

CARACTERIZAÇÃO DE ZONAS FENDILHADAS NO CRISTALINO ATRAVÉS DO MÉTODO GEOFÍSICO DE ELETRORESISTIVIDADE

A experiência Adquirida no Nordeste do Brasil

Edilton Carneiro Feitosa¹

RESUMO

O método de eletroresistividade na locação de poços no cristalino vem sendo utilizado no Nordeste do Brasil desde 1983, embora em caráter muito pontual e imediatista. Um modelo elétrico de zona fendilhada é proposto, a partir do qual são discutidas as possibilidades do método na locação de poços. É recomendada a utilização de perfis laterais através do dispositivo linear simétrico de Schlumberger, com adoção de linhas AB de emissão de corrente iguais a 100 ou 200 metros e linhas MN de recepção variando entre 5 e 20 metros. É discutida a eficácia das linhas MN na detecção de zonas fraturadas muito estreitas. Enfatiza-se a importância da interação fotogeologia/geofísica e procura-se classificar os traços de fratura fotointerpretados e relacioná-los às anomalias elétricas condutivas detectadas nos perfis de resistividade. É chamada a atenção para os bons resultados que vêm sendo obtidos em traços de fratura N-S e em litologias catacladasas. O índice geral de acerto nas locações, em termos da dualidade poço seco/poço produtivo, não tem se revelado superior ao de outras locações mas chama-se a atenção para o que já foi possível aprender e o quanto ainda falta avançar na compreensão da ocorrência e do movimento de água subterrânea no meio fissural.

1. ANTECEDENTES

A experiência adquirida no Nordeste com a utilização do método de eletroresistividade para fins de locação de poços no cristalino, é decorrente da realização dos estudos listados na bibliografia do presente trabalho. Esses estudos são relacionados em ordem cronológica para melhor visualizar a evolução temporal do conhecimento. Outros estudos devem ter sido realizados no período amostrado e que poderiam possivelmente somar conhecimento. Não nos foi possível entretanto buscá-los e consultá-los, pelo que os mesmos deixam de ser relacionados em nossa bibliografia. Além da bibliografia citada, foram de grande valia as discussões em torno do tema, mantidas ao longo dos anos com profissionais que detêm uma apreciável experiência na locação de poços no cristalino. Quero assim registrar nossos agradecimentos aos colegas José Geilson Alves Demétrio e João Manoel Filho, do LABHID/UFPE, Fernando Antonio Carneiro Feitosa, da CPRM, Helena Magalhães Porto Lira, da FUNASA; e Waldir Duarte Costa, da ABC Groundwater.

¹ Hidrogeólogo do LABHID/CTG-UFPE – Depto de Eng de Minas, Campus da UFPE, Recife – Fone (81) 32718239 – CEP 50.740/530 - e-mail: jaga@npd.ufpe.br

Mantendo a tradição de pioneirismo na hidrogeologia do Nordeste, a SUDENE²⁾ comparece com o estudo mais antigo, realizado no Vale do Paraíba, Município de Congo, em 1973. Tratou-se de uma tentativa isolada, no âmbito de um programa de pesquisa do cristalino (Projeto Vale do Paraíba) que, infelizmente, não foi tocado adiante, abatido que foi nos sintomas iniciais da decadência da Instituição. Foi utilizado um dispositivo de Lee adaptado, com dados plotados em “offset” e superposição das medições. Esse dispositivo, chamado pelos franceses de “trainé à répétition” permite separar os efeitos devidos a heterogeneidades superficiais daqueles devidos a heterogeneidades profundas, facilitando assim a análise das medições. Do ponto de vista prático, entretanto, a informação acrescida não compensa as operações de campo mais complexas e mais lentas.

Entre 1973 e 1983 não existem registros de estudos realizados. Na década que vai de 1983 a 1993, entretanto, o NUTEC (Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial), do Governo do Ceará, adota o método de resistividade na pesquisa hidrogeológica e passa a utilizá-lo sistematicamente na locação de poços no cristalino, através da técnica da sondagem elétrica vertical. É do nosso conhecimento a realização de, pelo menos, 150 SEVs com linha AB máxima da ordem de 400 metros em diferentes localidades do semi-árido cearense, para este fim. Entre os trabalhos do NUTEC, chama a atenção o estudo de MARQUES, A.A.F., em torno de 1985, pela preocupação demonstrada na busca de uma sistematização dos conhecimentos da época e pela tentativa de definir critérios de julgamento das SEVs para fins de seleção de sítios favoráveis. O seu “*triângulo anômalo*”, que delimita uma certa região do diagrama bilogarítmico, embora empiricamente conceituado e insuficientemente discutido, deixa entrever o comportamento elétrico do recobrimento colúvio-eluvial, importante guia na detecção elétrica de zonas fendilhadas.

A partir de 1993, o LABHID/UFPE, herdeiro da experiência acumulada pela SUDENE, passa a utilizar a resistividade no cristalino para fins de locação de poços. Foram realizados oito estudos, sempre em caráter eventual. Nesses estudos, foi sempre adotada a técnica do perfil de resistividade com linha AB variando geralmente entre 100 e 200 metros, definida a partir de algumas sondagens elétricas preliminares. Um aspecto da maior relevância nos estudos realizados pelo LABHID, é o apoio sistemático e extensivo da fotogeologia que permite não apenas planejar racionalmente os perfis mas também extrapolar criteriosamente seus resultados. A integração resistividade/fotogeologia, aliás, responde por uma apreciável parcela do que se pôde aprender sobre a locação de poços no cristalino com o método elétrico.

Em 1997, CASTELO BRANCO, R. apresenta à UFPE uma dissertação de Mestrado sobre a aplicabilidade da resistividade na pesquisa de água subterrânea no cristalino. Neste trabalho, além do estudo de uma área no Município de Sobral, Ceará, as 150 SEVs realizadas pelo NUTEC foram analisadas de uma forma integrada, o que permitiu, juntamente com os estudos do LABHID, elaborar uma hipótese de comportamento elétrico de zona fendilhada que será apresentada adiante.

Mais recentemente, no primeiro semestre de 2001, a CPRM realizou uma série de perfis de resistividade desenvolvidos nas direções N-S e E-W, perpendiculares entre si e centrados em poços já existentes e reconhecidamente bons produtores, na região de Irauçuba, norte do

2) A SUDENE passou a utilizar o método de resistividade sistematicamente na pesquisa hidrogeológica de terrenos sedimentares, em 1965.

Ceará. Os resultados obtidos parecem confirmar as passagens eletricamente condutivas, nos perfis, como indicadoras de zonas mais intensamente fraturadas, além de fortalecerem a hipótese segundo a qual fraturamentos norte-sul são muito favoráveis, embora condicionando incipientemente a rede de drenagem.

Apresentamos no presente trabalho uma visão pessoal do problema, buscando sintetizar e disciplinar o conhecimento adquirido até o presente. Dispensaremos tópicos introdutórios sobre a eletroresistividade a bem da objetividade e por acreditar que os leitores interessados no tema estejam familiarizados com este método.

2. MODELO ELÉTRICO DE ZONA FENDILHADA

As sondagens elétricas foram concebidas teoricamente para camadas horizontais e paralelas, sendo portanto indicadas para o estudo de regiões sedimentares. Embora o comportamento estrutural dos terrenos cristalinos, em si, fique muito distante deste modelo teórico, a presença de um manto de alteração extensivo lateralmente e recobrimdo a rocha sã compacta, aproxima razoavelmente o modelo teórico. Considerando que este manto tende a ser mais espesso nas zonas fraturadas, a realização de SEVs poderia teoricamente indicar tais zonas indiretamente, através do mapeamento das variações de espessura deste manto. Este é entretanto o procedimento mais difícil e menos confiável. Como as zonas fraturadas pesquisadas constituem ou são limitadas por descontinuidades verticais ou subverticais, impõe-se naturalmente a adoção de uma técnica que propicie uma varredura lateral, o que permitirá mapear com muito melhor precisão tais estruturas, definindo suas larguras e extensões. Considera-se assim evidente que a pesquisa de água subterrânea no cristalino, por eletroresistividade, deve utilizar perfis laterais. Cabe não obstante às sondagens elétricas um papel importante. Geralmente os estudos devem ser precedidos, com efeito, pela realização de uma ou duas SEVs, de modo a obter informações sobre a seqüência geoelétrica vertical e poder, assim, dimensionar adequadamente o dispositivo que será utilizado na varredura lateral. Ademais, torna-se necessário efetuar às vezes algumas SEVs estrategicamente posicionadas, após a varredura lateral, para esclarecer dúvidas surgidas sobre o significado das resistividades aparentes medidas.

As SEVs no cristalino, embora muito afetadas por heterogeneidades laterais inerentes a essa condição geológica, mostram claramente a existência de dois horizontes elétricos repousando sobre um substrato elétrico resistivo⁽³⁾. O horizonte superficial, resistivo, é condicionado pelo regolito seco, enquanto que o segundo horizonte ou horizonte intermediário, condutivo, inclui esse mesmo regolito úmido ou saturado, além do topo da rocha que geralmente se apresenta alterado. O substrato resistivo deve-se indiscutivelmente à rocha sã, compacta, embora esta possa apresentar fraturas saturadas.

A análise das SEVs obtidas pelo NUTEC no Ceará permitiu estabelecer uma correlação entre a resistência transversal do resistivo superficial e a condutância longitudinal do condutivo intermediário, conforme mostrado na Figura 1 abaixo.

3) Curvas do tipo resistivo-condutivo-resistivo ou tipo H

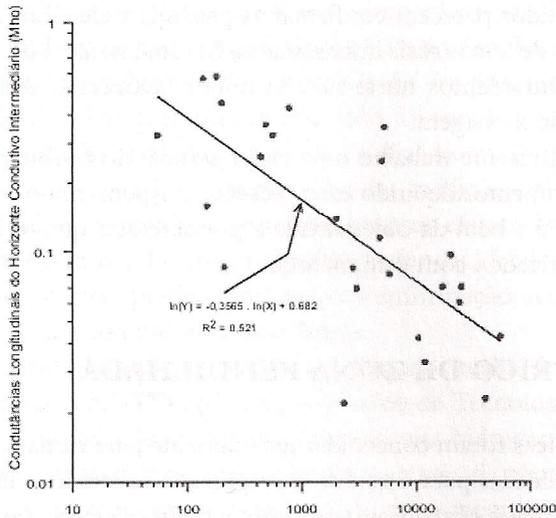


Fig.1 – Correlação Condutância Longitudinal do Horizonte Condutivo x Resistência Transversal do Horizonte Resistivo

O comportamento amostrado na Figura 1 sugere que a distribuição de resistividades numa zona fraturada pode seguir o modelo proposto na Figura 2, onde R1 indica o horizonte resistivo superficial (regolito seco), R2 indica o substrato rochoso compacto e muito resistivo e C indica o horizonte condutivo intermediário (regolito úmido ou saturado e rocha alterada). Os seguintes comentários são pertinentes:

° Fora da zona fraturada, o horizonte resistivo R1 exibe uma maior resistência transversal⁽⁴⁾, em função dos baixos teores de umidade decorrentes da ausência ou menor intensidade de fraturamento da rocha subjacente. No domínio da zona intensamente fraturada, a presença de água propicia uma ascensão capilar mais generosa, fazendo aumentar o teor de umidade do solo, o que resulta em resistividades mais baixas e, portanto, em menores resistências transversais do horizonte R1.

° O horizonte condutivo C, por outro lado, exibe uma pequena condutância longitudinal⁽⁵⁾ fora da zona intensamente fraturada, devido à pequena espessura ou ausência de regolito. O espessamento desse regolito na zona intensamente fraturada, associado à presença de rocha alterada e de maiores volumes de água, são responsáveis pelo significativo aumento da condutância deste horizonte C. Este aumento de condutância deve-se portanto a um aumento de espessura do horizonte, associado a uma diminuição de resistividade, o que se traduz nos perfis por sensíveis quedas da resistividade aparente medida. Note-se que o modelo proposto prevê um aumento de espessura do horizonte C às custas de um aprofundamento da sua base mas também envolvendo um arqueamento do seu topo.

4) Resistência transversal de um horizonte resistivo é definida como o produto da espessura do horizonte pela sua resistividade verdadeira.

5) Condutância longitudinal de um horizonte condutivo é definida como a razão entre espessura do horizonte e sua resistividade verdadeira.

Os limites verticais abruptos mostrados na Figura 2, entre zona pouco ou não fraturada e zona mais fraturada, assim como a ordem de grandeza da largura da zona fraturada, não são sugeridos pela análise das SEVs mas sim, pelos perfis laterais de resistividade, como será mostrado adiante.

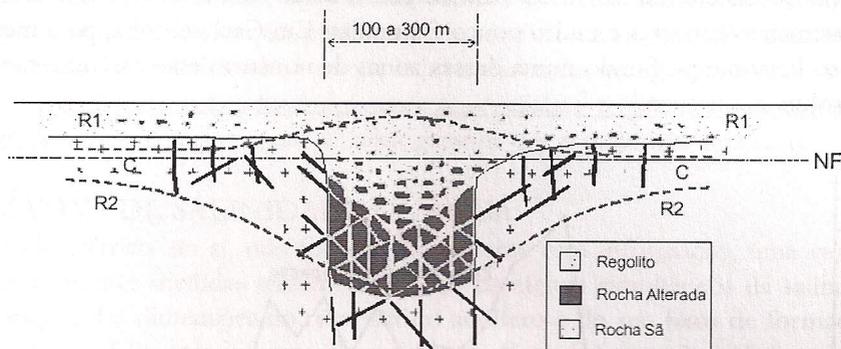


Fig.2 – Modelo Elétrico de Zona Fraturada

3. POSSIBILIDADES DO MÉTODO

Tudo que será dito neste tópico diz respeito à utilização da técnica denominada de *perfil de resistividade* ou *exploração horizontal* ou ainda, como alguns preferem dizer, *caminhamento elétrico*. O modelo de comportamento elétrico de zona fraturada, acima mostrado na Figura 2, deixa prever as seguintes possibilidades do método de resistividade na detecção de fraturamentos no cristalino.

3.1. LOCAÇÃO DE POÇOS

Os perfis de resistividade geralmente não detectam fraturas individuais nem grupos de fraturas na rocha cristalina. Esses perfis detectam, antes, espessamentos localizados do regolito/alteração, associados à ocorrência de zonas fraturadas na rocha sã. Depreende-se daí, portanto, que a resistividade - como a quase totalidade dos métodos geofísicos em qualquer outra situação geológica - pesquisa água subterrânea de uma forma indireta. A resistividade infere a ocorrência de zonas fraturadas ou mais intensamente fraturadas, pela detecção dos seus efeitos na cobertura. As expectativas realísticas são assim, não a detecção de fraturas produtivas mas, antes, um significativo aumento das probabilidades de captá-las. O perfil mostrado na Figura 3 mostra um comportamento que pode ser considerado padrão em rochas ácidas muito competentes, tais como gneisses e migmatitos. Destaca-se nesse comportamento o seguinte:

- ° Contatos abruptos entre zona de rocha compacta e zona de rocha fraturada.
- ° Uma certa uniformidade dos valores de resistividade - que às vezes torna-se muito marcante - nas zonas condutivas. Esse padrão fica compatível com a natureza mais uniforme de um espesso regolito, sendo muito acentuado em presença de água salinizada⁽⁶⁾. Em Cachoeirinha, seis poços perfurados nessas zonas condutivas revela

⁽⁶⁾ Altas salinidades do eletrólito que satura as rochas tendem a tornar eletrolítica toda a condução elétrica, eliminando o efeito elétrico de argilas e outro minerais condutivos eventualmente presentes e homogeneizando assim as resistividades aparentes medidas. Ver Lei de Archie.

ram uma espessura de rochas muito fraturadas e alteradas até cerca de 25 metros de profundidade, inclusive com significativas entradas d'água. Esses poços produziram vazões entre 8,0 e 18,0 m³/h.

° Não subsistem muitas dúvidas em atribuir o bloco resistivo central, na Figura 3, a rochas mais compactas e muito pouco fraturadas. Em Cachoeirinha, pelo menos, um poço locado e perfurado numa dessas zonas demonstrou esse caráter e revelou-se absolutamente seco.

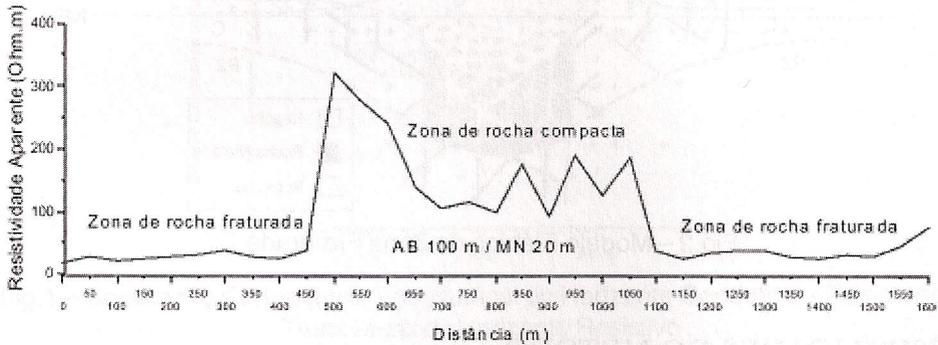


Fig.3 – Exemplo de Perfil Elétrico – Cachoeirinha/PE

A detecção indireta de fraturamentos, como acima discutido, parece ser a regra geral, com base nos trabalhos realizados. O perfil mostrado na Figura 4, realizado pela CPRM no Ceará, parece entretanto oferecer uma bela exceção a essa regra. Na porção central do perfil aparece uma larga faixa condutiva com as características elétricas habituais, onde existe um poço produzindo uma vazão informada de 15 m³/h. Na extremidade direita do perfil individualiza-se um nítido bloco resistivo mas exibindo uma anomalia condutiva quase didática. Observa-se inclusive no perfil a presença conspícua dos chamados *pontos característicos* que assinalam a passagem dos diferentes eletrodos do quadripolo pelas descontinuidades elétricas. Esses pontos característicos nem sempre se manifestam claramente nas anomalias condutivas mais comuns, acima discutidas, devido ao recobrimento generalizado de regolito que os atenua. A anomalia de Carnaubinha, mostrada na Figura 4, sugere que as zonas fraturadas podem ser também detectadas diretamente naquelas situações em que inexistente regolito significativo. A possível ocorrência de zonas fraturadas com tais características, leva a questionar as razões da ausência do regolito e mostra o quanto existe a aprender sobre o problema em foco.

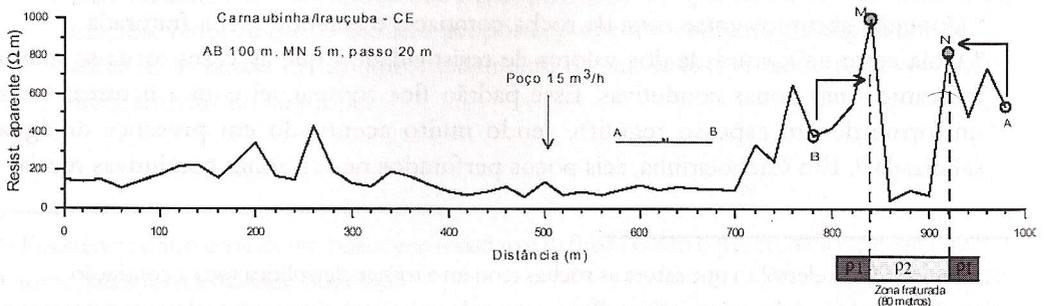


Fig.4 – Provável Detecção Direta de Zona Fraturada (Adaptado de Ribeiro, J., 2001)

3.2. ESTIMATIVA DE VAZÃO DE POÇOS

Como corolário do comportamento geológico/elétrico acima caracterizado, não deve ser esperado que os perfis de resistividade afirmem a presença significativa de água nas zonas fendilhadas. O regolito/alteração, com efeito, sempre contem umidade e é sempre mais condutivo que a rocha sã. Sua simples presença pode condicionar as anomalias condutivas que aparecem nos perfis de resistividade, sem que haja necessariamente água abundante nas fraturas subjacentes. É absolutamente impossível, portanto, fazer quaisquer prognósticos sobre nível estático ou vazão do futuro poço. Não é sequer possível, aliás, garantir que o poço não será seco.

3.3. ESTIMATIVA DE SALINIDADE DA ÁGUA

O método elétrico em si, não fornece diretamente essa informação, uma vez que as resistividades aparentes medidas trazem embutidos os efeitos simultâneos da salinidade da água de saturação, das dimensões do reservatório aquífero e do seu fator de formação, não sendo possível separá-los sem informações adicionais. Essas informações adicionais passariam necessariamente pela determinação da salinidade da água em poços existentes ou outros pontos d'água, captando o aquífero em estudo, o que em si, já forneceria a informação buscada. Entretanto, o comportamento regional das resistividades aparentes parece refletir o efeito da salinidade da água, como sugerido pelos perfis mostrados na Figura 5, em que cabem os seguintes comentários:

° Nos perfis realizados em Passira/PE e Pio IX/PI os blocos de rocha compacta exibem resistividades entre 800 e 1200 ohm.m, enquanto que nos blocos tidos como fraturados a resistividade cai para o patamar de 400 ohm.m. As duas localidades estudadas têm características semelhantes, embora sejam distanciadas de cerca de 700 km. Afloram em ambas, rochas gnaissicas milonitizadas. Em poços já existentes, boas vazões foram observadas em Passira (da ordem de 20 m³/h) e informadas em Pio IX (cerca de 8 a 10 m³/h). Destaca-se em ambos os casos a boa qualidade da água, com resíduos secos entre 100 e 300 mg/l. Admite-se que esta qualidade, inusitada em se tratando de cristalino, esteja associada às proximidades da Serra da Bengala, em Passira, e da Serra das Tabocas, em Pio IX, sendo esta última contrafortes da “cuesta” da Formação Serra Grande.

° No perfil realizado em Cachoeirinha, onde afloram gneisses migmatíticos, as resistividades do bloco resistivo (rocha mais compacta) não chegam a 400 ohm.m enquanto esses valores caem para algo em torno de 20 a 30 ohm.m nos blocos fraturados. A característica distintiva aqui é a alta salinidade da água, com resíduos secos da ordem de 8.000 a 10.000 mg/l, provavelmente responsável pela feição atenuada do perfil. O fato de ter sido utilizado no perfil de Cachoeirinha uma linha AB de 100 metros, metade daquela utilizada em Passira e Pio IX, não explica a grande redução de resistividades. A redução de valores, quando se passa de AB 200 para AB 100 ocorre mas é muito pequena, conforme verificado na prática em perfis realizados em Alagoinha/PE e conforme ensaios teóricos feitos em sondagens elétricas.

A discussão acima nos ensina duas lições. A primeira delas nos parece óbvia e não muito relevante mas a segunda reveste-se de grande importância para os candidatos a usuário do método:

° Numa região onde não se tenha quaisquer informações sobre a qualidade da água em poços, os valores absolutos de resistividade aparente medidos nos perfis parecem informar qualitativamente sobre a salinidade. Essa possibilidade deve ser entretanto encarada com cautela no estágio atual de conhecimentos do problema.

° A lição mais importante é a de que os conceitos de bloco eletricamente resistivo e bloco eletricamente condutivo são conceitos relativos que independem totalmente dos valores absolutos de resistividade. Assim, o que é condutivo em Passira, é resistivo em Cachoeirinha. Fica assim evidente que não se pode trabalhar pontualmente em área muito restrita. Os perfis devem ser corridos ao longo de uma certa distância para que se tenha a chance de ver manifestada essa relatividade de valores. A experiência recomenda uma extensão mínima de 1000 metros para esses perfis.

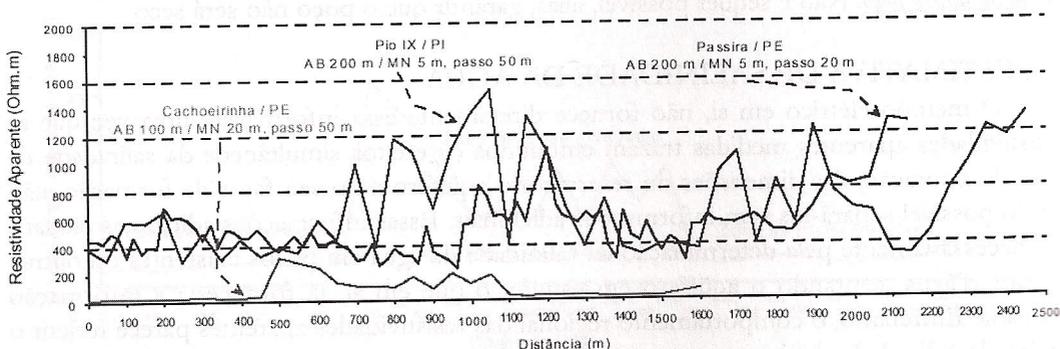


Fig.5 – Perfis em Cachoeirinha/PE, Passira/PE e Pio IX/PI - Provável Efeito da Salinidade da Água

4. VIABILIDADE ECONOMICA DA APLICABILIDADE DO MÉTODO

Definir as dimensões da área alvo das medições elétricas, é algo assim, como apreciar um quadro de pintura artística ou estudar um afloramento. Primeiro, a pessoa se afasta para captar o conjunto e só depois se aproxima para examinar os detalhes, o que, no caso em análise, é perfeitamente justificado pelo caráter relativo dos conceitos de resistivo e condutivo, acima enfatizado. Nesse contexto, a foto-análise prévia é essencial para uma visão panorâmica da área, para visualizar traços de fratura e programar, enfim, os perfis de resistividade.

As chances de detecção de zonas fendilhadas importantes variam, obviamente, na razão direta do número de perfis e seus comprimentos mas, quando se trabalha profissionalmente, a componente comercial do estudo induz a busca de um ponto de equilíbrio entre custo e qualidade / volume das informações, de maneira tal que nenhum dos dois fique comprometido. Este ponto de equilíbrio não tem se revelado comercialmente muito favorável quando se trata da locação de um único poço isolado, mas torna-se factível quando se trata da caracterização mais regional de zonas fendilhadas, para orientar programas de perfurações. Por regional, aqui, deve ser entendido uma área variando entre cerca de 4 km² e cerca de 12 km², onde torna-se possível a locação de, pelo menos, 12 poços em cerca de 7 dias de trabalho de campo, a um custo que pode variar entre U\$ 2.500,00 e U\$ 4.000,00.

5. PROPOSTA DE METODOLOGIA

A experiência adquirida até o momento com a utilização de resistividade no cristallino para fins de locação de poços, leva a propor a seguinte metodologia de trabalho:

5.1.) DIMENSÕES DA ÁREA

A área mínima requerida para que se tenha alguma chance de sucesso é 100 ha ou, em outras palavras, 1,0 km².

5.2.) NATUREZA E VOLUME DOS SERVIÇOS

A fotogeologia é considerada essencial. Ela deve ser praticada antes do trabalho de campo, para visualizar as estruturas existentes e, em particular, os traços de fratura, permitindo assim a programação racional dos perfis de resistividade. Deve ser praticada durante os trabalhos de campo, para controle da geologia e otimização da implantação dos perfis. Deve ser praticada após os trabalhos de campo para refinamento da geologia e, fundamentalmente, para extrapolar os resultados da geofísica e otimizar as locações. A escala de 1/25.000 é desejável.

A técnica a ser aplicada deve ser a do *perfil de resistividade* ou *caminhamento elétrico*, utilizando-se o quadripolo linear simétrico de Schlumberger⁷⁾. Recomenda-se a realização de dois ou mais perfis de 1000 metros de extensão ou mais extensos, se possível. O mínimo requerido é um perfil de 1000 metros. Sabe-se, da experiência adquirida, que linhas AB de 100 ou 200 metros são satisfatórias na grande maioria das situações, no cristalino semi-árido do Nordeste. Esse procedimento não pode entretanto ser extrapolado para regiões cristalinas de clima mais úmido, onde o regolito seja mais espesso e tenha características elétricas diferentes. Assim, se o profissional tiver dúvidas quanto ao comprimento da linha AB a utilizar, recomenda-se realizar uma ou duas sondagens elétricas prévias para dimensionar com segurança esta linha. A linha MN de recepção deve variar entre 20 e 5 metros⁸⁾. Linhas de 5 metros captam diferenças de potencial pequenas mas perfeitamente mensuráveis, com boa precisão, pelos equipamentos disponíveis no mercado nacional. Essas linhas MN pequenas oferecem, ademais, a vantagem de uma boa resolução na detecção das descontinuidade verticais procuradas. A distância entre as estações de medição, o chamado *passo*, deve variar entre 50 metros, nos estudos mais gerais, e 10 ou 20 metros, nos detalhamentos que eventualmente se façam necessários. Fazer pares de medições, em cada estação, é um procedimento salutar pois permite um bom controle da precisão das leituras.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentamos e discutimos neste item alguns resultados já obtidos e considerados relevantes, dedicando uma maior atenção àqueles mais controvertidos.

6.1. LITOLOGIA

As litologia que nós, pessoalmente, tivemos oportunidade de abordar foram granitos e migmatitos, gneisses em geral, gneisses bandeados, gneisses cataclásticos, cataclasitos em geral, e rochas sieníticas. Essas últimas, nas vizinhanças da cidade de Cachoeirinha, PE, foram

7) A proposta de utilizar este quadripolo não afasta a possibilidade de que outros dispositivos se revelem mais adequados.

8) A conhecida condição MN/AB 1/5 destina-se apenas a minimizar, nas SEVs Schlumberger, o efeito das embreagens, permitindo assim corrigi-lo.

as únicas que não manifestaram contrastes elétricos nítidos. Embora essa pequena amostragem seja insuficiente para estabelecer conclusões, a impressão que nos fica – e que não é coisa nova – é que as rochas ácidas são mais suscetíveis de fraturamento enquanto que as rochas mais básicas exibem comportamento mais plástico.

Belas anomalias condutivas em zonas milonitizadas foram obtidas em Pesqueira/PE, Passira/PE e Pio IX/PI, cabendo os seguintes comentários:

° Em Pesqueira as anomalias coincidiram com falhas de cisalhamento NE-SW bem visíveis na aerofoto e situadas entre o Lineamentos de Patos e o Lineamento de Pernambuco. Os poços locados não foram infelizmente perfurados.

° Em Passira dois poços foram perfurados, sendo um seco⁽⁹⁾ e outro bom produtor. Regionalmente, aqui, os poços nos cataclastos são ótimos produtores.

° Em Pio IX anomalias conspícuas foram observadas nos cataclastos da conhecida Falha de Pio IX. Um poço locado e perfurado nessa situação revelou-se razoavelmente bem sucedido, com vazão em torno de 4,0 m³/h no final da perfuração e água de muito boa qualidade. Os dados levantados na região pela COMDEPI/PI indicam uma boa produtividade dos poços perfurados nessa litologia.

No estágio atual de conhecimentos, ainda persistem entretanto duas hipóteses de interpretação dessas anomalias condutivas nos milonitos:

° Rocha extremamente fraturada e saturada até cerca de 20 a 40 metros de profundidade, possibilitando a obtenção de boas vazões. Essa hipótese é encorajada em Pesqueira pela observação em afloramento de milonitos intensa e caoticamente fraturados e desagregados, na zona da anomalia elétrica, e em Pio IX e Passira pelos resultados dos poços locados e perfurados. Em função desses resultados, acreditamos ser esta a hipótese mais provável.

° Milonitos extremamente fraturados em profundidade mas tendo atingido um grau de alteração tal que teria propiciado a geração de muita argila colmatando os espaços vazios. O efeito elétrico seria o mesmo mas com poços secos ou mal produtores. Não se tem ainda comprovação dessa hipótese.

6.2. TRAÇOS DE FRATURA

Quatro direções principais de fraturamento ocorrem no cristalino do Nordeste: NE-SW, NW-SE, E-W e N-S. Enquanto as três primeiras são visualmente mais proeminentes, pelo fato de condicionarem a rede de drenagem, a direção norte – sul é mal perceptível nas aerofotos pois não abriga riachos ou o faz apenas casualmente. Essa direção manifesta-se nas aerofotos por alinhamentos de vegetação arbustiva, eventuais árvores de grande porte e, muitas vezes, por concentrações de manchas escuras que podem ser atribuídas a um maior teor de umidade do solo, decorrente de uma ascensão capilar mais generosa ao longo do regolito que recobre a zona fraturada. As feições lineares daí resultantes são portanto muito

9) Os limites da propriedade impuseram a locação em cota um tanto elevada. Poço perfurado até 50 metros apenas.

sutis, justificando a utilização da expressão *traço de fratura*, onde o termo “*traço*” tem o sentido de “*vestígio*”. A detecção de traços de fratura na aerofoto requer do foto-analista uma boa capacidade de observação, uma boa dose de paciência e, sobretudo, muito bom senso. Este último é de

fundamental importância para não assinalar como traço de fratura elementos lineares de origem antrópica, tais como, vegetação ao longo de antigas cercas, vestígios de picadas, solo arado e similares. Apesar dessa manifestação discreta na morfologia, os perfis de resistividade têm sugerido, em Pernambuco e no Ceará, que essas direções correspondem a eixos eletricamente condutivos, associados muito provavelmente a importantes zonas fraturadas. Essa suposição tem sido confirmada várias vezes por poços perfurados nesse tipo de estrutura, sem falar no famoso poço Salambaia, em Alagoinha/PE, abaixo comentado. Considerando que essa direção norte-sul não abriga geralmente riachos, a tendência hoje é localizar poços na intersecção desses eixos condutivos com riachos-fenda NE-SW e/ou NW-SE e/ou E-W foto-interpretados, de modo a maximizar as possibilidades de recarga. Vê-se por aí que a interação fotogeologia/geofísica revela-se cada vez mais íntima. Convém ressaltar que pesquisas recentes de estruturalistas, como o Professor Emanuel Jardim de Sá da UFRN, vêm apontando a direção norte-sul no Rio Grande do Norte e em Pernambuco, como uma direção preferencial de fraturamentos de distensão. Isso apenas ratifica o reconhecido caráter interdisciplinar do tema, que está a demandar uma maior conjugação de esforços.

Os traços de fratura assinalados em aerofoto, tanto os traços norte-sul como aqueles em outras direções, têm mostrado as seguintes relações com os eixos elétricos condutivos:

° Traços de fratura que ocorrem ao longo dos eixos condutivos e neles contidos. Nesses casos, poços localizados unicamente por foto-geologia teriam a mesma chance de sucesso. O melhor exemplo desta situação é o já citado poço Salambaia⁽¹⁰⁾ em Alagoinha, PE, situado em um discreto traço de fratura N-S, mal perceptível na aerofoto 1/25.000. O perfil elétrico de detalhe mostrado na Figura 6⁽¹¹⁾, flagrou aparentemente a zona fraturada captada pelo poço, graças ao fato de tê-la interceptado muito obliquamente. É provável que sua largura seja da ordem de apenas 5 metros pois a mesma não foi detectada por um perfil semelhante que lhe foi corrido em direção perpendicular. A detecção nítida de zonas fraturadas de tal estreiteza requereria assim linhas MN em torno de dois metros e passos dessa mesma ordem, o que, embora possível, torna-se naturalmente inviável em trabalhos profissionais corriqueiros. Portanto, o melhor critério neste tipo de situação é localizar poços nos traços de fratura contidos no eixo condutivo, procurando sempre posições que ofereçam chances de recarga. Deve ser acrescentado entretanto, no caso Salambaia, que o traço de fratura acima discutido foi apenas percebido nos estudos de detalhe realizados após a perfuração do poço. Sua sutileza na aerofoto é tal que, em estudos corriqueiros para fins de locação, muito dificilmente o mesmo seria percebido. E, mesmo que o fosse, dificilmente seria tido como uma feição significativa. Assim, o hidrogeólogo localizando poços no cristalino deve sempre manter a expectativa do fator sorte.

10) Vazão instantânea de 50,0 m³/h logo após a perfuração. Vazão de exploração em torno de 10,0 m³/h.

11) Pesquisa realizada após a perfuração do poço.

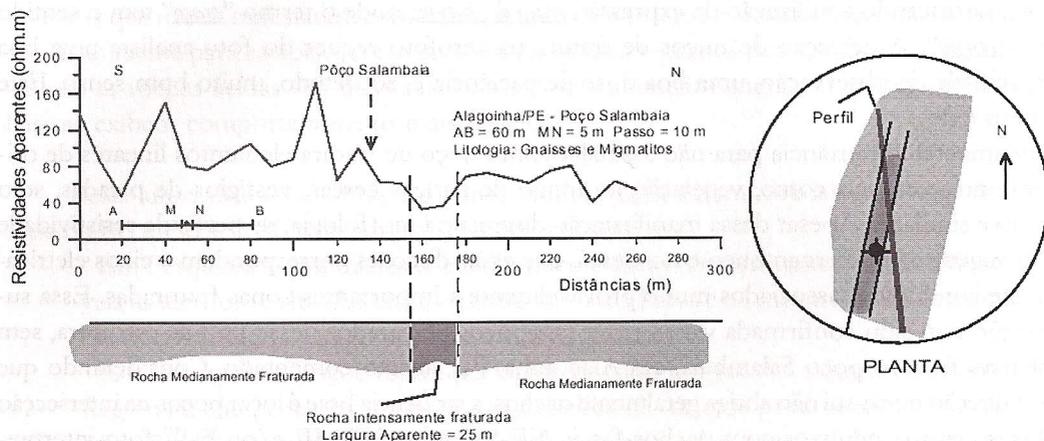


Fig.6 – Perfil de Resistividade no Poço Salambaia em Alagoíinha/PE

° Traços de fratura que marcam limites entre blocos resistivos (rocha compacta) e blocos condutivos (rocha fraturada). Este tipo de situação foi discernido claramente em Cachoeirinha e Passira, não tendo ainda sido testado.

° Traços de fratura que ocorrem no âmbito de eixos resistivos ou, simplesmente, fora de eixos condutivos. São comuns, tendo sido observados em todos os estudos realizados, em todas as direções. Por fidelidade a nossa hipótese de trabalho, esse tipo de situação seria desfavorável ou, quando menos, pouco favorável. O volume de informação disponível é, entretanto, insuficiente para respaldar realisticamente qualquer julgamento.

6.3. GEOLOGIA DE CAMPO

Além das observações clássicas feitas em afloramento, envolvendo litologias, direção, mergulho e abertura de fraturas, chamamos a atenção para a densidade de afloramentos. Os estudos realizados com eletroresistividade têm mostrado, com efeito, que a densidade de afloramentos é grande nos eixos resistivos e muito rarefeita nos eixos condutivos. Isso decorre, naturalmente, da maior espessura do regolito nas faixas condutivas, tidas como mais fraturadas. Acreditamos assim, que feições deste tipo, discerníveis no campo ou em aerofoto, devem ser cotejadas com as demais variáveis na seleção de sítios favoráveis para locação.

6.4. ÍNDICE DE ACERTO

A tabela a seguir mostra o número de poços locados e perfurados em estudos por nós realizados. Considera-se como poço produtivo aquele poço que produziu mais de 1000 l/h no teste realizado logo após a perfuração. Em termos da dualidade seco/produtivo, portanto, temos aí um índice de acerto de 68,75% que não é melhor nem muito pior que os índices médios defendidos por todos os locadores. Comentaremos este índice no tópico seguinte.

Local	Poços Locados e Perfurados		
	Seco	Produtivo	Totais
Arapirina/PE	1	0	1
Alagoíinha/PE	0	2	2
Cachoeirinha/PE	1	6	7
Passira/PE	1	1	2
Pio IX/PI	2	2	4
Totais	5	11	16

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

Embora o índice de acerto acima avaliado não seja certamente animador, não se pode considerá-lo definitivamente desanimador. A forma de avaliá-lo, por sua vez, não nos parece adequada. Melhor seria talvez avaliar as descargas explotáveis tornadas possíveis com a aplicação da geofísica e confrontá-las com essas descargas obtidas sem a geofísica. Não temos no momento dados para isso. Considerando entretanto as descargas aproximadas de exploração obtidas dos poços acima indicados, chega-se a um total de 37,0 m³/h, o que, dividido pelo total de 16 poços perfurados, daria uma descarga média de 2,3 m³/h, o que, se não chega a ser extraordinário, também não configura ainda um mau resultado.

Se nos perguntarem: “porque persistir nos esforços com resistividade no cristalino, se o índice de acerto não melhorou?”, responderíamos o seguinte:

- ° Porque os estudos já realizados aportaram conhecimento, no sentido de prover uma caracterização de zonas fraturadas no âmbito das áreas pesquisadas, abrindo caminho para estudos posteriores.
- ° Porque os estudos já realizados aportaram conhecimento ao problema em si, propondo modelos, levantando hipóteses de trabalho, apontando possíveis caminhos e sugerindo alianças com outras especialidades.
- ° Porque outros métodos mais rápidos e menos onerosos aplicáveis ao problema, como o VLF por exemplo, também não esclarecem satisfatoriamente o comportamento das zonas fraturadas e, quando muito, somam informação à resistividade.
- ° Porque nossa comunidade técnico-científica tem uma palpável experiência na utilização de resistividade e conhece bem suas virtudes e limitações. A abordagem do problema via resistividade pode assim gerar resultados mais confiáveis, repassando-os posteriormente para a aplicação de eventuais outros métodos mais eficazes.
- ° Porque a ocorrência e o movimento de água subterrânea no meio fissural, embora tendo um caráter marcadamente aleatório, pode ter esse caráter, acreditamos, bastante atenuado pela aplicação racional e consciente de uma técnica geofísica adequada.
- ° Porque a cada novo estudo realizado, mesmo em caráter profissional, se aprende algo mais. Acreditamos assim que a utilização sistemática da resistividade, VLF e outros, no âmbito de projetos de pesquisa bem estruturados e que envolvam perfuração e testes de poços de pesquisa, possa contribuir substancialmente ao conhecimento da hidrogeologia dos meios fraturados.

8. BIBLIOGRAFIA

- FEITOSA, E.C. - Congo/PB –. Avaliação das possibilidades de um dispositivo à repetição, na detecção de zonas fendilhadas no cristalino. SUDENE/HG, Recife, jul-agosto/1973. SEVs e perfis laterais de resistividade, sem relatório.
- NUTEC (Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial) / Governo do Ceará: - 150 sondagens elétricas realizadas entre 1983 e 1993 nos municípios de Sobral (16), Alcântaras (5), Meruoca (6), São Gonçalo do Amarante (2), Canindé (5), Maracanaú (13), Quixadá (18), Fortaleza/Maracanaú (8), Maranguape (27), Caucaia (2), Uruoca (2), Massapê (18), Pacatuba (4), Redenção (11), Araçoiaba (1), Itapipoca (5), Parambú (3), Arneiroz (2) e Tauá (2). Relatórios inéditos.

- MARQUES, A.A.F. – Contribuição da Eletroresistividade na Locação de Poços Tubulares no Cristalino. NUTEC, Fortaleza, sem data. Relatório Inédito (em torno de 1985).
- FEITOSA, E.C. - SUPERGESSO/MINERADORA RANCHARIA - Araripina/PE: Pesquisa de Água Subterrânea por Eletroresistividade. Relatório conclusivo, ATEPE/LABHID, Recife, maio/93, relatório inédito.
- FEITOSA, E.C. & FEITOSA F.A.C. - Alagoinha/PE - Caracterização de zonas fendilhadas no cristalino através do método geofísico de eletroresistividade. Relatório conclusivo, ATEPE-LABHID/EMATER-PE, Recife, julho/94, relatório inédito.
- FEITOSA, E.C. - Pesqueira/PE - Caracterização de zonas fendilhadas no cristalino através do método geofísico de eletroresistividade. Relatório conclusivo, ATEPE-LABHID/FNS, Recife, abril/96, relatório inédito.
- FEITOSA, E.C. & DEMETRIO, J.G.A. - Fazenda Nova/PE - Estudo das Fontes e Caracterização de zonas fendilhadas no cristalino. Relatório conclusivo, ATEPE-LABHID/MINERAÇÃO PALESTINA S/A, Recife, maio/96, relatório inédito.
- FEITOSA, E.C. & DEMETRIO, J.G.A.- Cachoeirinha/PE - Caracterização de zonas fendilhadas no cristalino através do método geofísico de eletroresistividade. Relatório conclusivo, ATEPE-LABHID/COMPESA, Recife, julho/96, relatório inédito.
- CASTELO BRANCO, Renê A. - Aplicabilidade do Método Geofísico de Eletroresistividade na Pesquisa de Água Subterrânea em Regiões Cristalinas. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife, 1997.
- FEITOSA, E.C. & DEMETRIO, J.G.A.- Sítio Campo Grande/Venturosa/PE: Caracterização de Zonas Fendilhadas no Cristalino Através dos Métodos Geofísicos de Eletroresistividade e Vlf Para Fins de Locação de Poços. LABHID/CTG/UFPE, Recife, agosto/1999, relatório inédito.
- FEITOSA, E.C. - Fazenda Varamé/Passira/PE: Caracterização de Zonas Fendilhadas no Cristalino Através do Método Geofísico de Eletroresistividade para Fins de Locação de Poços. LABHID/CTG/UFPE, Recife, março/2001, relatório inédito.
- FEITOSA, E.C. – Pio IX / PI: Caracterização de Zonas Fendilhadas no Cristalino Através do Método Geofísico de Eletroresistividade para Fins de Locação de Poços. LABHID/CTG/UFPE, Recife, julho/2001, relatório inédito.
- RIBEIRO, J. et alii – Caracterização do Comportamento Elétrico em Rochas Cristalinas na Região de Irauçuba, Norte do Estado do Ceará, Brasil. In: XII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Recife, outubro/2001 (no prelo).