

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

## A experiência Adquirida no Nordeste do Brasil

*Edilton Carneiro Feitosa<sup>1</sup>*

### 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.

---

<sup>1</sup> 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 SUDENE<sup>2)</sup> 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<sup>(3)</sup>. 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

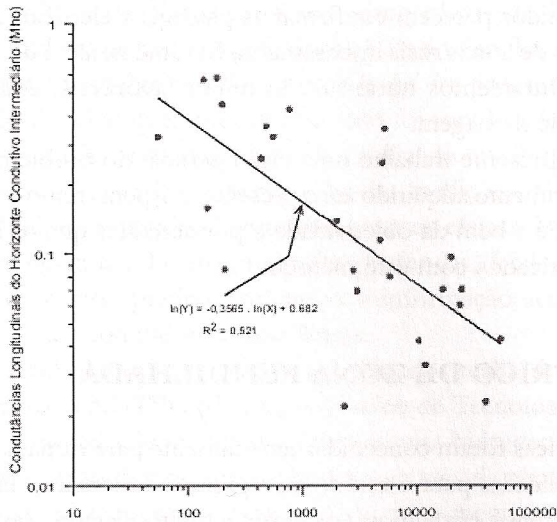


Fig.1 – Correlação Condutância Longitudinal do Horizonte Condutivo x Resistência Transversal do Horizonte Resistivo

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<sup>(4)</sup>, 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<sup>(5)</sup> 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.

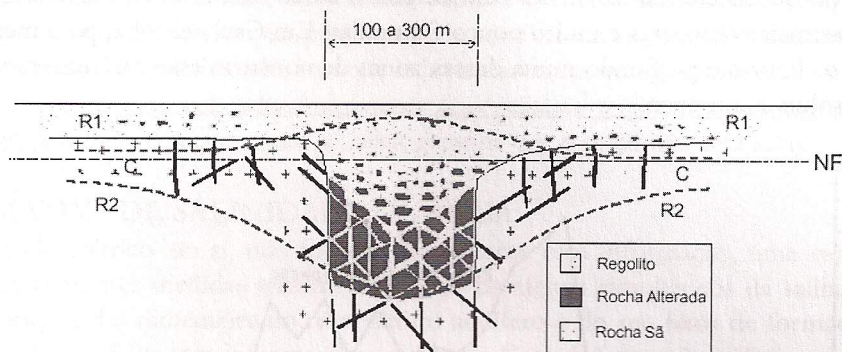


Fig.2 – Modelo Elétrico de Zona Fraturada

### 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<sup>(6)</sup>. Em Cachoeirinha, seis poços perfurados nessas zonas condutivas revela

<sup>(6)</sup> 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 m<sup>3</sup>/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.

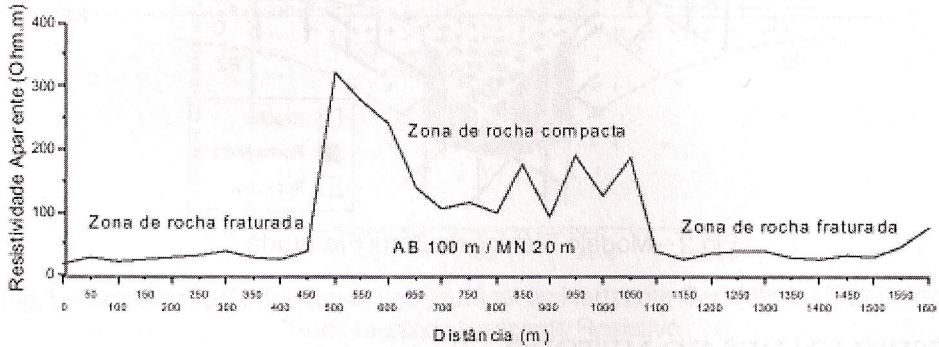


Fig.3 – Exemplo de Perfil Elétrico – Cachoeirinha/PE

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 m<sup>3</sup>/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.

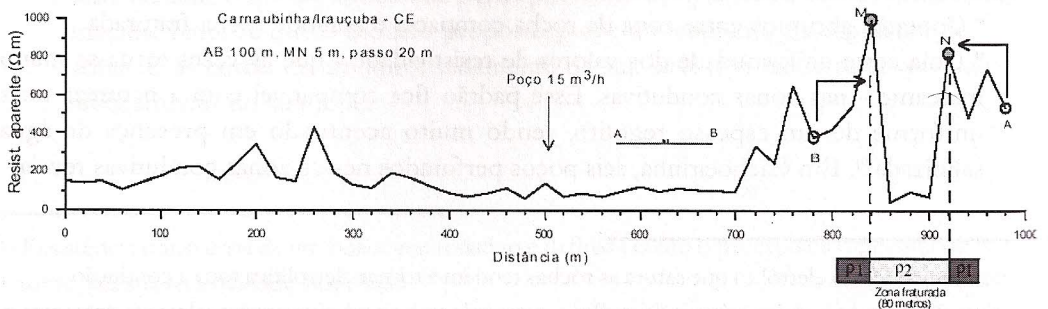


Fig.4 – Provável Detecção Direta de Zona Fraturada (Adaptado de Ribeiro, J., 2001)

