as medidas de temperatura do solo foram em dias antecedidos por períodos chuvosos. A infiltração das chuvas pode ter perturbado o perfil térmico do solo.

Para elucidar algumas dúvidas surgidas com os testes feitos em Cachoeirinha, foi programada uma série de medições no município de Santa Maria da Boa Vista, alto sertão pernambucano.

A monitorização de temperatura em Sta. Maria da Boa Vista foi feita com duas sondas instaladas na profundidade de 0,5 m e outras duas a 1,0 metro de profundidade. Cada par de sonda era composto por uma sonda com corpo de mangueira plástica e outra de alumínio. Na sombra de uma árvore foi colocado um termômetro, com possibilidade de medir décimos de grau centígrado. As observações foram feitas durante um período de 48 horas, a partir do instante que foi colocada a primeira sonda no solo, na profundidade de 1 metro (sonda de alumínio). Decorridas 24 horas após o início das medições de temperatura, foi instalada uma outra sonda de alumínio a 1,0 metro de profundidade, próxima ao conjunto de sondas já instalado. A distância entre as sondas não superou 30 cm e segundo informações locais não chovia há pelo menos dois meses.

Os resultados de todas as medições efetuadas com o aparato acima descrito, são apresentados em forma de gráfico na figura 9 e os dados utilizados na elaboração dos gráficos estão na tabela 2.

Figura 9 – Monitorização de Temperaturas Durante 48 Horas em Sta. Maria da Boa Vista - PE

Tabela 2 – Resultado da Monitorização de 48 Horas em Sta. Maria da Boa Vista – PE

dia	hora	Tempo (min)	A	B	C	D	E	F	G
03/07/96	8:00	0		0,9357					
	8:05	5		0,9483					
	8:10	10		0,9524	0,9269				
	8:15	15		0,9541	0,9406				
	8:20	20		0,9553	0,9449	0,8967			
	8:25	25		0,9561	0,9465	0,9184			
	8:30	30		0,9568	0,9482	0,9225	0,9555		
	8:35	35		0,9572	0,9486	0,9249	0,9842		
	8:40	40		0,9575	0,9493	0,9264	0,9891		
	8:45	45		0,9577	0,9497	0,9275	0,9916		
	8:50	50		0,9580	0,9501	0,9282	0,9930		
	8:55	55		0,9582	0,9503	0,9291	0,9942		
	9:00	60		0,9583	0,9506	0,9296	0,9950		
	9:10	70		0,9586	0,9509	0,9307	0,9964		
	9:20	80		0,9588	0,9513	0,9317	0,9974		
	9:31	91		0,9589	0,9515	0,9326	0,9983		
	9:50	110		0,9591	0,9518	0,9341	0,9997		
	10:10	130		0,9593	0,9519	0,9353	1,0011		
	10:30	150		0,9594	0,9520	0,9365	1,0023		
	11:00	180		0,9596	0,9522	0,9382	1,0040		
	12:00	240	29,7	0,9598	0,9524	0,9407	1,0073		
	13:00	300	31,4	0,9599	0,9526	0,9421	1,0101		
	14:00	360	32,0	0,9601	0,9528	0,9422	1,0120		
	15:00	420	31,7	0,9603	0,9529	0,9408	1,0129		
	16:00	480	32,0	0,9605	0,9530	0,9383	1,0125		
	17:00	540	28,4	0,9606	0,9531	0,9346	1,0111		
	18:00	600	25,0	0,9609	0,9532	0,9303	1,0086		
	19:00	660	22,9	0,9611	0,9534	0,9258	1,0054		
	20:00	720	22,5	0,9613	0,9535	0,9217	1,0017		
	21:00	780	22,2	0,9614	0,9537	0,9180	0,9980		
	22:00	840	21,2	0,9616	0,9539	0,9153	0,9947		
04/07/96	5:03	1263	18,0	0,9622	0,9549	0,9185	0,9885		
	6:00	1320	18,0	0,9621	0,9548	0,9209	0,9898	1,3191	
	7:00	1380	20,3	0,9621	0,9548	0,9236	0,9916	1,2448	
	8:00	1440	-	0,9621	0,9548	0,9266	0,9936	1,0800	
	9:00	1500	24,6	0,9621	0,9548	0,9297	0,9960	0,9993	
	10:00	1560	27,0	0,9621	0,9548	0,9323	0,9985	0,8210	0,8750
	11:00	1620	30,0	0,9621	0,9548	0,9345	1,0009	0,6762	0,9042
	12:00	1680	30,4	0,9620	0,9546	0,9357	1,0032	0,5372	0,9052
	13:00	1740	32,7	0,9620	0,9547	0,9363	1,0052	0,5176	0,9055
	14:00	1800	33,1	0,9620	0,9546	0,9358	1,0066	0,5107	0,9057
	15:00	1860	33,0	0,9620	0,9546	0,9343	1,0078	0,5673	0,9057
	16:00	1920	31,2	0,9620	0,9546	0,9317	1,0068	0,6879	0,9058
	17:00	1980	28,4	0,9621	0,9546	0,9276	1,0055	0,7587	0,9058
	19:00	2100	24,2	0,9622	0,9546	0,9199	1,0001	1,0249	0,9059
	21:00	2220	22,8	0,9624	0,9548	0,9128	0,9934	1,1430	0,9060
05/07/96	6:00	2760	18,8	0,9623	0,9551	0,9162	0,9862	1,3996	0,9064
	7:00	2820	21,9	0,9621	0,9549	0,9186	0,9877	1,2570	0,9064
	8:00	2880	-	0,9621	0,9549	0,9213	0,9894	0,9870	0,9064

Legenda:

A– Temperatura do Ar em °C

B– Resistência Sonda de Alumínio instalada a 0,5 m (kΩ)

C– Resistência Sonda de Mangueira instalada a 0,5 m (kΩ)

D– Resistência Sonda de Alumínio instalada a 1,0 m (kΩ)

E– Resistência Sonda de Mangueira instalada a 1,0 m (kΩ)

F– Resistência Sonda de Alumínio instalada a 1,0 m (kΩ)

G– Resistência Sonda de Mangueira instalada na superfície do solo (kΩ)

Para facilitar a análise, inicialmente foram separados os dados das sondas instaladas a 1,0 metro de profundidade e apresentados na figura 10. A observação desta figura mostra que as curvas de variação da resistência ao longo do tempo, para ambas as sondas, apresentam um forte gradiente nos primeiros 60 minutos. A partir deste instante o gradiente é suavizado e a partir de 1440 minutos praticamente não há mais variações de temperatura, permanecendo esta condição até ao final das observações (2880 minutos).

Mais uma vez ficou evidenciado que o material utilizado na confecção da sonda, não afetou as leituras de resistência do termistor, ou seja, os valores obtidos são representativos da temperatura do solo naquela profundidade. Para melhor visualizar que a diferença de resistências encontradas entre as sondas diz respeito apenas às características físicas de cada termistor, foi feito um deslocamento no eixo vertical do gráfico da figura 10, superpondo as duas curvas. O resultado desta superposição é mostrado na figura 11, na qual nota-se o perfeito ajuste entre as curvas obtidas pela sonda de alumínio e a sonda de mangueira plástica.

As curvas obtidas com as sondas instaladas a 50 cm de profundidade (figura 9), como esperado, apresentam um formato senoidal, refletindo os períodos diurnos e noturnos. É importante notar que as influências das variações diurnas, chegam a 50 cm de profundidade com uma defasagem de aproximadamente 12 horas em relação à temperatura ambiente. Isso significa dizer que quando a temperatura do solo na superfície atinge o seu máximo um valor de mínimo é registrado a 50 cm e vice-versa.

Figura 10 – Medidas de Temperatura a 1,0 m de Profundidade

Figura 11 – Superposição das Medidas de Temperatura Feitas com Sonda de Mangueira e Sonda de Alumínio

Comparando as curvas das sondas instaladas a 50 cm de profundidade, há uma pequena diferença entre elas quanto ao instante dos máximos e mínimos. A curva obtida com a sonda de alumínio tem sempre seus pontos extremos ocorrendo um pouco antes daqueles obtidos pela sonda de mangueira. Essa defasagem pode ser atribuída ao fato da sonda de alumínio ser melhor condutora de calor. Os 70 cm da sonda expostos ao ar livre aqueceram, ou esfriaram, o suficiente para interferir nas leituras a 50 cm de profundidade.

Após 24 horas de observação foi instalada uma segunda sonda de alumínio, para medir as temperaturas a 1,0 metro de profundidade, próxima às já instaladas. O objetivo da instalação dessa nova sonda foi verificar a partir de quanto tempo reproduziria leituras similares às outras duas. Conforme estar registrado na figura 9, em menos de 100 minutos começou a evoluir de modo semelhante às anteriores.

A análise das curvas obtidas pelas sondas instaladas a 1,0 metro de profundidade, revela que a evolução da temperatura no primeiro dia foi diferente ao segundo dia de observação e que não houve estabilização total da temperatura. No primeiro dia houve um aumento gradual da resistência do termistor, conseqüentemente um esfriamento do solo. No segundo dia não ocorrem variações de temperatura significativas, fato este observado nas três sondas. Embora a 1,0 metro de profundidade não sejam notados efeitos das variações diurnas, provocadas pela alternância do dia e noite, há reflexos de dias sucessivos mais frios ou mais quentes, como já percebido em Cachoeirinha. Por

exemplo: os dois dias que antecederam os dias de observação, nesse último teste, foram dias muito frios, tanto durante a noite como durante o dia, pois havia muitas nuvens. As temperaturas nas madrugadas desses dias chegaram próximas aos 16 °C. Na própria curva de temperatura ambiente da figura 9 estar registrado que tanto o ponto de máximo como de mínimo são maiores no segundo dia. Assim o esfriamento evidenciado no primeiro dia de observação, deve ter sido em consequência do esfriamento prolongado, em toda a região, nos dias que antecederam a monitorização.

Nessa etapa de campo foi testado um novo preenchimento da cápsula de aço inoxidável. As primeiras sondas, com base nas recomendações dos colegas do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, tiveram o espaço vazio da cápsula inoxidável preenchido por uma mistura de graxa de silicone e pó de cobre na proporção de 1:1. A colocação desta mistura era extremamente complicada, devido à dificuldade de extrair todas bolhas de ar. A primeira sonda de alumínio instalada a 1,0 de profundidade teve sua cápsula de aço inoxidável preenchida apenas com pó de cobre, no entanto, as curvas obtidas não mostraram qualquer evidência que não autorize continuar preenchendo as futuras cápsulas apenas com pó de cobre.

As observações feitas nesses ensaios permitiu as seguintes constatações:

- O termistor utilizado, bem como o multímetro para as leituras de resistência são adequados aos valores de temperatura esperados na realização dos perfis.
- As sondas de alumínio podem ser utilizadas sem prejuízos da qualidade das informações obtidas.
- As cápsulas de aço inoxidável podem ter o espaço vazio preenchido com pó de cobre puro.
- As variações encontradas ao longo do dia são mínimas, não prejudicando a realização dos perfis de temperatura. Mesmo que haja variações, é possível corrigi-las.
- Deve-se aguardar, pelo menos, duas hora após a instalação da última sonda de temperatura, quando das realizações dos perfis horizontais. Este cuidado é necessário para que todas as interferências causadas no ato da instalação da sonda sejam dissipadas.

Constatada a possibilidade de utilizar as sondas de alumínio, foram construídas 20 sondas desse tipo. A primeira utilização delas foi no acompanhamento da variação vertical da temperatura do solo, a cada dez centímetros, até a profundidade de 1,0 metro. Esse acompanhamento foi realizado em Santa Maria da Boa Vista e durou 95h20min, tendo início no dia 19.01.97 às 10 horas da manhã. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 3. Para poder serem empregadas nessa tarefa, foi necessário primeiro proceder as calibrações das mesmas, porém, este assunto será abortado em detalhes no item 4.2.

Tabela 3 – Acompanhamento das Temperaturas em Graus Centígrados em Diferentes Profundidades Durante 95 Horas

Tempo (h)	Profundidade (cm)										Temperatura Ambiente (°C)
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
0,02	25,91	27,78	29,08	30,44	31,00	30,96	31,00	30,88	30,83	30,77	-
1,00	26,26	27,64	28,85	30,21	30,85	30,89	30,96	30,88	30,82	30,78	22,6
2,00	26,65	27,67	28,73	30,03	30,72	30,83	30,92	30,87	30,82	30,78	23,1
4,00	27,33	27,82	28,63	29,77	30,47	30,68	30,82	30,82	30,80	30,78	24,8
6,00	28,41	28,42	28,79	29,64	30,30	30,55	30,74	30,77	30,78	30,77	25,7
8,00	27,54	28,44	28,90	29,61	30,17	30,43	30,64	30,71	30,75	30,76	24,5
10,00	26,18	27,74	28,62	29,51	30,07	30,34	30,53	30,65	30,68	30,72	23,5
12,00	25,66	27,16	28,22	29,33	29,98	30,25	30,37	30,58	30,68	30,71	23,6
14,00	25,19	26,75	27,92	29,12	29,85	30,16	30,41	30,54	30,64	30,69	22,9
17,00	24,84	26,24	27,43	28,77	29,60	30,01	30,29	30,45	30,57	30,63	23,5
20,00	24,49	25,87	27,07	28,45	29,35	29,84	30,16	30,35	30,52	30,60	23,3
22,00	25,61	26,04	26,96	28,26	29,19	29,72	30,07	30,28	30,47	30,56	25,1
24,00	29,53	27,69	27,49	28,26	29,07	29,61	29,97	30,21	30,42	30,52	28,7
26,00	31,31	29,50	28,64	28,54	29,04	29,52	29,89	30,15	30,37	30,49	31,7
28,00	32,95	30,89	29,68	28,99	29,16	29,49	29,84	30,08	30,32	30,45	32,1
30,00	30,93	31,23	30,40	29,49	29,37	29,54	29,82	30,04	30,28	30,41	25,5
32,00	28,21	29,79	30,00	29,72	29,58	29,60	29,82	30,01	30,24	30,37	23,5
34,00	26,80	28,46	29,24	29,64	29,71	29,73	29,84	29,99	30,20	30,33	23,4
36,00	26,23	27,72	28,66	29,41	29,70	29,71	29,87	30,00	30,18	30,30	24,5
38,00	25,65	27,13	28,17	29,14	29,60	29,71	29,88	30,00	30,16	30,28	24,4
41,00	25,11	26,53	27,64	28,78	29,41	29,64	29,85	29,98	30,14	30,25	24,2
44,00	24,51	25,85	27,03	28,32	29,12	29,49	29,76	29,94	30,11	30,22	23,6
46,00	24,72	25,80	26,90	28,18	29,04	29,43	29,72	29,91	30,10	30,20	23,9
48,00	26,99	26,48	26,96	28,02	28,84	29,32	29,65	29,86	30,06	30,18	27,5
50,00	29,15	27,79	27,51	28,07	28,76	29,24	29,58	29,81	30,03	30,16	29,3
52,00	29,29	28,89	28,42	28,36	28,77	29,18	29,52	29,76	29,99	30,13	27,2
54,00	28,47	28,71	28,61	28,58	28,84	29,17	29,49	29,72	29,96	30,11	27,4
56,67	26,97	28,03	28,41	28,71	28,96	29,18	29,46	29,67	29,92	30,07	26,1
58,00	25,78	27,30	28,05	28,65	28,98	29,19	29,45	29,64	29,88	30,04	24,0
60,00	25,13	26,67	27,64	28,50	28,96	29,19	29,45	29,64	29,87	30,02	23,2
62,00	24,41	26,01	27,15	28,25	28,86	29,16	29,42	29,62	29,84	30,00	23,4
65,00	23,93	25,40	26,62	27,90	28,67	29,07	29,37	29,59	29,82	29,96	23,4
68,00	23,83	25,08	26,23	27,55	28,43	28,94	29,28	29,53	29,78	29,93	23,5
71,67	27,22	26,32	26,49	27,36	28,19	28,77	29,16	29,44	29,71	29,88	27,0
74,33	30,58	28,28	27,48	27,58	28,15	28,69	29,09	29,38	29,67	29,85	31,2
77,83	34,49	31,75	29,91	28,57	28,43	28,70	29,03	29,30	29,57	29,79	34,0
80,33	32,64	32,09	30,84	29,35	28,84	28,82	29,06	29,28	29,56	29,75	29,1
83,33	28,15	30,10	30,26	29,74	29,30	29,05	29,17	29,30	29,53	29,72	-
86,33	25,70	27,69	28,75	29,39	29,43	29,23	29,30	29,36	29,54	29,68	22,8
92,33	24,25	25,94	27,19	28,41	29,03	29,18	29,34	29,43	29,56	29,67	22,0
95,33	25,95	26,02	26,85	28,02	28,77	29,06	29,37	29,41	29,57	29,68	24,9

A partir dos dados da tabela 3 foram elaborados os gráficos da figura 12. Para não sobrecarregar um único gráfico com todas as curvas, as informações foram divididas por dia de observação.

Figura 12 – Acompanhamento da Temperatura do Solo em Diferentes Profundidades

A análise da figura 12 mostra que para profundidades mais rasas as curvas deslocam-se ao longo do eixo das temperaturas, em um vai-e-vem, devido às alternâncias de dias e noites. Essa variação das curvas praticamente estar limitada à profundidade de 60 centímetros.

A temperatura na profundidade de 1,0 metro não é afetada pelas variações diurnas, como constatado no experimento anterior, mas, é nítido que a durante as 95 horas de observação a temperatura diminuiu cerca de um grau centígrado. Tal fato demonstra a necessidade de serem feitas correções das temperaturas, quando se for elaborar mapas de temperatura e que as informações não sejam obtidas em espaço de tempo inferior a um dia. Essa variação de temperatura percebida a 1,0 m de profundidade, em um mesmo ponto de observação, é um reflexo de variações mais prolongadas, como discutido anteriormente.

Para permitir a visualização da evolução da temperatura durante toda a monitorização foi elaborado o gráfico da figura 13, sendo representadas apenas os dados para as profundidades de 1,0 m, 70 cm, 50 cm, 10 cm e da temperatura ambiente tomada à sombra.

Figura 13 – Evolução da Temperatura do Solo a Diferentes Profundidades

A análise da figura 13 mostra o seguinte:

- 1) As observações realizadas na primeira monitorização foram todas confirmadas.
- 2) A temperatura a 1,0 metro de profundidade não sofre variações perceptíveis em decorrência das alternâncias de dias e noites. A evolução da temperatura a essa profundidade é decorrente da

variação sazonal, ou de processos de aquecimento, ou esfriamento mais prolongados.

- 3) O efeito da radiação solar é atenuado com a profundidade, sendo quase nulo aos 70 centímetros de profundidade.
- 4) A curva de temperatura, pelo menos até a profundidade de 70 cm, tem o gradiente ($\Delta T/\Delta t$) nos trechos de aquecimento (subida da curva), maior do que nos trechos de resfriamento (descida da curva). Os trechos de esfriamento têm formato típico de uma curva de decaimento, o que era esperado, pois, esse se dá pela dissipação do calor acumulado durante o período de insolação.

Como as sondas de alumínio são frágeis, foi necessário desenvolver um processo de instalação adequado das mesmas. Para tanto, foram confeccionadas duas hastes medindo, cada uma, 1,20m de comprimento por 3/8 de polegadas de diâmetro, sendo uma em aço inoxidável e a outra em aço comum (vergalhão utilizado na construção civil). Em uma das extremidades de cada haste foi feita uma ponta e na outra soldada uma cruzeta.

A cravação das hastes no solo foi feita utilizando uma marreta de 5 kg para bater na extremidade com a cruzeta (foto 1). A cada marretada a haste era girada várias vezes com auxílio da cruzeta, isto até a haste atingir 1,0 metro de profundidade. A retirada da haste era feita puxando-a pela cruzeta ou com auxílio de uma alavanca, quando ficava presa ao solo. Uma vez sacada a haste, imediatamente uma sonda de temperatura era colocada no seu lugar.

Foto 1 – Cravação da Haste para Instalação das Sondas de Alumínio

Nos primeiros perfis realizados em solos aluviais o processo acima descrito funcionou a contento. Porém, quando se partiu para a instalação das sondas no manto de intemperismo do cristalino, houve muita dificuldade no processo de cravação das hastes, pois, o solo normalmente apresentava alta compactidade, não permitindo a penetração da haste, uma vez que a mesma encurvava aos golpes da marreta.

Quando o solo era arenoso e seco, embora havendo facilidade de cravação da haste, o furo era obstruído logo após a retirada da haste, o que impedia a instalação das sondas na profundidade requerida.

Em decorrência de tais problemas foi projetada uma quarta sonda, apresentada na figura 14, de modo que suportasse golpes de marreta, ou similares, e não houvesse mais a necessidade de ser retirada, como no processo de instalação das sondas de alumínio.

O material utilizado no corpo da sonda foi o tubo de aço *schedule 80* de 5/8 de polegadas de diâmetro. O comprimento permaneceu igual ao das sondas de alumínio, ou seja, 1,20 metros. A cápsula de aço inoxidável que abriga o termistor foi redesenhada, requerendo um processo de fabricação mais sofisticado. Essa nova sonda foi confeccionada na oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE.

Figura 14 – Projeto da Sonda de Temperatura Tipo 4

Na extremidade superior da sonda foi feita uma rosca na parede interna do tubo, para adaptação de uma peça, para receber os golpes da marreta no momento da instalação, denominada de *cabeça de bater*. Após a instalação da sonda era retirada a cabeça de bater e colocado no seu lugar um parafuso para proteger a rosca do tubo.

Durante a execução dos perfis de temperatura em Alagoinha, que serão descritos mais adiante, encontrou-se uma grande resistência do solo a penetração das sondas, dificultando bastante a instalação das mesmas a golpes de marreta, sendo necessário a introdução de um novo mecanismo de instalação da nova sonda.

Inicialmente foi tentado um sistema que utilizava um macaco hidráulico para 12 toneladas, tal como mostrado na foto 2.

Foto 2 – Sistema Hidráulico para Instalação de Sondas de Temperatura

Para compensar a reação do solo à ação de penetração da sonda, foram estendidos quatro cabos de aço de 5/16 de polegadas, dispostos ortogonalmente entre si. Esses cabos eram presos ao solo por hastes de ferro de 1,0 polegada de diâmetro e 50 centímetros de comprimento. Os cabos eram fixados, em uma das extremidades, com auxílio de esticadores.

Durante o projeto do sistema hidráulico, foi consultado um engenheiro civil a respeito da viabilidade de funcionamento do mesmo. A informação obtida foi que iria depender muito da natureza do solo, mas como era um sistema simples e de baixo custo, valeria tentar testá-lo nas condições de campo.

Os testes de campo mostram que o sistema hidráulico era extremamente funcional, pois uma única pessoa o operava sem despendar grandes esforços. No entanto, o solo não ofereceu resistência suficiente para ancorá-lo. Seria necessário aprofundar as hastes de fixação, inviabilizando sua utilização, pois, se recaía no mesmo problema para o qual foi projetada, ou seja, fixar uma haste a 1,0 metro de profundidade.

O projeto do próximo dispositivo para instalação da sonda de aço foi inspirado nos processos utilizados em sondagens de 2", conforme é mostrado na foto 3. Porém, da forma como foi idealizado inicialmente não funcionou devido à ausência de um guia do peso de bater.

Foto 3 – Tripé para Instalação das Sondas de Aço

No processo original utilizado em sondagens de 2", o peso de bater tem na parte inferior um guia que corre por dentro do tubo utilizado para conduzir o mostrador. Porém, por dentro da sonda de temperatura estavam os fios que ligam o termistor, o que impediu a utilização de um guia no peso de bater. Como não havia nada para direcionar a descida do peso de bater, este se comportava como um pêndulo, dificultando bastante o processo de cravação da sonda no solo.

O projeto do tripé evoluiu para um sistema de cavalete, o qual permitia a instalação de cabos guias, colocados lateralmente ao peso de bater, tal como mostrado na foto 4.

Foto 4 – Cavalete para Instalação das Sondas de Aço

Esse cavalete foi a solução adotada para a cravação das sondas de aço, onde o solo apresentava resistência elevada. Nos solos menos resistentes a cravação das sondas de aço continuou sendo feita por meio de golpes de marreta, pois, é mais rápido do que com a utilização do cavalete, dispensando a montagem e transporte do mesmo.

O projeto do cavalete foi concebido para permitir uma montagem rápida, utilizando tubos rosqueados e poucos parafusos, não sendo necessários mais de 10 minutos. O transporte de um ponto de medição para o outro pode ser feito, com todo conjunto montado, por apenas duas pessoas. Outra preocupação no projeto do cavalete foi o deslocamento em longas distâncias. É possível transportá-lo em um veículo pequeno, tipo fusca por exemplo, sem tomar o espaço dos passageiros.

4.2- CALIBRAÇÃO DAS SONDAS DE TEMPERATURA

Como nos perfis de temperatura iriam ser utilizadas pelo menos 20 sondas, haveria a necessidade de que os valores obtidos em todas estivessem relacionados a um mesmo referencial, permitindo deste modo, correlacionar as temperaturas, ou resistências, medidas ao longo do perfil, ou seja, havia a necessidade das sondas serem calibradas. As sondas de aço e de alumínio tiveram calibrações distintas, não sendo estabelecidas relações entre os dois tipos de sonda, pois, os dois conjuntos de sondas foram utilizados separadamente. A seguir será tratada inicialmente a calibração do conjunto de sondas de alumínio e em seguida as sondas de aço.

As sondas de alumínio foram primeiramente numeradas de 1 a 20, sendo adotada como referencial a sonda número 1. Portanto, cada sonda teria um fator de correção para transformar seus valores de resistência em correspondentes à sonda 1. Assim, após a correção, os valores de temperatura/resistência encontrados em um determinado perfil seriam os mesmos se o perfil fosse realizado apenas com a sonda 1.

A calibração das 20 sondas de alumínio estava inicialmente programada para ser feita em um calibrador do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, porém, o termoregulador de mercúrio quebrou, o que forçou a improvisação de um calibrador em uma caixa de isopor de 45 litros, mostrado nas fotos 5 e 6.

Na tampa da caixa de isopor foram feitos, inicialmente, cinco orifícios, dos quais três foram para as sondas, um para instalação do termômetro e outro para o aquecedor elétrico. Dos três orifícios para as sondas, dois foram destinados às sondas a serem calibradas e um para a sonda de referência, no caso a sonda 1.

Durante o primeiro experimento feito na caixa de isopor, descrito anteriormente (figura 8), verificou-se que os valores obtidos, tanto com o termistor, quanto com a sonda e o termômetro digital, não se estabilizaram satisfatoriamente. Embora mantivessem um determinado patamar de temperatura, havia uma pequena oscilação dos valores em torno deste patamar. As causas dessas oscilações de temperatura no interior da caixa de isopor estavam diretamente ligadas às oscilações externas de temperatura, indicando que o isopor, pelo menos o utilizado na caixa, não tem as qualidades de isolante térmico adequadas. Para sanar esta deficiência, a calibração das sondas teve que ser feita com a caixa de isopor preenchida com água ao invés de ar.

Para a calibração das sondas eram colocados 35 litros de água na caixa de isopor. Como a temperatura da água normalmente estava entre 26°C e 30°C, havia a necessidade de adicionar gelo à água, uma vez que a calibração deveria iniciar com temperaturas em torno de 16°C, pois, esta temperatura seria possível de ser encontrada durante a realização dos perfis. Tampada a caixa de isopor, aguardava-se todo o conjunto atingir o equilíbrio térmico para começar a calibração.

Foto 5 – Calibrador Caixa de Isopor

Foto 6 – Detalhes do Calibrador

A primeira calibração foi feita apenas para a sonda 2, para verificar a eficácia do *calibrador*. Na tabela 4 são apresentados os dados obtidos na calibração da sonda 2, realizada no dia 16/10/96 e repetida no dia 28/10/96.

Tabela 4 – Medidas de Temperatura e Resistência para as Sondas 1 e 2

<i>Dia 16/10/96</i>			<i>Dia 28/10/96</i>		
Temperatura (°C)	Resistência Sonda 1 (kΩ)	Resistência Sonda 2 (kΩ)	Temperatura (°C)	Resistência Sonda 1 (kΩ)	Resistência Sonda 2 (kΩ)
21,9	1,227	1,176	15,1	1,6551	1,5860
22,0	1,220	1,170	15,2	1,6453	1,5756
22,1	1,218	1,168	15,5	1,6263	1,5576
22,2	1,212	1,162	15,9	1,5938	1,5272
22,3	1,208	1,158	17,8	1,4655	1,4032
22,5	1,198	1,148	17,9	1,4623	1,4005
22,6	1,192	1,142	19,0	1,3940	1,3349
22,7	1,186	1,136	20,1	1,3245	1,2685
22,8	1,180	1,130	20,2	1,3217	1,2653
23,0	1,174	1,125	21,2	1,2658	1,2122
23,1	1,167	1,118	22,1	1,2172	1,1651
23,2	1,162	1,112	23,0	1,1702	1,1207
23,4	1,150	1,102	24,1	1,1199	1,0721
23,7	1,136	1,088	25,1	1,0732	1,0275
23,9	1,126	1,080	27,5	0,9692	0,9282
24,1	1,118	1,072	28,7	0,9254	0,8863
24,4	1,108	1,062	30,0	0,8771	0,8401
25,8	1,048	1,005	31,0	0,8420	0,8064
27,0	0,999	0,953	32,2	0,8031	0,7693
			34,6	0,7288	0,6979
			33,1	0,7757	0,7426

A partir dos dados da tabela 4 foi elaborado o gráfico de calibração da sonda 2, apresentado na figura 15. Durante a calibração do dia 16/10 o aquecimento da água foi feito de modo natural. Em decorrência deste fato a calibração durou 36 horas. Este longo período de tempo necessário para calibração de uma sonda, dentro de uma faixa relativamente pequena de temperatura, entre 21,9°C e 27,0°C, mostrou a necessidade da calibração ser feita com controle do aquecimento da água. Foi então idealizada a instalação de um aquecedor elétrico para a calibração do dia 28/10. Com este novo acessório, a calibração foi realizada em três horas, para uma variação de temperatura entre 15,1°C e 33,1°C.

Figura 15 – Curva de Calibração da Sonda 2

A calibração feita no dia 16/10/96, apresentou um perfeito ajuste dos pontos a uma reta passando pela origem, com coeficiente de correlação igual a 1. Como o *calibrador* utilizado foi de certa forma improvisado, devido a falta de um equipamento específico, a calibração da sonda 2 foi repetida doze dias após a primeira, para verificar se os resultados obtidos repetiam. Os resultados obtidos na segunda calibração foram semelhantes aos obtidos na primeira calibração, como mostra a figura 15. Desta forma, esta confirmada a possibilidade de utilizar o *calibrador* da caixa de isopor para calibração das demais sondas.

Embora não se dispusesse de um termômetro de precisão, a temperatura da água foi monitorada com um termômetro digital, como descrito anteriormente. O resultado desta medição também consta da tabela 4, sendo apresentado no gráfico da figura 16 a relação entre a resistência da sonda 1 e a temperatura da água.

A Análise da figura 16 mostra claramente que os pontos temperatura x resistência medidos ajustam-se perfeitamente a uma lei logarítmica, sendo o coeficiente de correlação igual a 0,99. Como os valores de resistência a serem obtidos, pelo conjunto de sondas deste trabalho, serão sempre referidos em relação à sonda 1, assim, através da equação da sonda 1 na figura 16, será possível determinar o valor da temperatura do solo, de forma bastante satisfatória, em graus centígrados.

Figura 16 – Relação entre a Temperatura (Y) e as Resistências (X)

Os resultados obtidos na calibração das demais sondas são apresentados a seguir sob a forma de gráficos nas figuras 17 e 18. Na tabela 5 estão os dados utilizados na elaboração dessas figuras.

A calibração das dezoito sondas restantes foi feita duas a duas, seguindo o seguinte procedimento: após a colocação do gelo na água aguardava-se o equilíbrio para realizar a primeira leitura. Anotado os valores de resistência das três sondas e da temperatura da água, o aquecedor elétrico era ligado por cinco minutos e em seguida feita a homogeneização da temperatura da água. Após 15 minutos o processo era repetido. A faixa de temperatura para a calibração das sondas foi estabelecida entre 16°C e 37°C, uma vez que a temperatura nos solos do nordeste brasileiro, a 1,0 metro de profundidade, variaria predominantemente nessa faixa, isso com base nas primeiras medidas realizadas e nas informações de pesquisadores consultados.

Tabela 5 – Dados da Primeira Calibração das Sondas de Alumínio

Sonda1 (kΩ)	Sonda3 (kΩ)	Sonda4 (kΩ)	T °C	Sonda1 (kΩ)	Sonda5 (kΩ)	Sonda8 (kΩ)	T °C	Sonda1 (kΩ)	Sonda9 (kΩ)	Sonda10 (kΩ)	T °C	Sonda1 (kΩ)	Sonda11 (kΩ)	Sonda12 (kΩ)	T °C	Sonda1 (kΩ)	Sonda13 (kΩ)	Sonda14 (kΩ)	T °C
1,1961	1,2221	1,1509	22,6	1,2426	1,2519	1,2539	21,6	1,7871	1,6850	1,7263	13,4	1,7424	1,7331	1,7292	13,9	1,5781	1,6487	1,5165	16,2
1,1752	1,2002	1,1315	22,9	1,1535	1,1614	1,1625	23,4	1,6753	1,5805	1,6199	14,8	1,5926	1,5841	1,5823	15,9	1,4412	1,5053	1,3836	18,2
1,1286	1,1523	1,0863	23,9	1,1081	1,1159	1,1173	24,3	1,5661	1,4726	1,5133	16,3	1,4612	1,4515	1,4509	17,9	1,3248	1,3836	1,2734	20,1
1,0230	1,0444	0,9846	26,3	1,0661	1,0727	1,0743	25,3	1,4709	1,3854	1,4212	17,7	1,3400	1,3340	1,3313	19,8	1,2204	1,2746	1,1731	22,1
0,9774	0,9979	0,9407	27,3	1,0245	1,0317	1,0332	26,2	1,3840	1,3039	1,3379	19,1	1,2295	1,2233	1,2209	21,9	1,1271	1,1770	1,0833	23,9
0,9258	0,9450	0,8909	28,7	0,9735	0,9803	0,9820	27,4	1,2193	1,1488	1,1775	22,1	1,1321	1,1260	1,1240	23,8	1,0415	1,0878	0,9999	25,9
0,8725	0,8906	0,8396	30,1	0,9209	0,9272	0,9289	28,8	1,1503	1,0836	1,1121	23,4	1,0438	1,0381	1,0366	25,8	0,9616	1,0049	0,9252	27,8
0,8218	0,8388	0,7909	31,6	0,8774	0,8829	0,8841	30,0	1,0830	1,0198	1,0468	24,9	0,9619	0,9566	0,9557	27,7	0,8927	0,9327	0,8584	29,6
0,7766	0,7925	0,7473	33,0	0,8339	0,8398	0,8409	31,2	1,0225	0,9636	0,9884	26,3	0,8934	0,8877	0,8873	29,6	0,8276	0,8645	0,7948	31,5
0,7381	0,7528	0,7098	34,3	0,7937	0,7992	0,8004	32,4	0,9561	0,8993	0,9240	27,9	0,8304	0,8246	0,8251	31,4	0,7671	0,8011	0,7367	33,3
0,6970	0,7113	0,6707	35,7	0,7579	0,7627	0,7637	33,6	0,9011	0,8475	0,8708	29,3	0,7866	0,7795	0,7810	32,9	0,7149	0,7465	0,6861	35,1
0,6607	0,6744	0,6358	37,1	0,7212	0,7257	0,7265	34,9	0,8433	0,7923	0,8146	31,0	0,7301	0,7241	0,7253	34,7	0,6565	0,6854	0,6301	37,3
				0,6905	0,6946	0,6951	36,0	0,7934	0,7461	0,7664	32,5	0,6801	0,6743	0,6759	36,5				
				0,6603	0,6641	0,6646	37,2	0,7411	0,6963	0,7152	34,2								
								0,6895	0,6495	0,6654	36,0								
Sonda1 (kΩ)	Sonda15 (kΩ)	Sonda16 (kΩ)	T °C	Sonda1 (kΩ)	Sonda17 (kΩ)	Sonda18 (kΩ)	T °C	Sonda1 (kΩ)	Sonda6 (kΩ)	Sonda7 (kΩ)	T °C	Sonda1 (kΩ)	Sonda19 (kΩ)	Sonda20 (kΩ)	T °C				
1,7167	1,6970	1,7476	14,3	1,5247	1,5096	1,5481	17,1	1,6054	1,7877	1,6464	15,9	1,6049	1,6300	1,6568	15,9				
1,5590	1,5407	1,5872	16,4	1,3786	1,3633	1,3969	19,3	1,3678	1,5228	1,4016	19,5	1,3679	1,3867	1,4111	19,5				
1,4212	1,4057	1,4467	18,5	1,2054	1,1919	1,2240	22,5	1,1839	1,3179	1,2125	22,9	1,1838	1,2004	1,2208	22,9				
1,2988	1,2846	1,3222	20,3	1,0781	1,0664	1,0936	25,1	1,0336	1,1502	1,0583	26,1	1,0336	1,0474	1,0657	26,1				
1,1976	1,1844	1,2190	22,5	0,9676	0,9580	0,9822	27,7	0,9077	1,0099	0,9291	29,3	0,9078	0,9206	0,9358	29,3				
1,0989	1,0860	1,1186	24,5	0,8526	0,8448	0,8649	30,8	0,7995	0,8895	0,8188	32,4	0,8002	0,8112	0,8261	32,4				
0,9751	0,9643	0,9923	27,4	0,7574	0,7515	0,7688	33,8	0,7088	0,7883	0,7256	35,4	0,7092	0,7196	0,7278	35,4				
0,9163	0,9069	0,9319	29,0	0,6737	0,6684	0,6841	36,7	0,6326	0,7024	0,6477	38,4	0,6337	0,6410	0,6497	38,4				
0,8558	0,8467	0,8703	30,6																
0,7769	0,7688	0,7895	33,0																
0,7191	0,7126	0,7309	35,0																
0,6621	0,6557	0,6729	37,1																
0,6028	0,5984	0,6122	39,5																

Figura 17 – Curvas de Calibração

Figura 18 – Curvas de Calibração (continuação)

Os gráficos de calibração das figuras 17 e 18 deixa claro que todas as sondas se relacionam com a sonda 1 segundo uma equação linear, cuja reta de ajuste passa pela origem (0,0). O coeficiente de correlação calculado para as retas de ajuste da calibração para todas as sondas foi igual a 1. Assim, para se encontrar o valor correspondente de resistência da sonda 1, a partir de um determinado valor de resistência obtido por qualquer sonda, basta simplesmente multiplicar o coeficiente angular da reta de ajuste da respectiva sonda pelo valor da resistência obtido pela mesma. Desde modo cada sonda de temperatura terá uma constante de calibração que corresponderá ao coeficiente angular da reta de ajuste. A fim de facilitar os trabalhos de transformação dos valores de resistência, as constantes de calibração estão agrupadas na tabela 6.

Tabela 6 – Constantes de Calibração

SONDA	CONSTANTE	SONDA	CONSTANTE
01	1,000000	11	1,005850
02	1,044170	12	1,006940
03	0,979484	13	0,957383
04	1,030900	14	1,040790
05	0,993277	15	1,011100
06	0,898473	16	0,982652
07	0,976054	17	1,010280
08	0,991927	18	0,985494
09	1,061770	19	0,985947
10	0,966309	20	0,969829

Como mencionado anteriormente, em todas as calibrações foi tomada a temperatura da água simultaneamente às leituras de resistência das sondas. A calibração de todas as sondas gerou dezenove conjuntos de pares temperatura x resistência da sonda 1, permitindo elaborar o gráfico da figura 19. As medições foram feitas em diferentes datas, mais precisamente entre 28/10/96 e 02/03/97, ou seja, um período de tempo de aproximadamente quatro meses. A equação da curva de ajuste da figura 19 corrobora a equação encontrada na figura 16, bem como mostra que não houve mudanças perceptíveis das características do termistor da sonda 1, pois, o mesmo reproduziu satisfatoriamente os valores temperatura x resistência nos quatro meses de observação. Os dados utilizados na elaboração do gráfico da figura 19 constam na tabela 7.

Figura 19 – Relação entre a Temperatura da Água e a Resistência da Sonda 1

Tabela 7 – Temperatura da Água x Resistência Elétrica da Sonda 1

SONDA1 (kΩ)	T °C	SONDA1 (kΩ)	T °C	SONDA1 (kΩ)	T °C	SONDA1 (kΩ)	T °C
1,1961	22,6	1,7871	13,4	0,7301	34,7	0,6028	39,6
1,1752	22,9	1,6753	14,8	0,6801	36,5	1,5247	17,1
1,1286	23,9	1,5661	16,3	1,5781	16,3	1,3786	19,3
1,0230	26,3	1,4709	17,7	1,4412	18,2	1,2054	22,5
0,9774	27,3	1,3840	19,1	1,3248	20,2	1,0781	25,1
0,9258	28,7	1,2193	22,1	1,2204	22,1	0,9676	27,7
0,8725	30,1	1,1503	23,4	1,1271	23,9	0,8526	30,8
0,8218	31,6	1,0830	24,9	1,0415	25,9	0,7574	33,8
0,7766	33,0	1,0225	26,3	0,9616	27,8	0,6737	36,8
0,7381	34,3	0,9561	27,9	0,8927	29,6	1,6054	15,9
0,6970	35,8	0,9011	29,3	0,8276	31,5	1,3678	19,5
0,6607	37,1	0,8433	31,0	0,7671	33,3	1,1839	22,9
1,2426	21,6	0,7934	32,5	0,7149	35,1	1,0336	26,1
1,1535	23,4	0,7411	34,2	0,6565	37,3	0,9077	29,3
1,1081	24,3	0,6895	36,1	1,7167	14,3	0,7995	32,4
1,0661	25,3	1,7424	13,9	1,5590	16,4	0,7088	35,4
1,0245	26,2	1,5926	15,9	1,4212	18,5	0,6326	38,4
0,9735	27,4	1,4612	17,9	1,2988	20,3	1,6049	15,9
0,9209	28,8	1,3400	19,8	1,1976	22,5	1,3679	19,5
0,8774	30,0	1,2295	21,9	1,0989	24,5	1,1838	22,9
0,8339	31,2	1,1321	23,8	0,9751	27,4	1,0336	26,1
0,7937	32,4	1,0438	25,8	0,9163	29,0	0,9078	29,3
0,7579	33,6	0,9619	27,7	0,8558	30,6	0,8002	32,4
0,7212	34,9	0,8934	29,6	0,7769	33,1	0,7092	35,4
0,6905	36,0	0,8304	31,4	0,7191	35,0	0,6337	38,4
0,6603	37,2	0,7866	32,9	0,6621	37,1		

Comparando a equação obtida pelo ajuste da figura 16 com a equação da figura 19, constata-se que elas são praticamente iguais. A diferença encontrada entre as duas é basicamente ao número menor de dados da primeira e o maior intervalo de temperatura observado na segunda.

Devido à boa correlação entre os valores de resistência da sonda 1 com a temperatura medida pelo termômetro do condutivímetro, mesmo não se conhecendo com exatidão a precisão desse, foi decidido que a apresentação dos perfis de temperatura seria feita em termos de valores de temperatura. Para tanto, foi utilizada a equação da curva de ajuste obtida na figura 19. É importante lembrar que necessariamente os valores apresentados não representam o valor exato da temperatura do solo no ponto de observação, mas, como mencionado anteriormente, o importante não é o valor exato da temperatura em °C em cada ponto e sim as variações laterais de temperatura.

Em agosto de 97, foi feito um perfil de temperatura para verificar a possibilidade de se definir o contato de falha entre uma bacia sedimentar e o embasamento cristalino, obtendo como resultado o gráfico da figura 20. Esse trabalho foi realizado em Roças Velhas e será detalhado mais adiante.

Figura 20 – Perfil Roças Velhas – Calumbi / PE

Na análise da figura 20 dois fatos chamaram a atenção de imediato. O primeiro foi a presença de uma anomalia térmica praticamente sobre o contato cristalino/arenito. O segundo foi a intensidade da anomalia, cerca de 9 °C. Apesar de ser um dos perfis iniciais da pesquisa, uma variação de temperatura dessa magnitude era muito alta e merecia ser melhor investigada. Com este intuito, foi refeito o perfil entre as sondas 15 e 17, com o espaçamento entre as sondas de 2 metros e não utilizando a sonda 19. O segundo perfil não mostrou a anomalia detectada pelo primeiro perfil. Portanto, devia ter ocorrido alguma alteração na sonda 19. Esses fatos mostraram a necessidade de proceder uma nova calibração das sondas. Nesta segunda calibração foi utilizado o mesmo aparato e rotina da primeira calibração, apenas o número de leituras para cada sonda foi reduzido para 6, uma vez que na primeira calibração os ajustes foram perfeitamente lineares, com coeficientes de correlação igual a 1. A rigor seriam necessários apenas duas leituras de resistência para cada sonda para se obter a reta de ajuste.

O novo conjunto de constantes para as sondas de alumínio é apresentado na tabela 8, na qual também constam, para fins de comparação, as constantes da primeira calibração. Estão faltando as informações para as sondas 16 e 20, que foram danificadas.

Na coluna *constante A*, da tabela 8, estão assinaladas as constantes obtidas na primeira calibração e na coluna *constante B* as obtidas na segunda calibração. Na coluna *B-A* constam os valores das diferenças entre a segunda e a primeira calibração para cada sonda. Na coluna *variação* está registrado quanto representam essas diferenças em percentagem, em relação aos valores da primeira calibração.

Das 18 sondas calibradas novamente apenas quatro delas apresentaram variação superior a 1% entre a primeira e a segunda calibração. As sondas 2, 4 e 10 sofreram respectivamente 4,44%, 1,22% e 7,57% de variação nas suas constantes de calibração, ou seja, valores relativamente baixos. No entanto, a sonda 19 sofreu uma variação de 46,6%, representando um valor totalmente anômalo.

Tabela 8 – Evolução das Constantes de Calibração das Sondas de Alumínio

Sonda	Constante A	Constante B	Diferença B-A	Variação (%)
1	1,000000	1,000000	-	-
2	1,004417	1,049000	0,044583	4,44
3	0,979484	0,985724	0,006240	0,64
4	1,030900	1,043490	0,012590	1,22
5	0,993277	0,997506	0,004229	0,43
6	0,898473	0,894318	-0,004155	-0,46
7	0,976054	0,978425	0,002371	0,24
8	0,991927	0,998429	0,006502	0,66
9	1,061770	1,066290	0,004520	0,43
10	0,966309	1,039470	0,073161	7,57
11	1,005850	1,005610	-0,000240	-0,02
12	1,006940	1,013130	0,006190	0,61
13	0,957383	0,962942	0,005559	0,58
14	1,040790	1,038790	-0,002000	-0,19
15	1,011100	1,016520	0,005420	0,54
17	1,010280	1,014170	0,003890	0,39
18	0,985494	0,988444	0,002950	0,30
19	0,985947	0,526538	-0,459409	-46,60

Assim, a forte intensidade da anomalia registrada no perfil da figura 20, diz respeito a uma brusca alteração nas características físicas da sonda 19. As razões que motivaram essa modificação da sonda 19, em um espaço de tempo de aproximadamente 6 meses, dificilmente poderão ser entendidas, ademais, foi um simples caso isolado.

A sonda 19 não ficou inutilizada, pois continuou registrando as variações de temperatura com a mesma sensibilidade anterior, apenas para fazer as comparações com as medidas da sonda 1 necessitava de uma nova constante.

Após a análise das duas calibrações das sondas de alumínio, recomenda-se que antes da realização dos perfis de temperatura, seja feita sempre uma calibração prévia. Este procedimento é plenamente viável, pois, com a evolução dos conhecimentos durante a pesquisa, 20 sondas são calibradas facilmente em um dia.

As medidas de temperatura da água, a exemplo da primeira calibração, mostrou que a relação entre a temperatura x resistência da sonda 1 foi alterada. Uma nova curva de ajuste e sua respectiva equação é mostrada no gráfico da figura 21.

Na primeira calibração a equação de ajuste foi $T = -24,1457 \cdot \ln(S1) + 26,9528$. Na segunda calibração a equação de ajuste foi modificada para $T = -23,8388 \cdot \ln(S1) + 27,0593$. Como ficava difícil perceber visualmente a magnitude da diferença entre essas duas equações de ajuste, foi elaborada a tabela 9 com diversos valores de resistência da sonda 1 e as respectivas temperaturas obtidas utilizando as duas equações de ajuste.

Figura 21 – Relação Temperatura x Resistência da Sonda 1 de Alumínio após a Segunda Calibração

Na coluna T1 e T2 da tabela 9 estão os valores de temperaturas calculados pelas equações de ajuste 1 e 2, respectivamente. Na coluna T2-T1 estão as diferenças entre T2 e T1 e na coluna **variação** essas diferenças são expressas em termos percentuais, em relação a T1. Para a faixa de 21°C a 37°C, a diferença de temperatura calculada pelas duas equações de ajuste chega no máximo a 0,80%, demonstrando que a sonda 1 teve comportamento semelhante a maioria das outras sondas, ou seja, houve pequenas alterações de suas características físicas.

Tabela 9 – Análise da Variação das Equações de Ajuste de Temperatura x Resistência para a Sonda 1

Sonda 1 (kΩ)	T1 °C	T2 °C	T2-T1 °C	Variação %	Sonda 1 (kΩ)	T1 °C	T2 °C	T2-T1 °C	Variação %
0,6603	36,97	36,95	-0,02	-0,06	0,9209	28,94	29,02	0,08	0,28
0,6607	36,96	36,94	-0,02	-0,06	0,9258	28,81	28,90	0,08	0,29
0,6905	35,89	35,89	-0,01	-0,02	0,9735	27,60	27,70	0,10	0,36
0,6970	35,67	35,66	0,00	-0,01	0,9774	27,50	27,60	0,10	0,36
0,7212	34,84	34,85	0,01	0,02	1,0230	26,40	26,52	0,11	0,43
0,7381	34,29	34,30	0,01	0,04	1,0245	26,37	26,48	0,11	0,43
0,7579	33,65	33,67	0,02	0,06	1,0661	25,41	25,53	0,13	0,50
0,7766	33,06	33,09	0,03	0,09	1,1081	24,47	24,61	0,14	0,56
0,7937	32,53	32,57	0,04	0,11	1,1286	24,03	24,18	0,14	0,60
0,8218	31,69	31,74	0,05	0,15	1,1535	23,50	23,66	0,15	0,64
0,8339	31,34	31,39	0,05	0,16	1,1752	23,05	23,21	0,16	0,68
0,8725	30,25	30,31	0,06	0,21	1,1961	22,63	22,79	0,16	0,71
0,8774	30,11	30,18	0,07	0,22	1,2426	21,71	21,88	0,17	0,80

A calibração das sondas de aço seguiu os mesmos procedimentos da segunda calibração das sondas de alumínio, modificando apenas o número de sondas que se calibrava por vez. Como o número de sondas de aço totalizava 25, a calibração foi feita com doze sondas de cada vez, mais a sonda padrão, que foi a sonda 1 de aço. Os dados obtidos na calibração das sondas de aço são apresentados na tabela 10. A calibração das sondas de aço durou aproximadamente 6 horas e não foram feitas medidas para relacionar as sondas de aço com as de alumínio.

Tabela 10 – Dados da Calibração das Sondas de Aço

hora	12:24	12:56	12:28	13:59	14:37	15:06	15:06	16:10	16:38	17:08	17:41	18:14	
T (°C)	10,3	15,4	20,5	25,4	29,6	34,2	38,7	13,1	18,6	24,3	31,0	37,4	
Resistência (kΩ)	Sonda1	2,0750	1,6427	1,3199	1,0766	0,9007	0,7492	0,6288	1,8197	1,4332	1,1211	0,8509	0,6613
	Sonda2								1,7807	1,3983	1,0936	0,8303	0,6453
	Sonda3								1,7749	1,3942	1,0903	0,8274	0,6432
	Sonda4								1,7665	1,3889	1,0868	0,8255	0,6414
	Sonda5								1,7561	1,3818	1,0812	0,8209	0,6377
	Sonda6								1,8572	1,4603	1,1422	0,8676	0,6742
	Sonda7								1,7414	1,3717	1,0727	0,8148	0,6334
	Sonda8								1,8054	1,4188	1,1099	0,8432	0,6555
	Sonda9								1,8731	1,4732	1,1525	0,8755	0,6806
	Sonda10								1,7383	1,3682	1,0704	0,8136	0,6330
	Sonda11								1,8877	1,4845	1,1611	0,8822	0,6865
	Sonda12	1,9870	1,5764	1,2663	1,0337	0,8653	0,7239	0,6049					
	Sonda13	2,0640	1,6367	1,3146	1,0731	0,8976	0,7474	0,6573					
	Sonda14	1,9230	1,5260	1,2260	1,0011	0,8373	0,7214	0,5853					
	Sonda15	2,0620	1,6353	1,3132	1,0717	0,8967	0,7455	0,6261					
	Sonda16	2,0180	1,6003	1,2851	1,0487	0,8774	0,7303	0,6128					
	Sonda17	1,8970	1,5044	1,2082	0,9862	0,8253	0,6865	0,5767					
	Sonda18	2,0440	1,6210	1,3017	1,0623	0,8887	0,7392	0,6209					
	Sonda19	2,1110	1,6734	1,3434	1,0964	0,9172	0,7626	0,6405					
	Sonda20	1,9810	1,5712	1,2616	1,0297	0,8615	0,7164	0,6020					
	Sonda21	2,1160	1,6763	1,3461	1,0983	0,9200	0,7643	0,6421					
	Sonda22	1,9730	1,5630	1,2557	1,0243	0,8584	0,7129	0,5988					
	Sonda23	2,0780	1,6450	1,3223	1,0783	0,9032	0,7501	0,6298					
	Sonda24	2,1340	1,6910	1,3584	1,1081	0,9278	0,7707	0,6476					
	Sonda25	2,0090	1,5910	1,2786	1,0427	0,8729	0,7260	0,6130					

A partir dos dados da tabela 10 foram montados os gráficos para a determinação das constantes das sondas. Para não carregar de informações um único gráfico, as sondas foram agrupadas 3 a 3, gerando oito gráficos, os quais são apresentados na figura 22. As 25 constantes das sondas são mostradas na tabela 11.

Figura 22 – Curvas de Calibração das Sondas de Aço

Tabela 11 – Constantes de Calibração das Sondas de Aço

Sonda	Constante	Sonda	Constante	Sonda	Constante	Sonda	Constante
1	1,000000	8	1,009020	15	1,005280	22	1,051130
2	1,023660	9	0,972099	16	1,027200	23	0,998413
3	1,026900	10	1,046880	17	1,092560	24	0,971792
4	1,031530	11	0,964629	18	1,014130	25	1,032300
5	1,036660	12	1,042350	19	0,982351		
6	0,980663	13	1,002470	20	1,046310		
7	1,044750	14	1,075025	21	0,980243		

Os pares resistência da sonda 1 versus temperatura da água permitiram elaborar o gráfico da figura 23, cuja equação da curva de ajuste foi utilizada para transformar os valores de resistência da sonda 1 em graus centígrados.

Figura 23 – Temperatura x Resistência da Sonda 1 (sonda de aço)

5- PERFIS HORIZONTAIS DE TEMPERATURA DO SOLO

Como o principal objetivo dessa pesquisa é verificar de forma experimental uma hipótese de trabalho, foi necessária, portanto, a realização de alguns ensaios de campo.

Os perfis horizontais de temperatura do solo foram realizados em três locais diferentes, mas, todos no Estado de Pernambuco. O primeiro local foi no município de Santa Maria da Boa Vista, o segundo no distrito de Roças Velhas, município de Calumbi e o terceiro em Alagoinha. O mapa da figura 24 mostra a localização dessas áreas no Estado de Pernambuco.

Figura 24 – Situação das Áreas Estudadas

Vários cuidados foram tomados na elaboração dos perfis de temperatura, a fim de se obter um maior e melhor rendimento da pesquisa, os quais são relacionados a seguir.

- a) As temperaturas foram tomadas após equilíbrio térmico. Aguardou-se para que houvesse equilíbrio térmico entre o sensor e o solo. Testes preliminares revelaram a necessidade de aguardar, pelo menos, duas horas após a instalação da última sonda.
- b) Todos os pontos de medida de temperatura foram nivelados. Os pontos de medição de temperatura foram nivelados, pelo método da mangueira, para se verificar as influências da topografia nos perfis de temperatura.
- c) Influência de sombras no solo. Foi evitada a realização de perfis passando por áreas com sombras de árvores frondosas.
- d) O fraturamento pesquisado tinha vários poços tubulares associados. Foram obtidas informações de nível estático (NE), profundidade das entradas d'água e vazão específica de cada poço a fim de caracterizar o fraturamento pesquisado.
- e) Foram Selecionados diferentes trechos da fratura para serem pesquisados.
- f) Coletas de amostras do solo. Em alguns pontos de tomada de temperatura foi coletada uma amostra de solo. Em laboratório foi feita a medida do teor de umidade, análise granulométrica e uma análise macroscópica.

5.1 – Perfis Realizados em Santa Maria da Boa Vista

O município de Santa Maria da Boa Vista fica distante do Recife cerca de 650km. Está situado na zona do Sertão e no Polígono das Secas da SUDENE. Os perfis de temperatura foram realizados na propriedade do Sr. Laudemiro Guimarães Costa ("Seu" Mirim). As coordenadas do local da sonda 1 no primeiro perfil foram 18°25'42"S e 40°10'59"W, obtidas com um GPS Garmin 45. A figura 25 mostra a localização da área pesquisada.

A escolha dessa localidade foi basicamente pelo fato de se ter todo o apoio de infra-estrutura para a realização dos perfis. Além do mais, a área contava com uma aluvião de aproximadamente 400 metros de largura e não havia chovido, pelo menos, nos últimos dois meses. Essa longa estiagem foi outro fator determinante para a seleção da área, pois, era fundamental evitar os prováveis efeitos de infiltração da água de chuva ocorridos durante a realização dos trabalhos em Cachoeirinha.

Figura 25 – Localização da Área Estudada em Sta. Maria da Boa Vista

A princípio seriam feitos apenas testes para avaliar a qualidade das sondas, porém, a aluvião pareceu uma área favorável para a medida de perfis de temperatura. Estes serviriam para verificar a operacionalidade da realização dos mesmos, o manuseio das ferramentas de instalação das sondas e o comportamento do perfil térmico de uma aluvião. Em janeiro de 1997 foram realizados dois perfis horizontais de temperatura do solo, sendo o espaçamento adotado entre as sondas, em ambos os perfis, de 20 metros. A distância entre eles foi aproximadamente de 70 metros. A figura 26 mostra um mapa do local dos dois perfis.

Além das medidas de temperatura foram também levantadas as cotas do terreno no local de instalação das sondas de temperatura. Este nivelamento foi feito com auxílio de uma mangueira transparente, preenchida com água, e duas réguas graduadas em milímetro. Foi adotado como nível de referência o leito do Riacho Alegre, no qual aflorava o freático. Ao ponto de referência foi atribuída a cota 100 metros.

Figura 26 - Posicionamento dos Perfis de Temperatura em Sta Maria da Boa Vista

Os dados obtidos com a realização dos dois perfis permitiu a elaboração dos gráficos das figuras 27 e 28. Os perfis de temperatura foram realizados em dois dias, sendo um dia para cada perfil. Foram instaladas 15 sondas no perfil 1 e 17 no perfil 2. Em ambos os perfis as sondas foram instaladas por volta das oito horas da manhã. Foram feitas três leituras de resistência, sendo uma leitura após decorridas duas horas da instalação da última sonda, outra leitura após 12 horas e a última após 24 horas. Adotou-se este procedimento para ambos os perfis. Os valores de resistência medidos foram corrigidos utilizando as constantes das respectivas sondas (tabela 6) e transformados em temperatura pela equação da figura 19. Foram traçados os perfis de temperatura para 2 horas e 24 horas após a instalação da última sonda, os quais constam na figura 27 e 28. A primeira constatação que se obtém a partir da análise dessas figuras, é que o perfil das 2 horas é paralelo ao perfil das 24 horas e que a diferença entre eles é de aproximadamente $0,2^{\circ}\text{C}$. Esta constatação corrobora a idéia inicial de se fazer as leituras de resistência das sondas após 2 horas de instalada a última sonda. A variação de temperatura em ambos os perfis foi em torno de $4,0^{\circ}\text{C}$.

Figura 27 – Perfil de Temperatura do Solo Aluvial – Perfil 1

Figura 28 – Perfil de Temperatura do Solo Aluvial – Perfil 2

Ambos, os perfis, mostram que há variações significativas de temperatura que merecem uma investigação posterior mais cuidadosa. Para isto, seria necessário a perfuração de poços de pesquisa e sondagens, caracterizando em detalhe a aluvião, o que permitiria uma melhor compreensão dos perfis de

temperatura.

Chamam atenção as anomalias registradas em ambos os perfis. No perfil 1, entre 60 e 120 metros da origem, a anomalia térmica foi de cerca de $2,5^{\circ}\text{C}$, enquanto, no perfil 2, entre 80 e 120 metros da origem, a anomalia térmica chegou aproximadamente a 3°C . Essas duas anomalias estão alinhadas segundo a direção N15E, conforme mostra a figura 29.

Como não se conhece em detalhes as características das aluviões, toda hipótese que tente explicar as anomalias registradas são meras conjecturas. Por exemplo, as anomalias estarem associadas a paleocanais, por onde as águas do freático fluiriam com mais facilidade. As anomalias também poderiam estar relacionadas a presença mais próxima, ou mais afastada, do embasamento cristalino. Muitas outras possibilidades poderiam ser ventiladas. O importante é que esses perfis mostraram que há necessidade de se investigar melhor as relações existentes, principalmente, entre a temperatura e fatores que ajudam a armazenar e captar a água subterrânea nas aluviões.

Figura 29 – Posição das Anomalias Térmicas nos Perfis de Sta. Maria da Boa Vista

Conforme visto anteriormente, Khesin e Eppelbaum (op.cit), sugeriram que fossem corrigidos os efeitos do relevo nas medidas de temperatura, fazendo a correlação entre a cota e a temperatura. Para o perfil 1, como recomenda a metodologia, foram obtidos os gráficos da figura 30, denominados de A e B. No gráfico A estão plotados todos os pares cota x temperatura medidos, os quais não apresentam qualquer tendência, tendo como coeficiente de correlação apenas 0,091. Porém, não considerando os três pontos que estão mais afastados do conjunto central de pontos no gráfico A, a configuração resultante fica conforme mostrada no gráfico B. Nesta nova disposição o coeficiente de correlação é de 0,73, valor bastante expressivo. Corrigindo os valores de temperatura, a partir das equações da figura 30, obtém-se os perfis da figura 31. O perfil B foi obtido a partir da equação do gráfico B da figura 30 e o perfil A a partir da equação do gráfico A.

A utilização da correção altimétrica requer alguma atenção, pois, apenas três pontos em um conjunto de quinze, foram o suficiente para anular qualquer relação entre a cota e a temperatura. Esse inconveniente sempre existirá quando se tiver um conjunto de dados pequeno, ou um conjunto de dados grande com várias anomalias, pois, o método busca apenas a relação entre a cota e a temperatura, ou seja, anomalias térmicas perturbam esta relação.

A aplicação da correção altimétrica ao perfil 2 foi ainda mais difícil, pois, não houve como determinar um ajuste com coeficiente de correlação satisfatório. A observação da figura 32 mostra que os pontos estão dispostos sem qualquer orientação, demonstrando que não há qualquer correlação entre as cotas e as temperaturas. Além do mais, a topografia no local dos perfis é relativamente plana, o que não deve ter influenciado significativamente nas medidas de temperatura.

Figura 30 – Análise de Regressão do Perfil 1

A

B

Figura 31 – Perfis de Temperatura Corrigidos

Figura 32 – Análise de Regressão do Perfil 2

5.2 – Perfis Realizados em Roças Velhas

Apesar de Roças Velhas ser distrito de Calumbi, na zona do Sertão do Pajeú, a referência de acesso é a cidade de Serra Talhada, por ter maior infraestrutura e estar mais próxima de onde foram realizados os perfis. A cidade de Serra Talhada está distante cerca de 430 km de Recife. A referência do local é o Vereador Neco e seu filho Cícero que ajudou na elaboração dos perfis de temperatura. As coordenadas para o primeiro perfil de temperatura são $8^{\circ}05'11,9''$ S e $38^{\circ}02'27,2''$ W, tomadas com um GPS Garmin 45. A figura 33 mostra a localização da área estudada.

Simplificado a partir da Folha Betânia (SC.24-X-A-II) SUDENE/Ministério do Exército, escala 1/100.000, Segunda edição, 1972

Figura 33 – Mapa de Localização de Rochas Velhas

Os trabalhos em Roças Velhas foram realizados em duas etapas. A primeira em agosto de 97, aproveitando uma campanha de eletro-resistividade realizada pelo Laboratório de Hidrogeologia – LABHID, da Universidade Federal de Pernambuco, para a Fundação Nacional de Saúde, sendo os trabalhos coordenados pelo Prof. Edilton Carneiro Feitosa. O perfil da figura 20 foi realizado nessa primeira etapa. O objetivo dessa campanha foi a locação de poços profundos na bacia sedimentar de Betânia, para abastecimento de Calumbi. O distrito de Roças Velhas e outras localidades próximas são abastecidos por dois poços que captam as águas do Arenito Tacaratu. A oportunidade foi aproveitada para testar se, por meio dos perfis de temperatura, era possível definir o contato entre os sedimentos e o embasamento cristalino, uma vez que, se tratava de um contato abrupto, de falha, facilmente identificado em campo.

A segunda etapa foi realizada em dezembro de 1997, quando se havia compreendido o ocorrido com o perfil da primeira etapa. Nessa segunda oportunidade foi refeito o perfil da primeira etapa, além da medição de um novo perfil de temperatura e dos perfis de VLF. A figura 34 mostra um mapa com a localização dos perfis de temperatura.

Figura 34 – Localização dos Perfis de Temperatura em Roças Velhas

A execução dos dois perfis permitiu elaborar os gráficos da figura 35, para o perfil 1 e os gráficos da figura 36, para o perfil 2. Para servir como elemento de comparação foram medidos perfis de VLF, nos mesmos locais dos dois perfis de temperatura, porém, como ainda se estava em fase de adaptação com o equipamento de VLF, as informações do perfil 2 foram gravadas por cima das informações do perfil 1, sendo a falha só percebida quando já se estava no escritório.

Figura 35 – Perfil Realizado em Roças Velhas – Perfil 1

A análise da figura 35 mostra uma estreita relação entre o perfil de temperatura do solo e a topografia na parte da bacia sedimentar. No lado das rochas cristalinas, apesar da pequena extensão, não se percebe qualquer relação entre a topografia e o perfil de temperatura. As cotas a partir da sonda treze, diminuíram sempre na direção do embasamento e continuaram diminuindo em pleno domínio das rochas cristalinas, enquanto as temperaturas sobre essas rochas foram sempre crescentes.

Essa correspondência entre o perfil topográfico e o perfil de temperatura, talvez seja devido a maior ou menor proximidade do freático, no lado da bacia sedimentar. Segundo informações locais o freático estaria a menos de 2 metros.

O maior espaçamento entre a sonda 8 e 10 foi resultado da ação de pessoas desavisadas, que sacaram a sonda 9 durante o período de duas horas que se aguardava para tomar as temperaturas.

Na realização do perfil 2 houve dificuldade de cravação da haste de aço para instalação das sondas de alumínio. Em apenas dois pontos a instalação das sondas alcançou 70 centímetros de profundidade. As sondas de aço só foram

confeccionadas após os trabalhos de Roças Velhas e por isto não foram utilizadas. Por essas dificuldades o espaçamento entre a sonda 2 e 3 foi de 47 metros. Os espaçamentos entre as demais sondas foi de 10 metros.

Prevendo a dificuldade de instalação das sondas de temperatura nos futuros perfis, na realização do perfil 2 foram feitas medidas de temperatura em todos os pontos a 50 e 70 cm de profundidade, além das leituras a 1,0 metro nos locais que permitissem a instalação das sondas.

Os perfis de temperatura obtidos nas diferentes profundidades, figura 36, são curvas perfeitamente paralelas. Essa constatação indica que haveria a possibilidade de utilizar perfis realizados com medições a 50 cm, pois, o sinal é o mesmo dos perfis com medições 1,0 de profundidade.

Figura 36 – Perfil Realizado em Roças Velhas – Perfil 2

No perfil 2 não se percebe uma relação tão estreita entre o perfil de temperatura com a topografia, como no caso do perfil 1.

O perfil de VLF realizado para servir de apoio ao perfil de temperatura, mostrou uma forte anomalia exatamente sobre o contato entre o cristalino e os sedimentos.

Os trabalhos realizados em Roças Velhas mostram que é possível definir contatos geológicos, abruptos, verticais, entre rochas cristalinas e sedimentos, medindo as variações laterais de temperatura do solo.

5.3 – Perfis Realizados em Alagoinha

A escolha dessa área foi em decorrência dos estudos e da perfuração de um poço, com vazão de exploração da ordem de 10 m³/h (anômala para o cristalino nordestino) realizados pela EMATER-PE - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural, através da sua divisão de Águas Subterrâneas. Os estudos realizados consistiram de uma análise detalhada das aerofotos, perfis de eletroresistividade, perfis de VLF e ensaios de bombeamento. Ainda nessa mesma área, Ferreira (1996) desenvolveu sua dissertação de Mestrado. Todas essas informações permitiram uma boa caracterização das estruturas geológicas existentes, qualificando perfeitamente o local para os ensaios com perfis horizontais de temperatura.

5.3.1 – Caracterização e Estudos Complementares

A cidade de Alagoinha está distante do Recife cerca de 220 km, situada na Zona do Agreste. O ponto de referência inconfundível do local é o poço Salambaia I da COMPESA (companhia de abastecimento estadual), que tem um dessalinizador instalado e abastece o distrito de Perpétuo Socorro. O informante local é o Sr. Assis, operador do poço da COMPESA, cujas coordenadas são 8°31'24,6" S e 36°43'58,9" W, obtidas através de um GPS Garmin 47. Na figura 37 é apresentado um mapa com a localização da área estudada e na figura 38 um detalhe da mesma.

Litologicamente a área estudada é formada predominantemente por granitos de cor cinza, granulação média, com textura equigranular, estando associados, em pequenas porções, a granitos grosseiros, às vezes porfiríticos. É comum a presença de xenólitos de migmatitos. Macroscopicamente dominam o quartzo, feldspato e biotita. Ao microscópio observou-se uma textura granoblástica grosseira e a dominância de microclina, quartzo, plagioclásio e biotita, tendo como acessório o zircão, epitoto e opacos (Ferreira, op. cit.).

Os solos resultantes da decomposição do granito, basicamente pelos processos de intemperismo físico, são essencialmente arenosos.

Simplificado e reduzido a partir da Folha Pesqueira (SC.24-X-B-II - M11368)
SUDENE/Ministério do Exército, escala 1/100.000, Terceira edição

Figura 37 – Localização da Área Estudada em Alagoinha

Figura 38 – Detalhe da Área Estudada em Alagoíinha e Localização dos Perfis de Temperatura

Estruturalmente a área estudada está no Maciço Pernambuco/Alagoas. Raramente são observadas lineações ou foliações e inexistem dobramentos (Ferreira, op.cit.). As estruturas detectadas são apenas os fraturamentos, tanto em escala de fotografia aérea, como em escala de afloramento.

Na área trabalhada os fraturamentos têm direção dominante, aproximadamente, Norte-Sul. Esses fraturamentos, muitas vezes, não são fáceis de serem detectados nas aerofotos, constituindo verdadeiros *traços*. Normalmente não condicionam drenagem e nem há feições topográficas associadas.

O poço Salambaia I foi locado e perfurado pela EMATER-PE em abril de 1994. A vazão durante a perfuração foi de 50 m³/h (vazão de vertedouro) e resíduo seco de 10,37 g/l, com nível estático de, aproximadamente, 30 cm acima

do solo (jorrante). O poço Salambaia I tem 42 metros de profundidades, entradas d'água aos 20, 24, 32 e 38 metros. Para a vazão de 10 m³/h o rebaixamento é aproximadamente de 17 metros (Ferreira, op.cit.).

A princípio foi cogitado que o poço seria jorrante porque as fendas atravessadas teriam conexão com uma pequena barragem situada cerca de 50 m a montante do poço Salambaia I. Porém, o tempo passou, a barragem secou e o poço continuou jorrante, mesmo decorridos vários anos de estiagem. Atualmente a barragem continua seca e quando a bomba é desligada por alguns dias o poço volta jorrar.

Além da vazão excepcionalmente alta do poço para cristalino, chamou a atenção as condições onde fora locado, próximo a divisor de águas e drenagem incipiente. Essas condições, segundo as metodologias consagradas, não são favoráveis a locação de poços.

Atualmente está sendo bombeada uma vazão de 10 m³/h, da qual é ofertada à população de Perpétuo Socorro, após a dessalinização, cerca de 5 m³/h. O resíduo seco medido em julho de 98, com condutivímetro portátil Cole-Parmer, foi de 5,4 g/l.

A alta vazão de produção do poço foi atribuída inicialmente a uma provável recarga, proveniente do manto arenoso presente em toda área próxima ao poço. Para verificar a consistência dessa hipótese, foram feitos 44 furos de sondagem, distribuídos em 6 perfis. As profundidades dos furos variaram entre 0,35 e 3,10 m, com média de 1,40 metro. Apesar do material atravessado ser essencialmente arenoso e dos furos terem sido feitos em julho de 96, mês da quadra chuvosa do agreste pernambucano, nenhum dos furos apresentou vestígio de saturação (Ferreira, op.cit.). A visita de inúmeras cacimbas existentes na área também mostrou a total ausência de água no manto de intemperismo. Na tentativa desesperada de encontrar água, muitas dessas cacimbas foram cavadas até 5 metros dentro da rocha sã. Segundo relatos da população local, na época do inverno é comum a água *minar* através do contato solo/rocha. Uma hipótese levantada por Ferreira (op.cit) foi que, devido as maiores espessuras de solo estarem nas partes elevadas topograficamente, facilitaria o escoamento subterrâneo das águas das chuvas e, conseqüentemente, dificultando a acumulação de água.

Em um estágio seguinte a EMATER – PE, patrocinou a equipe do LABHID/UFPE, coordenada pelo Prof. Edilton Carneiro Feitosa, para a realização de uma campanha de eletro-resistividade para tentar melhorar o conhecimento das zonas fraturadas na região de Salambaia e Campo do Magé.

Ao todo foram realizados 07 perfis de resistividade e 04 sondagens elétricas. Os perfis totalizaram 6540 metros lineares, com espaçamento entre as estações de medições variando entre 30 e 10 metros (Feitosa, 1994).

Feitosa (op.cit) concluiu demonstrando que o método geofísico de eletro-resistividade se prestava à caracterização de zonas fendilhadas em rochas cristalinas da região e que as informações obtidas sugeriam a existência de

faixas N-S, alternando entre condutivas e resistivas. As primeiras estariam relacionadas as zonas mais fendilhadas, enquanto que nas segundas dominariam rochas mais compactas, menos fraturada. Na figura 39 são apresentados os perfis realizados e delimitação das faixas.

Figura 39 – Localização dos Perfis de Eletro-resistividade, Sondagens Elétricas e Resultados Obtidos

Em dezembro de 1997 foram feitos oito perfis de VLF na área próxima ao poço Salambaia I. A localização desses perfis é mostrada na figura 40. As medidas foram feitas com um equipamento da ABEM, o WADI. Quatro perfis tiveram aproximadamente a direção N-S, três a direção E-W e um a direção NW-SE. A definição desses perfis foi feita com base na foto interpretação realizada em trabalhos anteriores. Os perfis N-S foram feitos com o objetivo de pôr em evidência os fraturamentos E-W e os perfis E-W para detectar as discontinuidades N-S, de acordo com as exigências do método.

Os perfis de VLF foram medidos tanto nos períodos das manhãs como às tardes, porém, no primeiro turno houve mais facilidade para sintonizar sinais estáveis e de intensidade adequada.

A prospecção com o VLF feita em Campo do Magé permitiu que fosse identificado um conjunto de fraturamentos próximo ao poço Salambaia I. Concluídas as realizações dos perfis VLF, estes foram situados em um mapa, sendo em seguida marcadas as posições das anomalias nos respectivos perfis e traçadas as prováveis fraturas associadas a essas anomalias (Figura 40). Embora as fraturas detectadas pelo VLF não sejam exatamente coincidentes com as foto-interpretadas, no geral, refletem o mesmo padrão.

Figura 40 – Localização dos Perfis de VLF e Resultados Obtidos

Tanto o VLF quanto a foto-interpretação, revelaram que em torno do poço Salambaia I dominam os fraturamentos de direção N-S e E-W. As fraturas de direção N-S são do tipo tracionais abertas e difíceis de serem percebidas na foto-interpretação. Os fraturamentos de direção E-W são fraturas de alívio nas quais se encaixa a drenagem (Ferreira, Op.cit.).

Também foram acrescentadas no mapa da figura 40 as faixas resistivas, detectadas nos estudos por eletro-resistividade. Aproximadamente, essas zonas são delimitadas por fraturamentos detectados pelo VLF. Admite-se que nas faixas condutivas estejam as melhores possibilidades para locação de poços.

O fraturamento N-S que passa nas vizinhanças do poço Salambaia I com mergulho aparente para ESE, indicado pelo VLF, provavelmente deve ser o principal responsável pela alimentação do poço. Porém não se deve excluir o fato de que esse poço está locado no cruzamento de dois sistemas de fraturas. Talvez estes sistemas interligados em profundidade, estejam contribuindo para que o poço Salambaia I, apresente uma vazão específica substancialmente maior quando comparada às dos demais poços perfurados na área. O poço Salambaia II, que está cerca de 300 metros ao norte do poço Salambaia I, apresentou uma vazão específica de $0,093 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, contra $0,595 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ do poço Salambaia I. É importante ressaltar que a completa compreensão das razões que permitem a retirada de volumes d'água substanciais do poço Salambaia I, não será fácil de ser atingida. Para tanto, será necessário a realização de vários outros estudos, tanto em detalhe como de abrangência mais geral.

5.3.2 – Perfis de Temperatura

A grande dificuldade na realização dos perfis de temperatura em Alagoinha foi a instalação das sondas, pois, o solo em muitos dos locais selecionados apresentava alta compactidade, obrigando a confecção de um novo tipo de sondas e definição dos métodos de instalação mais adequados. Foi em Alagoinha que se desenvolveu o projeto da sonda de aço e os processos de sua instalação. Mesmo a sonda de aço não pôde ser instalada em qualquer local, pois, caso se forçasse a colocação, a mesma encurva aos golpes do peso de bater e não penetrava no solo, como está registrado na foto 7.

Além da resistência natural do solo, era comum encontrar a uma certa profundidade leito de seixos angulosos de quartzo, provavelmente remobilizados pela ação das chuvas. A sonda de aço de número 4 foi danificada ao se tentar atravessar um desses leitos de seixos, ficando tal como mostrada na foto 8.

Os solos de Alagoinha, e em geral os solos do semi-árido nordestino, apresentam pouca espessura. A análise do perfil do solo de várias cacimbas existentes na área revelou que o horizonte C^(*), normalmente, é o mais desenvolvido. Como mostra a foto 9, praticamente inexistem os horizontes B e A. O horizonte C, por guardar ainda muitas características da rocha sã e pelo alto teor de argila, que ajuda a unir os grãos, principalmente nos períodos secos, são aspectos que conferem aos solos do semi-árido a compactidade aqui discutida.

(*) – Definição dos horizontes conforme a Pedologia. Horizonte A – camada superior rica em húmos; Horizonte B – intermediária entre A e C; Horizonte C – rocha decomposta; Horizonte D – Rocha sã.

Foto 7 – Sondas de Aço que Tiveram a Instalação Forçada

Foto 8 – Sonda 4 Danificada por Seixos de Quartzo

Foto 9 – Perfil Típico de Solo da Área Estudada

Outra dificuldade encontrada foi a constante presença de afloramentos rochosos, impossibilitando a realização dos perfis de temperatura, tal como mostrado na foto 10. Essa dificuldade é ainda maior quando o cristalino é sub-aflorante, ou seja, está apenas a alguns centímetros da superfície, situação essa, detectada em vários locais da área estudada. Aconteceu diversas vezes escolher um local para a realização do perfil de temperatura e as sondas de aço, não penetrarem sequer 30 cm.

Foto 10 – Afloramentos Rochosos Comuns na Área Estudada

Em função dessas características do solo, os perfis de temperatura não foram feitos só onde se desejava realizá-los, mas, onde foi possível. Estava

planejado se fazer perfis de temperatura, em diversas direções, nas cercanias de todos os poços supracitados. Porém, só foi possível a realização de um único perfil próximo ao poço Campo do Magé. Nas proximidades do poço Salambaia I e do poço Salambaia dos Cordões dominavam os afloramentos rochosos, como mostra as fotos 11 e 12 respectivamente. Nas proximidades do poço Salambaia II não havia afloramentos rochosos, mas, o cristalino era sub-aflorante, dificultando bastante a realização do único perfil com apenas 120 metros de extensão. Tais características impossibilitaram totalmente a realização dos perfis de temperatura nas proximidades desses poços.

Foto 11 – Proximidades do Poço Salambaia I

Foto 12 – Proximidades do Poço Salambaia dos Cordões

Todas essas dificuldades fizeram com que a realização dos perfis de temperatura em Alagoinha consumisse quase 7 meses de trabalho, sendo a maior parte do tempo gasto para desenvolver um tipo de sonda próprio bem como o processo de sua instalação. No item sobre a confecção das sondas de temperatura, os relatos sobre a sonda de aço, desde o projeto inicial até a construção da sonda definitiva, foram reduzidos, sendo apresentado apenas os fatos julgados relevantes.

Inicialmente foi realizada uma série de três perfis paralelos, situados aproximadamente 450 m ao sul do poço Salambaia I. O espaçamento entre os perfis foi de 50 metros e a distância entre as sondas de 10 metros. Como quatro sondas foram danificadas em tentativas anteriores, só foram utilizadas 21 sondas, permitindo que os perfis tivessem 200 metros de extensão. A figura 41 mostra todos os detalhes da localização desses três perfis.

Como no perfil 1 seria a primeira vez que as sondas de aço iriam ser utilizadas foram feitas leituras da temperatura após 2 e 16 horas da instalação da última sonda. O gráfico da figura 44 mostra que as curvas obtidas nesses tempos são perfeitamente paralelas, com diferença entre elas de apenas 0,3 °C.

Figura 41 – Localização dos Perfis 1, 2 e 3 Realizados em Alagoinha

No perfil 1 e 2 foram tomadas temperaturas nas profundidades de 1,0 metro e 0,5 metro, dando continuidade às observações realizadas em Roças Velhas, para verificar a possibilidade da execução de perfis instalando no solo apenas cinquenta centímetros das sondas de temperatura.

Ao final da instalação das sondas do perfil 1, percebeu-se que seria possível enriquecer as observações, contando o número de golpes do peso de bater, necessários para a sonda penetrar 1,0 metro. A partir de então, esse procedimento foi adotado nos demais perfis.

Esse conjunto de três perfis de temperatura e o demais que serão discutidos mais adiante, tiveram como principal objetivo tentar detectar a fratura norte/sul, que passa próximo ao poço Salambaia I, detectada nas fotografias aéreas, nos perfis de VLF e pela eletro-resistividade. Embora não fosse percebida nas aerofotos no local dos três perfis, o prolongamento do seu traço passaria, conforme indicado na figura 41.

O relevo no local dos três perfis apresenta um caimento suave para leste, da ordem de 2,5% a 3%. Todas as estações de medida foram niveladas pelo método da mangueira, sendo atribuída à posição da sonda 1, no perfil 1, o valor de cota igual a 100m. As figuras 42 e 43, mostram respectivamente os perfis topográficos no local dos três perfis de temperatura e o mapa topográfico, elaborado a partir dos dados dos perfis.

Figura 42 – Perfil Topográfico dos Três Perfis de Temperatura

Figura 43 – Mapa Topográfico no Local dos Três Perfis de Temperatura

5.3.2.1 – PERFIL 1

O perfil 1 acompanhou um estreito caminho. Iniciou em um solo arado, sem qualquer cobertura vegetal. A partir da oitava estação passou para um cultivo de mandioca, com plantas da ordem de 50 cm de altura. Para facilitar a interpretação do perfil 1, as medidas feitas com as sondas a 0,5 metro e a 1,0 metro de profundidade, foram separadas em dois gráficos diferentes, sendo que esses se compõem para formar a figura 44.

A primeira observação que se faz a partir da figura 44 é que o perfil obtido com leituras de temperatura a 0,5 metro é bastante semelhante ao perfil obtido a 1,0 metro, apesar de pequenas diferenças localizadas.

Definindo como “background” a temperatura média, ambos os perfis apresentam duas anomalias negativas e uma positiva. Porém, considerando que o perfil 1 foi realizado atravessando duas situações distintas de cobertura de solo e admitindo que para cada tipo haveria um “background” específico, a reinterpretação segundo esse novo enfoque, mostraria apenas uma anomalia negativa aos 170 metros, como mostra a figura 45. Essa anomalia é melhor evidenciada no perfil realizado com leituras a 50 centímetros de profundidade. Nesta profundidade o efeito da passagem do solo arado para o solo cultivado é melhor percebido. Talvez, essa diferença, entre as curvas obtidas aos cinquenta centímetros e a 1,0 metro, seja um reflexo da posição do perfil, pois, o mesmo não atravessou pelo meio do roçado de mandioca, apenas o margeou, tal como mostra na foto 13.

A única incongruência notada, foi o “background” do lado cultivado ser

maior do que o do lado com solo sem cobertura, quando o esperado seria o inverso, pois, a vegetação protege o solo da irradiação direta do sol e, conseqüentemente, minimiza o aquecimento, ao contrário do solo descoberto. Essa diferença de “background” fica ainda mais inexplicável, quando se sabe que as condições de cobertura do solo, na época das medição dos perfis, estavam estabelecidas há mais de um mês.

Figura 44 – Primeiro Perfil de Temperatura do Solo de Alagoinha

Figura 45 – Reinterpretação do Perfil 1

Foto 13 – Detalhe do Perfil 1

Tanto para o perfil 1, como para os demais perfis foram medidos perfis de VLF. Estes perfis começaram 50 metros antes da primeira sonda de temperatura e terminaram 50 metros após a última sonda. As estações dos perfis de VLF foram espaçadas de 5 metros e todos os perfis foram realizados na parte da manhã, pois, os levantamentos feitos em dezembro de 1997 mostrou que nesse período do dia havia uma melhor sintonia dos sinais. Todos os perfis foram realizados com o equipamento sintonizado na frequência 23,9 kHz. Como o “software” que acompanha o equipamento ainda é para sistema DOS, os gráficos que o mesmo produz não puderam ser incorporados diretamente no corpo deste texto. Portanto, os gráficos foram digitalizados e selecionada apenas a parte coincidente com os perfis de temperatura, permitindo uma melhor apresentação, bem como, melhor correlacionar os vários perfis.

A comparação entre os perfis de temperatura e VLF, figura 46, mostra que há apenas uma única anomalia de VLF, característica de zonas condutivas. Esta coincide com a anomalia negativa dos perfis de temperatura conforme a segunda interpretação, mas, também coincidiria com a primeira anomalia negativa, contando de oeste para leste, na primeira interpretação do perfil.

Tentar decidir qual das duas versões de interpretação do perfil 1 é a mais consistente, sem considerar os outros dois perfis, seria uma escolha incompleta. Por isso, ao final da análise dos três perfis será feita uma avaliação do conjunto de informações para definir a melhor versão.

Figura 46 – Perfil 1 de Temperatura do Solo em Alagoinha

5.3.2.2 – PERFIL 2

No perfil 2 também foram feitas medidas de temperatura a 0,5 e a 1,0 metro de profundidade. Foram contados os golpes necessários para a penetração da sonda tanto para 0,5 m como para 1,0 m. O perfil 2 também passou de solo arado para solo com cobertura vegetal. Ao contrário do perfil 1, o perfil 2 atravessou a área cultivada e não apenas a margeou.

Pelas mesmas razões consideradas no perfil 1, inicialmente serão analisados em separado os perfis de temperatura para 0,5 e 1,0 metro, os quais são integrantes da figura 47.

Figura 47 – Segundo Perfil de Temperatura do Solo de Alagoinha

De imediato percebe-se que a curva obtida com as medidas de temperatura a 0,5 metro tem praticamente a mesma forma da curva obtida com as temperaturas de 1,0 metro de profundidade.

No caso do perfil 2 também cabem duas formas de analisar as curvas de temperatura. A primeira seria sem considerar as possíveis diferenças entre solo com cobertura vegetal e solo apenas arado. Esta maneira de interpretar é a que consta na figura 47, na qual aparecem duas evidentes anomalias positivas, uma aos 100 metros e a outra a 180 metros da origem do perfil.

A outra maneira seria considerando os efeitos das diferentes coberturas do solo. Para esta situação os perfis seriam interpretados tal como mostra a figura 48.

Figura 48 – Reinterpretação do Perfil 2

Na figura 49 foram reunidas, em forma de gráficos, todas as informações obtidas na elaboração do perfil 2.

Figura 49 – Gráficos do Perfil 2

Comparando o gráfico das temperaturas com o de número de golpes, há uma ligeira semelhança na forma das curvas de ambos os gráficos. Essa similaridade tem como reflexo um coeficiente de correlação de 0,69 quando se faz o ajuste linear para os pares número de golpes x temperatura, mostrado no gráfico da figura 50.

Figura 50 – Relação entre o Número de Golpes e a Temperatura para 1,0 m de Profundidade no Perfil 2

O perfil de VLF não apresentou anomalias tão claras como no caso do perfil 1. Considerando apenas a componente real, duas discretas anomalias podem ser separadas, uma a 100 metros e a outra entre 160 e 170 metros. Essas duas anomalias de VLF coincidem, aproximadamente, com as duas anomalias térmicas positivas da primeira versão de interpretação.

5.3.2.3 – PERFIL 3

Realizado 50 metros ao sul do perfil 1, não teve variação lateral de cobertura vegetal. Todo o perfil foi medido ao longo de uma plantação de capim rasteiro. A temperatura foi medida apenas a 1,0 metro de profundidade e, além do perfil de VLF e da contagem do número de golpes necessários para instalação da sonda, foram coletadas amostras de solo, também a 1,0 metro de profundidade, nos mesmos locais em que foram medidas as temperaturas, para determinação do teor de umidade. Todos esses dados originaram gráficos que, reunidos, compuseram a figura 51.

Figura 51 – Gráficos do Perfil 3

O perfil 3 de temperatura, como esperado, não apresentou nenhuma configuração que pudesse ser atribuída às variações da cobertura vegetal, a exemplo do ocorrido nos outros dois perfis. Como mencionado, a cobertura do solo no local do perfil 3 era de um só tipo em quase toda sua extensão. Apenas as duas últimas sondas, as instaladas mais a oeste, é que ficaram em solo sem cobertura.

A análise do perfil de temperatura, revela aos 110 metros uma nítida anomalia negativa de temperatura de quase 1 °C. Diferente dos demais perfis, aqui só coube uma única versão de interpretação.

Os teores de umidade foram obtidos a partir das amostras coletadas, que foram acondicionadas em recipientes herméticos, de modo a garantir que a umidade das mesmas não evaporasse, ou a umidade do ar as contaminassem. Uma vez no laboratório, uma porção da amostra era colocada em um cadinho de porcelana, que previamente passava 30 minutos secando a 130 °C na estufa. Todo o conjunto, cadinho mais amostra, era pesado em uma balança com precisão de 0,0001 grama. Em seguida a amostra era colocada na estufa para secar durante 3 horas a 130 °C. No traslado da amostra da estufa para a sala da balança e vice-versa, a mesma era colocada em um dessecador. Transcorrido o tempo de secagem a amostra era repesada. A diferença de peso entre a amostra seca e a amostra inicial foi atribuída à umidade, cujo valor em percentagem foi determinado em relação ao peso da amostra inicial.

Comparando visualmente as curvas do gráfico da umidade com as curvas do gráfico da temperatura, percebe-se que há pouca semelhança entre elas. O mesmo ocorre comparando a temperatura e o número de golpes necessários para instalar a sonda a 1,0 metro. A comparação entre o gráfico da umidade e o número de golpes, mostra que esses guardam alguma semelhança entre si. Essas constatações visuais podem ser corroboradas pelas análises de regressão que compõem a figura 52. Conforme percebido visualmente a melhor correlação, $r = 0,43$, foi entre a umidade e o número de golpes e a pior correlação, $r = 0,19$, foi entre a temperatura e o número de golpes.

A análise de regressão mostra que a anomalia registrada no perfil de temperatura deve ser em consequência de outras variações e não em função da umidade do solo, ou da sua compactação. As variações de temperatura também não são em função da natureza do solo, pois, o exame macroscópico das amostras coletadas, com auxílio de lupa, mostrou que praticamente não há diferenças na constituição do solo atravessado. Esta característica foi confirmada com a análise granulométrica feita em 14 amostras do perfil 3, cujos resultados são apresentados na figura 53. Essa análise foi feita no Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha – LGGM do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. Como demonstra a figura 53, praticamente não houve variação na constituição granulométrica ao longo do perfil 3, pois, as curvas são quase que coincidentes. Além das frações retidas nas diversas peneiras, a análise granulométrica também fornece os teores de cascalho, areia e silte/argila de cada amostra. O teor de cascalho

é toda a fração da amostra retida na peneira de 2mm. O teor de areia é todo o sedimento que passou pela peneira de 2mm e ficou retido na peneira de 0,063mm. O teor de silte/argila representa a porção da amostra que passou pela peneira de 0,063 na lavagem da mesma.

Figura 52 – Análises de Regressão para o Perfil 3

O perfil de VLF, medido ao longo do perfil 3 de temperatura, não contribui

para melhorar o conhecimento das causas da anomalia térmica. De forma muito discreta são percebidas anomalias aos 110 e 180 metros, registradas pela curva da componente real.

Figura 53 – Análises Granulométricas de Amostras do Perfil 3

A partir desses três teores foram elaborados os gráficos dos mesmos em relação à distância, para comparar com o perfil de temperatura. Os três gráficos dos teores, juntamente com gráfico de temperatura do perfil 3 foram agrupados na figura 54.

A análise da figura 54 revela que o perfil de temperatura não tem relação com os teores de silte/argila e areia do solo. A comparação da curva de cascalho com a curva de temperatura mostra que o pico máximo do teor de cascalho está posicionado muito próximo do local da anomalia negativa de temperatura.

A interpretação para tal fato é que solos com maior quantidade de sedimentos mais grosseiros devam ter uma maior quantidade de poros intercomunicados, o que equivale a uma maior permeabilidade. Esta situação permitiria com mais facilidade a troca de ar dos poros e, conseqüentemente, uma maior troca de calor.

Figura 54 – Comparação do Perfil de Temperatura com os Teores de Cascalho, Areia e Silte/Argila – Perfil 3

A partir das análises dos dados coletados na realização do perfil 3, é lícito admitir que o sinal de temperatura obtido deve ser reflexo de alguma estrutura mais profunda, tal como a fratura que se estava pesquisando. No entanto, não se conhece que processos permitiram o seu reflexo nas partes mais superficiais do solo. A variação de umidade do solo, que se imaginava inicialmente relacionada com a temperatura, não correspondeu ao esperado. Ficou evidenciado que a umidade do solo está mais relacionada com o grau de compactação do solo. Solos mais úmidos são mais fáceis de serem atravessados pelas sondas de temperatura, ao contrário dos solos mais secos. De todas as variáveis utilizadas no relacionamento com a temperatura, apenas o teor de cascalho do solo foi o que melhor respondeu. Talvez o reflexo da fratura pesquisada se manifeste apenas em função da troca de calor favorecida pelo solo com maior teor de cascalho, como especulado anteriormente.

5.3.2.4 – ANÁLISE INTEGRADA DOS PERFIS 1, 2 E 3

A maneira mais adequada para se fazer a análise conjunta dos três perfis foi através de um mapa, no qual foram marcadas as anomalias encontradas, segundo todas as interpretações feitas para cada perfil. Com retângulos vermelhos foram marcados as anomalias positivas e com retângulos azuis as anomalias negativas. Todas essas informações são parte integrantes do mapa da figura 55.

Figura 55 – Integração da Análise dos Perfis 1, 2 e 3

A análise da figura 55 mostra que a anomalia positiva do perfil 1, a primeira anomalia positiva do perfil 2 e a anomalia negativa do perfil 3 estão alinhadas, mais ou menos na direção N-S. Embora a anomalia do perfil 3 seja de sinal contrário das outras duas, não há como negar que as três anomalias possam pertencer a um mesmo sistema de fraturamento. Além do mais, o alinhamento dessas três anomalias é praticamente coincidente com o prolongamento do traço de fratura, detectado na fotografia aérea, que passa nas proximidades do poço Salambaia I.

As anomalias negativas sugerem dois alinhamentos, que poderiam ser reflexos de duas fraturas com direção aproximada NE-SW. Embora fraturas nesta direção não tenham sido percebidas em fotografias aéreas nas proximidades de poço Salambaia I, foram identificadas em escala de afloramento. No mapa geológico apresentado por Ferreira (op. cit.), há diversas fraturas de direção NE-SW fotointerpretadas a menos de 2 km, tanto a NE como a SW do local dos perfis 1, 2 e 3.

Para tentar melhorar a compreensão dos dados levantados, foi elaborado o mapa de temperaturas da figura 56. Embora não se tenha mantido uma sonda fixa durante a realização dos três perfis, para possibilitar as correções dos valores de temperatura medidos, foi admitido que as variações de temperatura do solo ocorridas no intervalo inferior a 48 horas, tempo necessário para a realização dos perfis, não tenham sido significativas. Portanto, o mapa traçado serve, pelo menos, para se verificar o comportamento geral das temperaturas do solo na área.

Figura 56 – Mapa de Temperatura no Local dos Perfis 1, 2 e 3

As isolinhas de temperatura, apesar da diferença de espaçamento entre os perfis e o espaçamento das sondas, que é de cinco vezes, apresentam nítida tendência de alongamento na direção N-S. Das prováveis fraturas interpretadas a partir da figura 55, apenas a que foi definida pelas anomalias positivas coincide com a porção mais “quente”, marcada pela cor laranja, e a mais fria, marcada com a cor azul, no mapa da figura 56.

Os dados obtidos, e aqui discutidos, levam a admitir que a fratura N-S, cuja existência em diversas porções da área foi comprovada por várias metodologias, também foi detectada pelos perfis de temperatura.

Um dado importante levantado na realização desses três perfis, foi o registro de uma mesma fratura apresentar em determinado trecho anomalia positiva e em outro anomalia negativa. É fundamental, na continuidade das pesquisas, entender se essas variações de temperatura realmente ocorreram e, em caso afirmativo, por quais razões. Como o perfil de temperatura não mostrou praticamente nenhuma relação com teor de umidade do solo, poder-se-ia imaginar, por exemplo, fluxos convectivos de calor dentro da fratura. Kapelmeyer (op.cit.), citou esse tipo de fluxo em fraturas, durante trabalhos realizados na Alemanha. Haveria também a possibilidade das anomalias aqui registradas, estivessem associadas a uma maior, ou menor, profundidade do embasamento cristalino. Todas essas considerações são apenas conjecturas, pois, só a continuidade dos estudos

aqui iniciados poderá trazer mais informações, permitindo, talvez, obter as respostas para esses questionamentos.

Como sugestão para futuro detalhamento, seria recomendada a adoção das seguintes etapas de trabalho:

- * Repetição dos três perfis e a realização de novos perfis entre eles, de modo que a distância entre os perfis fosse de 25 metros.
- * Realização de dois novos perfis ao norte e dois ao sul, em relação aos três perfis existentes. Esses novos perfis também seriam separados de 25 metros. Portanto, o total seria de nove perfis.
- * Realização de sondagens nos locais de medição de temperatura, para determinar a profundidade do embasamento cristalino.
- * Coletas de amostras em todos os pontos para determinação do teor de umidade e da curva granulométrica.
- * Coletas de amostras do cristalino alterado para verificação do teor de umidade.

5.3.2.5 – PERFIL 4

O perfil 4 foi o único que pôde ser realizado próximo a um poço tubular, mais precisamente a 5,0 metros de distância. O poço em questão é denominado de Campo do Magé, em referência à localidade em que está situado. O pequeno arruado de Campo do Magé, dista cerca de 500 metros do perfil 4. A figura 57 mostra um mapa com os detalhes das imediações do perfil 4.

Figura 57 – Localização do Perfil 4

No perfil 4 também foram medidas temperaturas a 0,5 e 1,0 metro de profundidade, porém, com uma pequena diferença no procedimento de medição. Nos outros perfis foi adotada a seguinte seqüência. Instalada as sondas a 0,5 metro, eram feitas as leituras para esta profundidade e, em seguida, aprofundava-se as sondas para 1,0 metro. No perfil 4, com a intenção de verificar se a calibração das sondas ainda era válida, primeiro foram feitas as medições de temperatura para 1,0 metro de profundidade e, em seguida, todas as sondas foram sacadas. No dia seguinte, de forma aleatória, foram reinstaladas para as leituras a 0,5 metro. Assim, os pontos de medição foram os mesmos, mas, as sondas utilizadas foram diferentes para as tomadas das temperaturas nas duas profundidades. Esse procedimento foi adotado, por causa dos fortes golpes recebidos pelas sondas durante a instalação, os quais de alguma forma poderiam estar danificando-as. Também foram contados os golpes necessários para instalar a sonda a 1,0 metro de profundidade e medido o perfil de VLF. Todos esses perfis foram agrupados para compor a figura 58.

Figura 58 – Perfil 4

A cobertura do solo no local do perfil 4 até às proximidades da décima sonda, era apenas um solo arado, aguardando chuvas para ser cultivado. A partir desse ponto o solo apresentava apenas algumas manchas esparsas e ralas de gramíneas, tal como mostra a foto 14.

A comparação entre os perfis de temperatura obtidos a 0,5 metro e a 1,0 metro, mostra um quase perfeito paralelismo, o que ratifica, mais uma vez, a possibilidade de serem feitos perfis com medição das temperaturas a apenas 0,5 metro. A escolha aleatória das sondas para as medições das temperaturas a 0,5m, não alterou os resultados obtidos, mostrando que não houve mudanças significativas nas constantes de calibração das sondas.

Foto 14 – Aspectos do Solo no Local do Perfil 4

A análise dos perfis de temperatura mostra de imediato um nítido degrau, de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$, entre as medidas realizadas sob o solo arado e as realizadas sob o solo sem cobertura. No perfil 4, ao contrário dos perfis 1 e 2, o efeito da aração do solo foi como o esperado. Um solo arado, em

função da ondulação criada, tem uma superfície de exposição maior do que um solo plano. Conseqüentemente, um solo arado receberá uma maior quantidade de radiação solar, o que resultará em um maior aquecimento, se comparado a um solo plano sem cobertura, ou com cobertura vegetal.

Separando o perfil de temperatura em função da natureza da cobertura do solo, percebe-se que há duas fracas anomalias negativas. A primeira na parte do solo arado, logo no início do perfil, de aproximadamente 0,4 °C. A segunda anomalia ocorreu na transição dos dois tipos de cobertura do solo. Não se sabe até que ponto essa zona de transição poderia influenciar na intensidade da segunda anomalia. Porém, é lícito imaginar que se a diferença é devida apenas à natureza da cobertura do solo, não haveria razões para ocorrer uma queda tão forte de temperatura. Simplesmente deveria haver a mudança de patamar de temperatura, formando apenas um degrau.

O poço Campo do Magé foi locado durante os estudos de eletro-resistividade e VLF, descritos anteriormente. Segundo esses estudos, a mesma fratura que passava nas proximidades do poço Salambaia II e Salambaia I estaria passando em Campo do Magé. Dos três poços, o Campo do Magé foi o que apresentou menor vazão de produção, apenas 1,0 m³/h, enquanto o poço Salambaia II pode produzir 3,0 m³/h e o poço Salambaia I 10 m³/h. Esses três poços estão alinhados segundo a direção N-S, conforme foi mostrado na figura 38. Segundo os dados de vazão de produção, há uma diminuição da mesma no sentido norte, o que poderia ser apenas um reflexo da diminuição de capacidade para produzir água da fratura, ou talvez a locação não tenha sido precisa, coincidindo com trechos pouco produtivos da fratura.

Admitindo que a fratura apresente uma diminuição da sua capacidade de produção de água de sul para norte, talvez esse fato explique as fracas anomalias de temperatura registradas no perfil 4.

A comparação visual do gráfico do número de golpes para instalação das sondas a 1,0 metro de profundidade com o gráfico da temperatura mostra, mais uma vez, que não há qualquer relação entre eles, vindo essas observações ao encontro da hipótese de que as variações de temperatura não estão associadas às variações de compacidade do solo. Foram coletadas apenas duas amostras, uma no local mais compacto, 148 golpes, que coincide com segunda anomalia negativa de temperatura, e outra no local menos compacto, 37 golpes, que foi no local da penúltima sonda. A umidade determinada para essas amostras foi de 1,43% e 2,40%, respectivamente. Apesar de se dispor apenas de dois dados de umidade, os mesmos são suficientes para mostrar que a diminuição de temperatura não está ligada a um aumento de umidade, mas, como visto anteriormente, a umidade está mais relacionada com o grau de compacidade do solo.

O perfil de VLF mostra três anomalias indicativas de zonas fendilhadas. Uma em cada extremidade do perfil e a terceira aos 115 m. Esta última está

nas proximidades do poço Campo do Magé e deve ter servido de base para a locação do mesmo. A anomalia do extremo NW do perfil coincide com uma anomalia negativa de temperatura, assim como a anomalia central de VLF. A anomalia do extremo SE não tem qualquer correspondência no perfil de temperatura. A anomalia de VLF, na porção central do perfil, não coincide exatamente com a anomalia de temperatura, que está deslocada cerca de 20 metros para NW. Talvez o deslocamento do poço neste sentido melhorasse sua capacidade de produção. Há casos de poços perfurados, distantes apenas 5,0 metros, com vazões bastante distintas.

5.3.2.6 – PERFIL 5

O perfil 5 foi realizado cerca de 100 metros ao norte do poço Salambaia II. Devido à dificuldade encontrada na instalação das sondas ficou com apenas 120 metros de extensão. A figura 59 mostra o mapa de situação do perfil 5.

A característica arenosa do solo, nas proximidades do poço Salambaia II, induziram a acreditar que o mesmo seria facilmente atravessado pelas sondas de temperatura, no entanto, vários perfis foram tentados sem sucesso. As primeiras tentativas foram com as sondas de alumínio, seguidas outras tantas com as sondas de aço. Basicamente dois fatores contribuíram para dificultar a realização dos perfis. Primeiro a presença de níveis de blocos de quartzo angulosos e segundo a compacidade do solo. Levantamentos feitos em campo e as observações de algumas escavações, mostraram que a rocha alterada estava muito rasa, em alguns locais menos de 30 cm. Segundo informações dos moradores do local, as escavações para instalar os postes, que levam a energia elétrica até o poço Salambaia I, foram feitas com auxílio de um martelo pneumático, pois, não foi possível utilizar métodos tradicionais.

Mesmo as sondas de aço foram danificadas quando se tentou a realização de alguns perfis, como mostradas anteriormente. A única maneira encontrada para realização do perfil 5 foi a escavação manual, utilizando uma barra de ferro como cavador. Este foi empregado para escavar o solo até cerca de 60 centímetros, permitindo a cravação da sonda aos 70 centímetros de profundidade. O material escavado era depositado em um tubo de pvc, para após cravada a sonda ser retornado a escavação. Dessa forma, esta era preenchida voltando o material retirado, aproximadamente, para a mesma posição de onde fora retirado. A preocupação de repor o material escavado de volta ao seu lugar de origem, foi para tentar preservar o máximo possível as características do local de instalação das sondas. A foto 15 mostra esse processo de escavação e acondicionamento do material retirado, para a instalação das sondas de temperatura.

Além das medições de temperatura, foram coletadas amostras para determinação do teor de umidade, medido o perfil de VLF e feito o nivelamento de mangueira, no qual, foi atribuída a cota 100 metros para a posição da sonda 1. Todas essas informações foram colocadas na forma de gráficos, os quais são apresentados na figura 60.

Figura 59 – Detalhes das Proximidades do Perfil 5

Foto 15 – Detalhes do Processo de Instalação das Sondas no Perfil 5

O espaçamento entre as sondas, como nos demais perfis, foi de 10 metros, porém, não foram feitas leituras com a sonda 2, pois, o fio que liga o termistor foi rompido. Por esta razão, apenas o espaçamento entre a sonda 1 e 3 ficou em 20 metros.

Ao longo do perfil 5 não havia praticamente nenhuma cobertura vegetal, nem o preparo do solo para o cultivo, nem a presença de qualquer árvore, ou arbusto, que pudesse influenciar na caracterização do perfil de temperatura.

O perfil de temperatura obtido tem uma forma que dá margem a duas interpretações. A primeira seria a presença de duas anomalias positivas, com intensidade de aproximadamente $0,8^{\circ}\text{C}$ e a segunda seria apenas uma anomalia negativa. O importante é ressaltar que o traço da fratura foto-interpretada passa exatamente entre as duas anomalias positivas, ou coincide com a anomalia negativa. Desta forma, há fortes indícios de que a fratura seja a responsável pelo sinal térmico registrado.

O perfil de umidade não apresenta qualquer relação com o perfil de temperatura, tal como nos casos anteriores. Se observada atentamente, a tendência geral da curva de umidade é o inverso da tendência do relevo, ou seja, o relevo apresenta um suave caimento de oeste para leste, enquanto a umidade aumenta levemente no mesmo sentido. Essa relação foi percebida, em menor intensidade, no perfil 3, tanto que, não se comentou esse fato na análise do mesmo. Talvez no perfil 5 essa relação da umidade com o relevo seja mais perceptível devido à existência de um talvegue por onde correm as águas pluviais. No caso do perfil 3, o caimento do relevo se prolongava bastante para leste e não havia qualquer indicativo de local preferencial para o escoamento das águas.

O perfil de VLF apresenta apenas uma anomalia na curva da componente imaginária, coincidindo com o local em que passa o traço de fratura foto-interpretado e a anomalia térmica.

Figura 60 – Gráficos do Perfil 5

Das amostras coletadas no perfil 5, oito foram selecionadas para fazer análise granulométrica. A partir das frações retidas nas diversas peneiras foi elaborada a curva granulométrica para as diversas amostras, sendo essas apresentadas na figura 61.

Figura 61 – Análises Granulométricas de Amostras do Perfil 5

Ao contrário das amostras do perfil 3, no perfil 5 há uma variação bastante evidente nas características granulométricas das amostras (figura 61), talvez um reflexo devido ao material coletado ser do horizonte C do solo, enquanto no local do perfil 3 as amostras eram do horizonte B e havia sinais de transporte da cobertura arenosa, sendo, portanto, passível de seleção.

A partir dos teores de cascalho, areia e silte/argila, foi elaborado, a exemplo do perfil 3, gráficos em função da distância, para fins de comparação com o perfil de temperatura. Todos esses gráficos foram reunidos na figura 62.

Figura 62 – Comparação do Perfil de Temperatura com os Teores de Cascalho, Areia e Silte/Argila – Perfil 5

A análise dos gráficos da figura 62 mostra que os teores de silte/argila não apresentam qualquer relação com o perfil de temperatura, enquanto o gráfico dos teores de areia é, na forma, bastante semelhante ao perfil de temperatura. O teor de cascalho apresenta um pico de máximo exatamente

no local da anomalia negativa de temperatura. Portanto, a idéia de que as trocas de ar e as conseqüentes trocas de calor são facilitadas na presença de solos com maior teor de cascalho, fica reforçada com os resultados obtidos no perfil 5. A boa correspondência entre os gráficos das frações grosseiras do solo e o gráfico da temperatura, talvez se deva ao fato das amostras terem sido coletadas no cristalino alterado.

5.3.2.7 – ANÁLISE INTEGRADA DOS CINCO PERFIS

Após a realização dos cinco perfis de temperatura em Alagoinha, três constatações importantes foram alcançadas. A primeira é que há respostas no perfil horizontal de temperatura do solo que podem ser indicativas de fraturamento mais profundo. A segunda é que perfis com medidas de temperatura a cinquenta centímetros de profundidade tem a mesma assinatura dos perfis obtidos a 1,0 metro. A terceira é que a umidade do solo, no local da medição de temperatura, não influencia a forma da curva do perfil de temperatura, ou seja, não há relação entre o perfil horizontal de umidade e o perfil horizontal de temperatura do solo.

Essa última constatação vem de encontro à hipótese inicial de trabalho, que era do perfil horizontal de temperatura do solo ser diretamente afetado pelo teor de umidade do solo. Talvez a zona mais úmida acima da fratura com água, cuja existência foi admitida como base para o emprego dos perfis temperatura, esteja um pouco mais abaixo, não sendo percebida na profundidade de 1,0 metro, pois, os solos arenosos, em que foram realizados os perfis, têm o efeito da capilaridade bastante reduzido. Outro fato que poderia ter contribuído para mascarar a relação entre a umidade e a temperatura, são as altas taxas de evaporação da região. Como as amostras foram coletadas apenas a 1,0 m de profundidade e em um período de longa estiagem, a evaporação pode ter sido suficiente para uniformizar a umidade ao longo do perfil.

A única variável que se mostrou mais relacionada com os perfis de temperatura foi o teor de cascalho do solo. Porém, resta saber se as variações dos teores de cascalho determinados são em conseqüência das zonas fraturadas na rocha sã, ou se foi simples obra do acaso. Estas dúvidas só poderão ser elucidadas com a seqüência dessa pesquisa, pois, no atual estágio dos conhecimentos não se pode afirmar categoricamente qual das opções é a verdadeira. No entanto, todas as informações coletadas levam a crer que as variações de temperatura obtidas são reflexos da estrutura da rocha subjacente.

No item 3, trabalhos anteriores, foi citado que Poley e van Steveninck, 1971, fizeram menção às variações na textura e porosidade da rocha, ao longo de falhas e fraturas, como as responsáveis pelas diferenças de condutividade térmica encontradas.

5.4 – Comentários Finais

A meta inicial desta pesquisa era realizar de vinte a trinta perfis de temperatura e em diversos locais. No entanto, só foram possíveis a realização de nove perfis, dos quais apenas cinco foram plenamente no cristalino.

Ocorre que não se tinha disponível uma sonda de temperatura no mercado, pelo menos entre as empresas consultadas e pesquisadas pela Internet, para as finalidades desse trabalho. Foi necessário, assim, o dispêndio de bastante tempo na elaboração das sondas e no modo de instalação das mesmas. Várias etapas foram necessárias até chegar ao projeto da sonda final. As principais foram narradas, mas, detalhes menores que igualmente consumiram tempo não foram citados, tais como, escolha do termistor e dos métodos de medição utilizados.

Mesmo ocorrendo uma série de dificuldades, o que é normal em qualquer trabalho de pesquisa e a não realização de todos os perfis que se pretendia, a meta inicial, que era verificar a possibilidade de utilizar perfis horizontais de temperatura do solo como uma ferramenta auxiliar na locação de poços tubulares no cristalino do nordeste brasileiro, acredita-se que foi atingida. O objetivo nunca foi esgotar todo assunto apenas nesse trabalho, o que seria impossível, mas, abrir uma nova frente de pesquisa para tentar melhorar a eficiência das locações de poços no semi-árido nordestino.

Uma grande limitação da utilização dos perfis de temperatura será a impossibilidade de aplicá-los indiscriminadamente em qualquer local. Como visto, na maior parte do semi-árido brasileiro os solos são rasos e é bastante comum a presença de grandes áreas dominadas por afloramentos rochosos.

Se algum dia for possível entender que variáveis determinam as condições que tornam possíveis a existência de poços com a produção de água semelhante ao Salambaia I, sem dúvida será uma contribuição importante para a sofrida população rural do semi-árido nordestino. Com a viabilidade da instalação de dessalinizadores, o problema maior reside em melhorar a locação dos poços. Neste sentido, sem dúvida alguma, há muito trabalho a ser realizado. O caráter, provavelmente, aleatório das condições que favorecem poços com grande vazão no cristalino do semi-árido, dificultam a compreensão dos mecanismos condicionantes em cada poço.

Os métodos de locação atualmente empregados não conseguem reproduzir os sucessos conseguidos em alguns poços. Nas proximidades do poço Salambaia I vários poços, além daqueles apresentados nesse trabalho, foram perfurados e locados a partir de estudos envolvendo levantamentos geofísicos, foto-interpretação detalhada, análise do tipo de fraturamento em afloramentos. Todos os estudos realizados visaram conseguir a locação de um poço semelhante ao Salambaia I. No entanto, o que melhor se aproximou teve a vazão de produção menor do que três vezes, que foi o poço Salambaia II, situado a cerca de 300 metros do poço Salambaia I.

A probabilidade em torno de 25% de local um poço seco, é, provavelmente, a que naturalmente o meio oferece, ou seja, qualquer locação feita

utilizando qualquer método teriam as mesmas chances. O grande desafio é identificar quais as condicionantes que fazem um determinado poço ter grande capacidade de produção de água e se os mesmos fatores atuam em outros poços. Quando se conseguir esta caracterização, se terá um método eficaz de locação de poços, fugindo da aleatoriedade natural do sistema.

6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos dados colhidos e nas considerações anteriores são as seguintes conclusões:

- ✓ Foi estabelecido o tipo de sonda apropriada para medições de temperatura do solo a 1,0 metro de profundidade, bem como o processo de instalação da mesma.
- ✓ As sondas de aço são as mais indicadas para a elaboração de perfis de temperatura, pela resistência e facilidades de instalação que apresentam.
- ✓ O espaçamento de 10 metros entre as sondas é o mais adequado para estudos mais gerais. Para detalhamento o espaçamento de 5 metros é o mais indicado.
- ✓ Deve-se aguardar, pelo menos, 2 horas após a instalação da última sonda do perfil para fazer as leituras de temperatura.
- ✓ O perfil horizontal da umidade do solo está mais associado as feições topográficas e com a compacidade do solo, não sendo detectadas relações com o perfil de temperatura. As anomalias de temperatura estão mais relacionadas com os teores de cascalho do solo.
- ✓ A realização dos perfis horizontais de temperatura do solo mostrou que há possibilidades de utilização dos mesmos na identificação de fraturas, em rochas do embasamento cristalino do semi-árido nordestino.
- ✓ Perfis de temperatura obtidos com leituras feitas a cinquenta centímetros de profundidade apresentam curvas semelhantes aos perfis com leituras de temperatura a 1,0 metro profundidade. Assim, em locais com dificuldades de instalação das sondas a 1,0 metro, perfis com apenas 0,5 metro de profundidade podem ser utilizados sem prejuízo nas informações obtidas.
- ✓ O relevo, pelo menos nos casos estudados, não apresentou qualquer relação com as anomalias registradas.
- ✓ Os perfis de VLF, em geral, corroboraram na caracterização das anomalias de temperatura.
- ✓ A utilização de perfis de temperatura é bastante limitada pelo fato do cristalino no semi-árido do nordeste ser bastante raso e muitas vezes aflorante.
- ✓ Havendo condições favoráveis de solo e número suficiente de sondas, é possível a realização de 6 a 7 perfis, de 200 metros, em um único

dia, empregando apenas duas pessoas. O método caracteriza-se pela agilidade e praticidade.

- ✓ É possível definir contatos verticais a partir de perfis horizontais de temperatura do solo e perfis de VLF.

Difícilmente um pesquisa poderá ser considerada definitiva. Geralmente repostas são encontradas e surgem novas dúvidas, ou seja, sempre há algo para se compreender ou melhorar. É com este espírito que a seguir serão relacionadas algumas recomendações para orientar futuros trabalhos:

- * Para consolidar as conclusões aqui apresentadas é necessário a realização de vários outros perfis e em localidades diferentes.
- * Seguir as sugestões apresentadas na análise dos perfis 1, 2 e 3 em Alagoinha, para melhor compreender os questionamentos ali levantados.
- * Realizar estudos específicos para compreender a relação entre o tipo de cobertura do solo e o perfil de temperatura.
- * Realizar perfis de temperatura passando por duas unidades litológicas distintas para verificar as influências no registro obtido.
- * Analisar a influência das sombras das árvores de maior porte no perfil de temperatura do solo.
- * Repetir um mesmo perfil de temperatura em diferentes épocas, pelo menos no período de um ano, para verificar a influência da sazonalidade nos perfis, principalmente antes e depois de períodos chuvosos.
- * Selecionar 30 poços em diversas localidades do semi-árido nordestino, com vazões superiores a $10 \text{ m}^3/\text{h}$ e proceder um estudo detalhado de todas as variáveis possíveis de estarem relacionadas as descargas dos mesmos. Deverá, inclusive, ser prevista a perfuração de vários poços com o único objetivo de pesquisa.
- * Continuar as pesquisas dos perfis de temperatura das aluviões, tendo em vista os primeiros resultados. A possibilidade da utilização desses perfis na caracterização de aluviões será de suma importância, uma vez que para diversas comunidades do semi-árido nordestino as aluviões representam a única fonte de abastecimento d'água.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) BECK, A. E.; GARVEN, G.; STEGENA, L. 1989, *Hydrogeological Regimes and Their Subsurface Thermal Effects*; Geophysical Monograph 47, IUGG volume 2, 129-135
- 2) BYERLY, P. EDWARD, 1965, *Geothermal Surveys in Sedimentary Rocks Near Grants e Laguna New Mexico*; Geophysics, 30, no. 3, 396-402.
- 3) COSTA, T.B. - *Movimento de Águas Subterrânea em Camadas Semipermeáveis*, Anais do 2º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Salvador, 1982.
- 4) CUSTODIO, E. e LLAMAS, M.R. - *Hidrologia Subterrânea*, Vol. I, Capítulo 10.4, Barcelona, 1983.
- 5) del REY, A. C. e HANZA, V.M., 1989, *Terrestrial Heat Flow Variations in the Northeastern Part of the State of São Paulo: A Case for Transport of Geothermal Heat by Interfracture Fluid Flows*, Geophysical Monograph 47, IUGG volume 2, 137-147.
- 6) DEMETRIO, J.G.A.; DOHERTY, F. R; ARÚJO FILHO, P. F. e SCHEFFER, S., 1993, *Qualidade de Água Subterrânea no Nordeste Brasileiro*, 45ª Reunião Anual da SBPC, Vol. 2, Recife.
- 7) FEITOSA, E.C., 1994, *Alagoinha/ PE – Caracterização de Zonas Fendilhadas no Cristalino através do Método Geofísico de Eletroresistividade*, Relatório Técnico Inédito, EMATER/PE-LABHID/UFPE, Recife.
- 8) FERREIRA, J. de A., 1996, *Hidrogeologia e Hidroquímica da Região de Alagoinha-PE – Aplicação de Novos Critérios Técnicos para Locação de Poços no Aquífero Fissural*, Dissertação de Mestrado, UFPE/CT, Recife, 173 p,
- 9) GEERTSMA, J., 1971, *Finite-element Analysis of Shallow Temperature Anomalies*, Geophys. Prosp., 19, nº. 4, 662-681.
- 10) JENSEN, P. K., 1983, *Calculations on the Thermal Conditions Around a Salt Diapir*, Geophys. Prosp., 31, nº. 3, 481-489.
- 11) KHESIN, B. E. e EPPELBAUM, L. V., 1994, *Near-surface Thermal Prospecting: Review of Processing and Interpretation*; Geophysics, 59, nº. 5, 744-752.
- 12) KAPPELMEYER, O., 1957, *The Use of Near-surface Temperature Measurements for Discovering Anomalies due to Causes at Depths*, Geophys. Prosp., 5, nº. 3, 239-258.
- 13) LARSON, T. H., 1988, *Thermal Measurement of Soils Using a Multineedle Probe with a Pulsed-point Source* (short note); Geophysics, 53, nº. 2, 266-270.
- 14) LEE, TIEN-CHANG, 1977, *On Shallow-hole Temperature Measurements - a Test Study in the Salton Sea Geothermal Field*, Geophysics, 42, nº. 3, 572-583.
- 15) MOSCICKI, W. J., 1987, *Temperature Anomalies over Underground Cavities*; Geophys. Prosp., 35, nº. 4, 392-423.

- 16) OELSNER, Chr., 1989, *Prospects and Limitations of Large-Scale Surface Geothermal Measurements*, Tectonophysics, 164, 369-374.
- 17) PARASNIS, D. S., 1971, *Temperature Extrapolation to Infinite Time in Geothermal Measurements*, Geophys. Prosp., 19, n° 4, 612-614.
- 18) POLEY, J. Ph e van STEVENINCK, J., 1970, *Geothermal Prospecting - Delineation of Shallow Salt-domes and Surface Faults by Temperature Measurements at a Depth of Approximately 2 Metres*: Geophys. Prosp., 18, n° 5, 666-700.
- 19) POLEY, J. Ph e van STEVENINCK, J., 1971, *Thermal Near-Surface Expression of Shallow Geological Features*, Geophysical Prospecting, 19, n° 4, 695-697.
- 20) PONZINI, G., CROSTA, G. e GIUDICI, M., 1989, *Identification of Thermal Conductivities by Temperature Gradient Profiles: One-dimensional Steady Flow*: Geophysics, 54, no. 5, 643-653.
- 21) REITER, M., MANSURE, A. E PETERSON, B., 1980, *Precision Continuous Temperature Logging and Comparison with Other Types of Logs*, Geophysics, 45, n° 12, 1857-1868.
- 22) SAMMEL, E. A., 1968, *Convective Flow and its Effect on Temperature Logging in Small-diameter Wells*, Geophysics, 33, n° 6, 1004-1012.
- 23) SELIG, F. e WALLICK, G. C., 1966, *Temperature Distribution in Salt-domes and Surrounding Sediments*, Geophysics, 31, n° 2, 346-361.
- 24) STRANGWAY, D. W. e HOLMER, R. C., 1966, *The Search for Ore Deposits Using Thermal Radiation*: Geophysics, 31, n° 1, 225-242.
- 25) SHUMWAY, G., 1958, *Sound Velocity vs. Temperature in Water-Saturated Sediments*, Geophysics, vol. XXIII, n° 3, 494-505.
- 26) WANG, K., 1992, *Estimation of Ground Surface Temperature from Borehole Temperature Data*, Journal of Geophysics Research, vol. 97, 2095-2106.