



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE COMPUTADOR EM
LINGUAGEM FORTRAN PARA
CORREÇÕES AMBIENTAIS DE EFEITO
DE POÇO E INVASÃO SOBRE MEDIDAS
DO DUPLO LATEROLOG

AUGUSTO CÉSAR DE OLIVEIRA CÂMARA

SALVADOR – BAHIA
FEVEREIRO – 2014

**Programa de Computador em Linguagem Fortran para Correções Ambientais
do Efeito do Poço e Invasão sobre Medidas do Duplo Laterolog**

por

AUGUSTO CÉSAR DE OLIVEIRA CÂMARA

Orientador: Prof. MsC. Geraldo Girão Nery

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

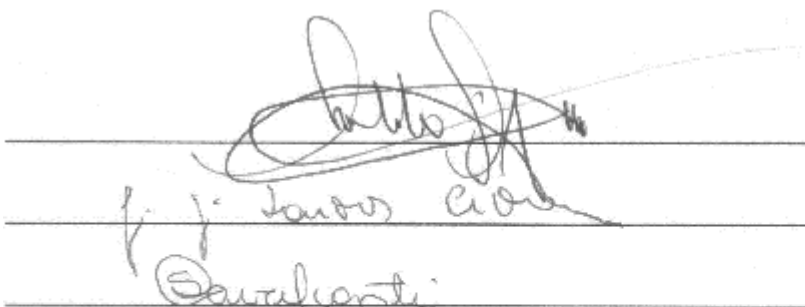
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



MsC. Geraldo Girão Nery

Geol. João José dos Santos Costa

Dra. Susana Silva Cavalcanti

Data da aprovação: 17/02/2014

Dedico este trabalho a toda minha
família e amigos.

RESUMO

Quando utilizamos gráficos para realizar medidas, é comum a propagação de erros sistemáticos e aleatórios. Portanto, uma solução eficaz para esse problema é a automatização dessas medidas através de programas de computador. Neste trabalho, elaboramos um programa em linguagem Fortran, para correções ambientais de efeito de poço e de invasão, de medidas de resistividade obtidas com a ferramenta Duplo Laterolog. Foram utilizados os gráficos Rcor-2b (Borehole Correction), Apêndice A.1, e Rint-9b (Tornado), Apêndice B.1, Log Interpretation Charts Edição 2009 (Schlumberger, 2009). Também foram utilizadas equações descritas por Crain (2001) para o gráfico Tornado.

ABSTRACT

The systematic and random errors can propagate much when we use graphs to observation data. Therefore, an effective alternative is the automation of such measures by computer programs. In this work, we developed a program in Fortran, for borehole and invasion corrections of resistivity measurements obtained with the Dual Laterolog tool. The Rcor-2b graphic (Borehole Correction), Appendix A.1, and Rint-9b (Tornado), Appendix B.1, Log Interpretation Charts Edition 2009 (Schlumberger, 2009) were used. Equations described by Crain (2001) for Tornado chart were also used.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 A Perfilagem Geofísica de Poços	3
1.1 Estudo da Arte	3
1.2 Propriedades Petrofísicas das Rochas	4
1.2.1 Porosidade(ϕ)	5
1.2.2 Permeabilidade (κ)	7
1.2.3 Propriedades Elétricas das Rochas	9
1.2.4 Leis de Archie	10
1.3 A Operação de Perfilagem	12
1.3.1 O Poço	12
1.3.2 O Fluido de Perfuração	14
1.3.3 O Fenômeno da Invasão	14
1.4 Perfis de Resistividade - Eletrodos Galvânicos	15
1.4.1 Sistemas Elétricos Focalizados	16
1.4.2 Duplo Laterolog - DLL	16
1.4.3 Micro Esférica Focalizada - MSFL	17
1.5 Correções Ambientais	18
1.5.1 Efeito de Poço	18
1.5.2 Efeito da Invasão	18
1.5.3 Gráficos	20
CAPÍTULO 2 Sistemática de Trabalho	22
2.1 Ajuste Polinomial da Função Diâmetro de Invasão (D_i)	22
2.2 Ajuste de Curvas para Correção de Efeito de Poço	23
2.3 Equações de Crain para o Gráfico Tornado	24
2.4 Elaboração do Programa de Computador	25
2.4.1 Medidas	26

CAPÍTULO 3	Resultados e Conclusões	29
Agradecimentos	30
APÊNDICE A	Gráficos para Correções de Efeito de Poço	31
APÊNDICE B	Gráfico para Correção de Efeito de Invasão	32
Referências	33
ANEXO I	Programa Correções Ambientais	34
ANEXO II	Fluxograma Correções Ambientais	36
ANEXO III	Perfis	37

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Diferentes porosidades.(a) Porosidade elevada, arenito bem selecionado; (b) Porosidade reduzida, arenito mal selecionado; (c) Porosidade elevada, seixos bem selecionados; (d) Porosidade reduzida devido à cimentação; (e) Porosidade causada por dissolução, carbonatos; (f) Fissuras, rochas cristalinas. Fonte: Adaptado de Meinzer (1923).	6
1.2	Perfis de GR e Resistividades R_{XO} (vermelho), R_{LLS} (amarelo) e R_{LLD} (verde) entre as profundidades de 2975 e 3000 metros. Afastamento variável entre os perfis de resistividade. Fonte: Adaptado das Notas de Aula PET370 (2012).	8
1.3	Esquema ilustrativo mostrando a relação entre porosidade e permeabilidade. A- Baixa porosidade e alta permeabilidade. B- Alta porosidade e alta permeabilidade. C- Baixa porosidade e baixa permeabilidade. D- Alta porosidade e baixa permeabilidade. Fonte: Editora Porto (2012).	9
1.4	Figura ilustrativa - Zonas sob influência do filtrado da lama. Fonte: Editora Porto (2012).	13
1.5	Ilustração da ferramenta Duplo Laterolog. Fonte: Adaptado das Notas de Aula PET370 (2012).	17
1.6	Ilustração da distribuição das linhas de corrente da ferramenta MSFL próximo a parede do poço. Fonte: Adaptado do Manual online de Petrofísica de Crain (2001).	18
1.7	Ilustração do espalhamento focalizado das linhas de corrente e a medida em série de resistividades. Fonte: Adaptado das Notas de Aula PET370 (2012).	19
1.8	Step Profile. Lama condutiva, a resistividade aumenta à medida que D_i aumenta. Fonte: Adaptado das Notas de Aula PET370 (2012).	20
2.1	Coordenadas das amostras no gráfico Tornado.	27
A.1	Gráficos para Correções de Efeito de Poço. Fonte: (Schlumberger, 2009).	31
B.1	Gráfico Tornado. Fonte: (Schlumberger, 2009).	32
II.1	Fluxograma Correções Ambientais.	36
III.1	Perfis de GR e Resistividades R_{XO} , R_{LLS} e R_{LLD} . Fonte: Notas de Aula PET370 (2012).	37

INTRODUÇÃO

A perfilagem geofísica de poços possui grande relevância para a indústria de hidrocarbonetos e de água porque oferece meios para se interpretar zonas da subsuperfície e comprovar seu interesse econômico de maneira rápida e eficaz.

Desde os primórdios da perfilagem, os perfis de resistividade elétrica são estudados e aperfeiçoados assim como suas respectivas ferramentas. Neste trabalho, restringimo-nos ao estudo das correções ambientais de efeito de poço e de invasão de medidas obtidas com a ferramenta Duplo Laterolog e do seus respectivos gráficos (Schlumberger, 2009), visando sua aplicabilidade para treinamento de estudantes, após o conhecimento teórico das influências ambientais sobre as leituras das ferramentas, em geral e em particular as de resistividade profunda.

As medidas de resistividade obtidas na perfilagem geofísica de poços são grandezas aparentes que não correspondem, necessariamente, a propriedade física real das rochas em subsuperfície. Essas medidas estão sujeitas a correções devido a efeitos causados, por exemplo, pela espessura e resistividade das camadas adjacentes àquela medida, influência do filtrado da lama que invade as formações através da parede do poço, variações do diâmetro do poço etc. Geralmente, as empresas de perfilagem possuem gráficos que auxiliam nas correções dessas medidas e/ou programas de computador com essa finalidade.

Em seu handbook online, Crain (2001) apresenta equações para correção de efeito de poço e de invasão da ferramenta Duplo Laterolog. Utilizando essas equações, desenvolvemos um programa de computador em linguagem Fortran capaz de efetuar tais correções de maneira mais ágil e precisa do que se o fizéssemos utilizando gráficos. O Programa pode também ser útil no auxílio acadêmico a alunos da disciplina de Perfilagem Geofísica de Poços no desenvolvimento de exercícios e simulações. Com o Programa é possível simular condições diversas e analisar os resultados de maneira igualmente rápida e precisa. Os dados de entrada do programa são obtidos de perfis de micro resistividade, de perfis de resistividade profunda R_{LLD} e resistividade rasa R_{LLS} da ferramenta Duplo Laterolog e a resistividade da lama R_m . Os dados de saída são o diâmetro de invasão D_i e a resistividade da zona virgem R_t corrigidos.

Foram realizados testes e calculados os desvios relativos entre os resultados obtidos com o programa desenvolvido e aqueles obtidos diretamente dos gráficos.

A metodologia de trabalho adotada foi a seguinte:

1. Utilizando os gráficos que constam no Apêndice A.1, Rcor-2b, Log Interpretation Charts Ed. 2009 (Schlumberger, 2009), foram ajustadas as funções para correções de efeito de um poço das medidas de R_{LLD} e R_{LLS} . Esses ajustes foram realizados com o auxílio do editor de planilhas eletrônicas Microsoft Excel 2010;
2. Com base no artigo de Ribeiro e Carrasquilla (2013), foram calculados os coeficientes do polinômio que ajusta a função diâmetro de invasão Di . Esses coeficientes foram calculados com o auxílio da função pseudo-inversa do MATLAB R2009a;
3. Uma vez que os resultados obtidos no item anterior não foram satisfatórios, utilizamos as equações descritas por Crain (2001) e elaboramos o fluxograma e código em linguagem Fortran que deram origem ao nosso programa de computador;
4. Finalmente, fizemos testes e comparamos resultados.

Este trabalho foi dividido em 3 capítulos. No primeiro capítulo, foram abordados os fundamentos da Perfilagem Geofísica de Poços. No segundo capítulo, descrevemos os procedimentos adotados para a elaboração do programa de computador. No terceiro capítulo, comparamos resultados e fizemos conclusões.

CAPÍTULO 1

A Perfilagem Geofísica de Poços

1.1 Estudo da Arte

O primeiro Perfil Geofísico de natureza elétrica foi realizado na França, em 1927, sob a supervisão dos irmãos Conrad e Marcel Schlumberger. No início, os perfis foram desenvolvidos com os objetivos de diminuir custos exploratórios e melhorar as avaliações para reaproveitamento de poços antigos que ainda fossem capazes de produzir petróleo (Nery, 2013). Desde então, as ferramentas e perfis estão em constante aperfeiçoamento.

A Perfilagem Geofísica de Poços evoluiu buscando diminuir custos e aumentar a eficiência de seus equipamentos. Desta forma, novas ferramentas buscam corrigir falhas ou restrições de suas antecessoras. Atualmente, há uma grande diversidade de ferramentas de resistividade que se distribuem basicamente em dois grandes grupos: Ferramentas de Indução e Ferramentas Galvânicas.

O Lateroperfil Azimutal de Alta Resolução, ferramenta de última geração, é capaz de detectar uma componente azimutal adicional e fazer leituras direcionais das resistividades mais profundas das camadas. Essa ferramenta efetua a maioria das correções ambientais que não constam nas configurações das ferramentas antigas ainda em uso, principalmente nos poços de água subterrânea. É possível ainda sua utilização em poços direcionais, acoplando-se um inclinômetro para a orientação geográfica dos eletrodos da ferramenta.

Neste trabalho, abordaremos a Duplo Laterolog, uma ferramenta galvânica de segunda geração que ainda é utilizada, principalmente naqueles campos marginais, onde o custo operacional deve ser mantido em valores mínimos para empresas de médio ou pequeno porte. Porém, o trabalho aqui proposto pode ser igualmente desenvolvido para outras ferramentas mais atuais desde que feitos os ajustes necessários.

O principal objetivo das ferramentas de resistividade é obter medidas da resistividade verdadeira das formações rochosas em subsuperfície. Porém, devido aos efeitos ambientais, por exemplo, o fenômeno da Invasão, descrito mais adiante, são necessárias correções dessas medidas. A necessidade de conhecer a resistividade verdadeira de uma formação está relacionada aos efeitos causados pelos seus constituintes interporosos nessas medidas. Nesse

sentido, os valores de resistividade verdadeira R_t são aplicados, por exemplo, na equação 1.7 (Archie, 1942), para cálculo de saturação em água S_w . Outra aplicação importante dada na indústria da água é a determinação de Sais Totais Dissolvidos (*STD*), equação 1.9 (Nery, 1996), para determinação da salinidade das águas em subsuperfície.

1.2 Propriedades Petrofísicas das Rochas

Em Perfilagem Geofísica de Poços, as propriedades das rochas são lidas através de sensores que se deslocam no poço e registradas em perfis. Essas medidas não correspondem diretamente a propriedades geofísicas, mas dão suporte para que essas sejam inferidas ou interpretadas. Do ponto de vista da petrofísica, podemos subdividir a estrutura sólida das rochas sedimentares siliciclásticas ou carbonáticas em:

- Arcabouço: É a fração mais grosseira que forma a estrutura ou esqueleto da rocha, dando-lhe sustentação;
- Matriz: É a fração fina dos sedimentos detriticos transportadas por suspensão. É o elemento responsável pela consistência da rocha. Geralmente, a matriz é constituída por um ou mais minerais de argila (Worthington, 2003);
- Cimento: É a fração precipitada, substituída ou transformada quimicamente nos poros das rochas clásticas e é responsável pela rigidez da rocha. Geralmente, o cimento é constituído por sílica, sulfatos de cálcio, carbonato de cálcio e magnésio ou óxidos e hidróxidos de ferro.

No entanto, do ponto de vista da perfilagem, devido as restrições de escala e de natureza de seus equipamentos, essas rochas podem ser divididas apenas em:

- Matriz: Engloba todas as frações sólidas da rocha: arcabouço, matriz e cimento;
- Poros: Porção não sólida preenchida ou não por algum fluido.

Neste trabalho, adotou-se a definição de rocha sedimentar do ponto de vista da perfilagem já que os sensores utilizados nas ferramentas elétricas são incapazes de distinguir um grão de sílica de uma massa de cimento, ou um grão carbonático de um cimento carbonático (Nery, 2013; Rosa, 2004).

As propriedades petrofísicas mais importantes para este trabalho são:

1.2.1 Porosidade(ϕ)

Em perfilagem, a porosidade é obtida principalmente através das técnicas acústicas e/ou radioativas induzidas. Segundo Shön (2004), porosidade é a relação entre o volume de espaços vazios de uma rocha e o volume total da mesma. Ou seja,

$$\phi = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{V_m}{V} \quad (1.1)$$

onde V_m é o volume da matriz, V_p é o volume dos poros e V é o volume total da rocha.

Podemos dizer ainda que porosidade é a fração do volume total não preenchida por constituintes sólidos (Serra, 1984).

De acordo com Schopper (1982), podemos classificá-las como:

- Porosidade Intergranular: espaço poroso entre os grãos, partículas ou fragmentos de materiais clásticos, fracamente compactado tampouco cimentado. Corresponde à porosidade primária;
- Porosidade Intercristalina ou Intergranular: gerada pelo encolhimento ou contração dos grãos;
- Porosidade Fratural: causada principalmente por eventos mecânicos e secundariamente, eventos químicos. Corresponde à porosidade secundária;
- Porosidade Vugular: causada por organismos durante a formação da rocha ou por ação química num estágio posterior. Portanto, seria uma porosidade tanto primária quanto secundária.

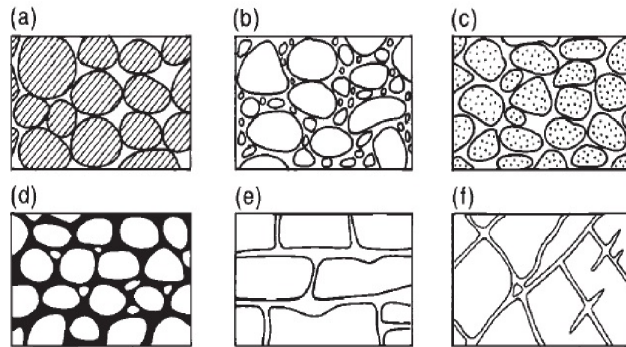


Figura 1.1: Diferentes porosidades. (a) Porosidade elevada, arenito bem selecionado; (b) Porosidade reduzida, arenito mal selecionado; (c) Porosidade elevada, seixos bem selecionados; (d) Porosidade reduzida devido à cimentação; (e) Porosidade causada por dissolução, carbonatos; (f) Fissuras, rochas cristalinas. Fonte: Adaptado de Meinzer (1923).

Outra definição, segundo Serra (1984), baseia-se na conexão entre os poros. Vejamos:

- Porosidade Total: relaciona-se com todos os espaços vazios da rocha (poros, janelas, fissuras) em relação aos componentes sólidos.
- Porosidade Interconectada: relaciona-se apenas aos espaços entre os grãos que estão conectados. Os poros são considerados conectados quando uma corrente elétrica e fluidos podem circular através deles.
- Porosidade Efetiva: é aquela em que os fluidos podem circular livremente. Esse conceito exclui todos os poros não conectados, incluindo os poros ocupados por argilas. A porosidade efetiva é o termo de especial interesse quando se quantifica reservatórios de água subterrânea e hidrocarbonetos, pois irá quantificar o quanto do fluido de interesse será, teoricamente, produzido.

Algumas técnicas de recuperação de poços buscam aumentar a porosidade efetiva causando fraturamentos nas formações rochosas e, conseqüentemente, aumento da porosidade interconectada. A técnica mais comum é a injeção de água sob pressão causando microfissuras no interior das camadas. No entanto, é preciso ter cautela para não prejudicar a

porosidade em vez de melhorá-la. Por exemplo, se não forem considerados possíveis constituintes higroscópicos, a injeção de água poderá obliterar os poros e prejudicar todo o projeto.

Segundo Nery (2013), os principais fatores que afetam a porosidade nos terrígenos são:

- Grau de seleção dos grãos;
- Irregularidade dos grãos;
- Arranjo dos grãos;
- Cimentação;
- Compactação;
- Conteúdo de argila ou argilosidade.

Segundo o mesmo autor, os principais fatores que afetam a porosidade nos carbonatos são:

- Dissolução;
- Cimentação;
- Conteúdo de matriz ou aloquímicos;
- Dolomitização.

1.2.2 Permeabilidade (κ)

A permeabilidade pode ser obtida qualitativamente através de perfis de Potencial Espontâneo, Microperfis ou do perfil do Cáliper. Através do método do SP, é possível verificar a movimentação iônica das formações para o interior do poço ou no sentido contrário, o que evidencia a permeabilidade destas camadas. Os microperfis indicam a existência de permeabilidade através da comprovação da formação de reboco nas formações permoporosas, onde o filtrado da lama invade a camada e deixa na parede do poço sua fração sólida. O cáliper pode dar indícios de permeabilidade através da indicação de descontinuidade do diâmetro do poço porque ocorre estreitamento deste onde há formação de reboco. Outra forma de se investigar a permeabilidade é observando a diferença entre perfis elétricos de diferentes profundidades de investigação. Por exemplo, se forem observados perfis de resistividade da zona lavada R_{XO} , resistividade rasa R_{LLS} e resistividade profunda R_{LLD} próximos uns dos outros, significa que o filtrado da lama penetrou bastante na formação rochosa ou, em vez

disso, que a formação possui pouca ou nenhuma permeabilidade. Enquanto isso, se observarmos diferenças significativas entre os perfis citados, a invasão foi gradual pois os valores das diferentes resistividades são influenciados pelo filtrado da lama, por exemplo, figura 1.2.

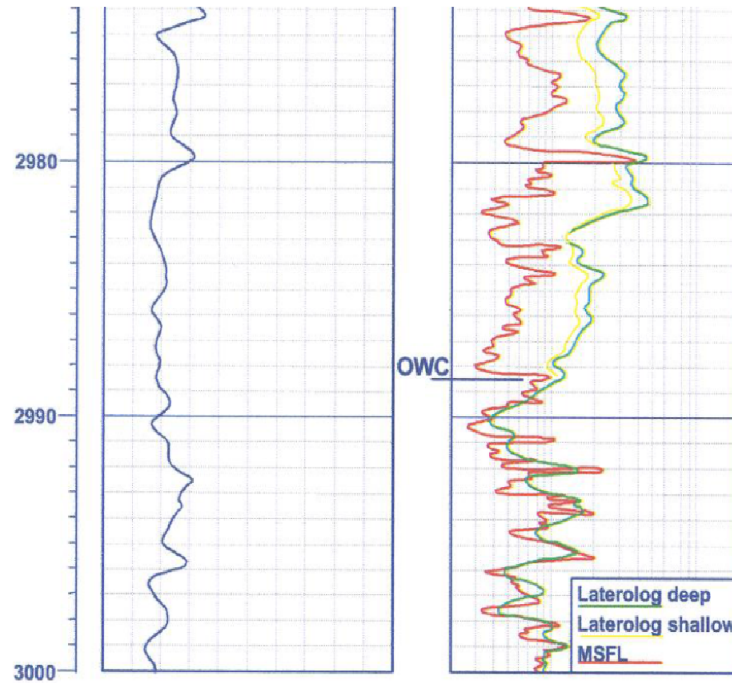


Figura 1.2: Perfis de GR e Resistividades R_{XO} (vermelho), R_{LLS} (amarelo) e R_{LLD} (verde) entre as profundidades de 2975 e 3000 metros. Afastamento variável entre os perfis de resistividade. Fonte: Adaptado das Notas de Aula PET370 (2012).

Segundo Darcy (1856), a permeabilidade é a medida da capacidade de uma rocha permitir a passagem de fluidos por seus poros interconectados e podemos classificá-la em:

- Permeabilidade Absoluta: é uma propriedade intrínseca à rocha. A unidade de permeabilidade é o Darcy. Um Darcy é a permeabilidade de uma rocha que permite o fluxo de 1cm^3 de fluido, com viscosidade de 1cp , através de uma seção transversal de 1cm^2 , submetido a um gradiente de pressão de 1atm ;
- Permeabilidade Efetiva: é a habilidade da rocha em permitir o fluxo de determinado fluido em presença de outro. A permeabilidade efetiva sempre é menor que a absoluta, isto porque o fluido que molha o grão reduz a molhabilidade do outro fluido. Neste caso, mais de um fluido satura o meio poroso;
- Permeabilidade Relativa: a um dado fluido, é a razão entre a permeabilidade efetiva deste fluido e a permeabilidade absoluta da rocha e expressa em decimais ou porcentagem.

A relação entre permeabilidade e porosidade é complexa. Porosidade elevada não implica necessariamente em permeabilidade elevada, por exemplo, figura 1.3-D.

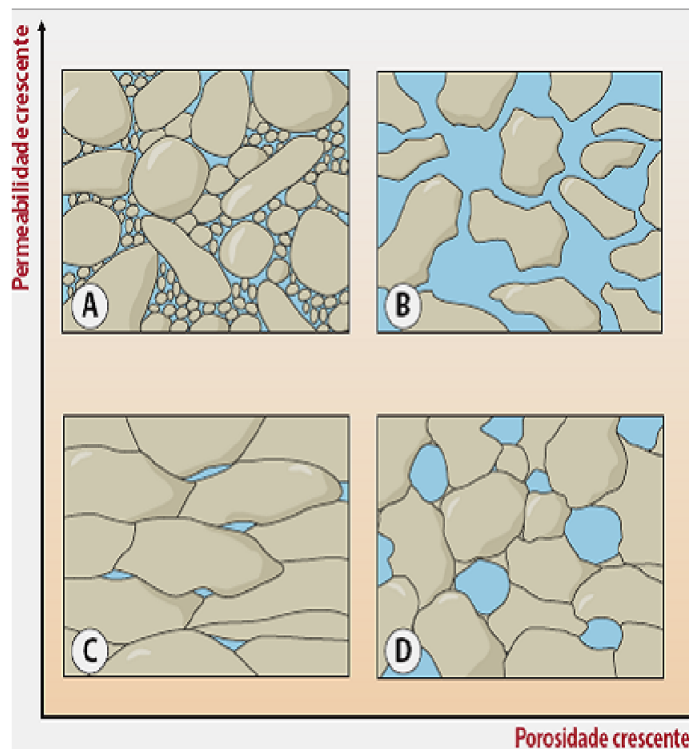


Figura 1.3: Esquema ilustrativo mostrando a relação entre porosidade e permeabilidade. A- Baixa porosidade e alta permeabilidade. B- Alta porosidade e alta permeabilidade. C- Baixa porosidade e baixa permeabilidade. D- Alta porosidade e baixa permeabilidade. Fonte: Editora Porto (2012).

1.2.3 Propriedades Elétricas das Rochas

São três os parâmetros que caracterizam eletricamente as rochas. Permeabilidade magnética μ , permissividade dielétrica ϵ e condutividade elétrica σ . Podemos dizer ainda que para a perfilagem, dos três parâmetros citados, a condutividade elétrica é o mais importante seguida da permissividade dielétrica. Em perfilagem, prefere-se a utilização do inverso da condutividade $\frac{1}{\sigma}$, a resistividade elétrica ρ . Desta forma os perfis são melhor representados e em escala mais adequada. A partir deste ponto, usaremos a letra R para representar a resistividade elétrica do mesmo modo que nos perfis geofísicos desta natureza.

Resistividade Elétrica

Diante da natureza pouco condutiva dos grãos que constituem as rochas sedimentares siliciclásticas e carbonáticas, mais comuns nos estudos de perfilagem em ambientes de petróleo ou

água subterrânea, a condução da corrente elétrica se dá principalmente através de seus fluidos intersticiais. Nesses, ocorre a presença de íons dissolvidos e conseqüentemente, cargas livres capazes de conduzir corrente elétrica. No entanto, ainda que indesejada, principalmente em reservatórios, a presença de argilo-minerais ricos em alumínio, pode causar falsas interpretações e devem ser alvo de análise cuidadosa.

Os fatores que podem contribuir para a condução da corrente elétrica em rochas sedimentares são:

- Temperatura da formação;
- Salinidade;
- Fator de Formação;
- Anisotropia;
- Minerais condutores fazendo parte da matriz;
- Outros.

1.2.4 Leis de Archie

Fator de Formação

Segundo Archie (1942), o Fator de Formação é a relação entre a resistividade da rocha e a resistividade de sua água de formação, expresso pela seguinte equação:

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (1.2)$$

onde: F é o fator de formação, R_o é a resistividade da rocha e R_w é a resistividade da água de formação.

Archie queria com isso individualizar o efeito da condutividade da água e o efeito da resistividade do mineral da formação. Então ele notou que para haver uma relação não apenas de proporcionalidade, mas sim de igualdade, deveria introduzir duas constantes empíricas: o coeficiente litológico a , que avalia as diferenças litológicas entre as rochas reservatórios e o coeficiente de cimentação m , que leva em conta a tortuosidade ou a complexidade da rede formada pelos poros interconectados. Winsauer et al. (1952) acrescentaram o índice a , através de uma aproximação linear em escala logarítmica entre F e ϕ , temos:

$$\log F = \log a - m \log \phi \quad (1.3)$$

Combinando as equações 1.2 e 1.3 temos a Primeira Lei de Archie, equação 1.4.

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (1.4)$$

Segundo Shön (2004), o coeficiente de cimentação varia de 1,3 para areias inconsolidadas a 2,2 para arenitos bastante cimentados. Já para carbonatos com porosidade vugular, esse valor poderia chegar a 2,6. É perceptível que valores de m próximos a 1,3 são indicativos de rochas pouco cimentadas e, além disso, fraturadas.

Índice de Resistividade

Archie propôs um outro fator além do fator de formação F , do coeficiente litológico a e do coeficiente de cimentação m , denominado índice de resistividade I , definido como a razão entre a resistividade da rocha parcialmente saturada R_t , e a resistividade da mesma amostra 100% saturada em água R_o . Então, se tivermos o mesmo fluido preenchendo os poros da rocha, ela terá a resistividade R_t diretamente proporcional ao índice de saturação e inversamente proporcional a S_w . Os resultados experimentais mostram que:

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{1}{S_w^n} \quad (1.5)$$

Resolvendo a equação 1.4 para R_o temos:

$$R_o = aR_w\phi^{-m} \quad (1.6)$$

Combinando 1.5 e 1.6 e resolvendo para S_w^n obtemos a segunda lei de Archie:

$$S_w^n = \frac{aR_w}{\phi^m R_t} \quad (1.7)$$

em que, segundo Shön (2004):

- m : expoente de cimentação, adimensional;
- ϕ : porosidade efetiva da rocha, adimensional;
- a : coeficiente litológico, adimensional;
- S_w : saturação em água, adimensional;
- n : expoente de saturação, adimensional. Varia de 1,42 a 2,55 nos arenitos;

- R_w : resistividade da água da formação, em $\Omega.m$ @ temperatura da formação na profundidade lida;
- R_t : resistividade da rocha, em $\Omega.m$ na profundidade lida.

Fazendo $S_w = 1$, a segunda Lei de Archie fica:

$$R_w = \frac{\phi^m R_o}{a} \quad (1.8)$$

A partir dessa consideração, Nery (1996) utilizou uma equação hiperbólica para quantificar os Sais Totais Dissolvidos (STD), expressa por:

$$STD = \frac{a}{R_w^b} \quad (1.9)$$

onde a e b são obtidos pelo relacionamento dos valores de STD provenientes de análises químicas de poços com a suas respectivas resistividades médias, calculadas por perfis geofísicos.

Portanto, o objetivo dos perfis de resistividade é fornecer dados para aplicação em equações como as descritas acima. Entretanto, para que haja realidade nos resultados, a técnica exige que correções sejam feitas por gráficos ou algoritmos, levando em consideração os efeitos ambientais sobre as medidas de resistividade como por exemplo, espessuras das camadas, pois as ferramentas de resistividade devem ser capazes de ultrapassar meios condutivos em sua trajetória radial tais como o reboco e a zona lavada, até atingirem a zona virgem R_t .

1.3 A Operação de Perfilagem

A Perfilagem Geofísica de Poços é uma das etapas fundamentais na prospecção de água ou hidrocarbonetos. Seu objetivo é avaliar formações através dos perfis geofísicos, registros de medidas de propriedades físicas das rochas no interior do poço que dão suporte a medidas diretas ou inferidas de propriedades petrofísicas das mesmas.

1.3.1 O Poço

Podemos dizer que o poço é o meio através do qual torna-se possível realizar medidas diretas das camadas em subsuperfície. Para este trabalho, é importante conhecermos as zonas do poço influenciadas pelo fenômeno da invasão. Portanto, se considerarmos uma formação permoporosa, teremos as seguintes regiões:

- Zona lavada: É a zona da qual o fluido interporoso original foi deslocado devido a invasão do filtrado da lama. Podem existir resquícios de fluido original devido a fatores como: pressão capilar, tensões superficiais etc;
- Zona transicional ou temporária: É a zona na qual o filtrado da lama e os fluidos originais da formação coexistem, porém, seu caráter é transicional em relação a zona lavada onde predomina o filtrado da lama;
- Zona verdadeira ou virgem: É a zona não contaminada pelo filtrado da lama. Os fluidos ali presentes são todos originais da rocha, ou seja, o objetivo da prospecção.

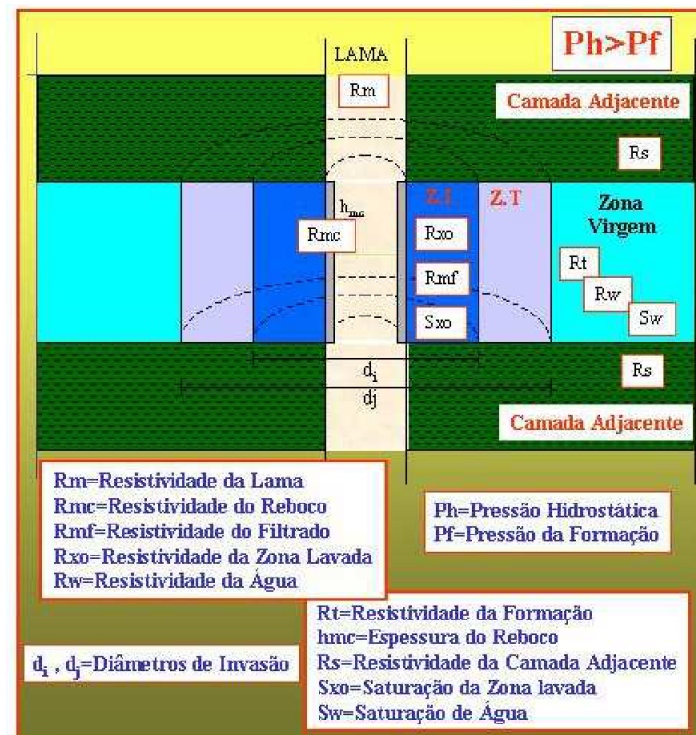


Figura 1.4: Figura ilustrativa - Zonas sob influência do filtrado da lama. Fonte: Editora Porto (2012).

Essas zonas não possuem limites bem definidos e dependem de diversos fatores, por exemplo: pressão hidrostática da lama se opondo a pressão estática da formação, permeabilidade da formação etc.

1.3.2 O Fluido de Perfuração

Ou lama, como é comumente chamada, deve possuir características e propriedades bem definidas e adequadas ao projeto do poço. Esses parâmetros (resistividade, salinidade, pressão hidrostática etc) visam o cumprimento das funções operacionais e de segurança do fluido de perfuração. Podemos citar:

- Sustentar as paredes do poço;
- Manter sólidos em suspensão;
- Inibir a reatividade de formações argilosas;
- Carrear até a superfície os cascalhos perfurados pela broca;
- Minimizar problemas de torque e arraste da coluna de perfuração;
- Resfriar a broca;
- Evitar danos à formação produtora;
- Prevenir a corrosão da coluna de perfuração e de equipamentos da superfície;
- Segurança operacional;
- Proteção ao meio ambiente.

A pressão hidrostática exercida pelo fluido de perfuração nas formações, essencial para a segurança operacional, é a responsável pelo surgimento do fenômeno de invasão.

1.3.3 O Fenômeno da Invasão

Este trabalho trata de correções de medidas de resistividade necessárias devido ao efeito do fenômeno da invasão, ou seja, esse fenômeno, apesar de inevitável, é indesejado. Principalmente por questões de segurança operacional, os fluidos de perfuração são adequados de modo que exerçam maior pressão nas formações que os seus fluidos intersticiais evitando assim kicks e/ou blowouts. Em decorrência dessa diferença de pressão, ocorre a invasão do filtrado da lama através da porosidade interconectada das formações, enquanto que ocorre a deposição das partículas sólidas da mesma na parede do poço formando o reboco.

Portanto, o diâmetro de invasão é a extensão da invasão do filtrado da lama e sua variação é controlada por:

- Fatores relativos ao poço/lama: tempo gasto na perfuração do poço, permeabilidade do reboco, viscosidade do filtrado e perda de água da lama;
- Fatores relativos às camadas perfuradas: diferença de pressão entre a lama e a camada, permeabilidade e viscosidade dos fluidos presentes.

Portanto, devido a esse fenômeno, as leituras das ferramentas de resistividade não correspondem as propriedades originais da rocha. É necessário fazer correções usando gráficos específicos para cada ferramenta. Esses gráficos são chamados de Tornados e veremos como são utilizados mais adiante.

1.4 Perfis de Resistividade - Eletrodos Galvânicos

Tratando-se de rochas sedimentares, principalmente as siliciclásticas e carbonáticas, a condução da corrente elétrica se dá principalmente através dos seus fluidos intersticiais.

Segundo a Lei experimental de Ohm, o vetor densidade da corrente \vec{J} em um determinado ponto do condutor, e o vetor campo elétrico \vec{E} , naquele mesmo ponto, são colineares. A constante de proporcionalidade é denominada de condutividade elétrica σ .

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.10)$$

A resistência elétrica r de um material é a constante de proporcionalidade na relação entre fluxo de corrente elétrica i e a diferença de potencial V , ou seja,

$$r = \frac{V}{i} = R \frac{L}{S} \quad (1.11)$$

Portanto, podemos dizer que:

$$R = \frac{VS}{iL} \quad (1.12)$$

onde: L é o comprimento e S é a área transversal do material.

Os perfis com eletrodos galvânicos medem a resistência à passagem da corrente elétrica através das camadas localizadas entre um eletrodo que se desloca no poço e outro estacionário na superfície ou numa distância considerada infinita dentro dele. A corrente elétrica enviada ao eletrodo emissor é mantida constante e registra-se nos perfis o potencial, estando o eletrodo de retorno no infinito, ou a diferença de potencial, estando o eletrodo de retorno dentro do

poço ou próximo ao emissor. Posteriormente, esses valores são convertidos em valores de resistividade elétrica usando-se a equação 1.12.

1.4.1 Sistemas Elétricos Focalizados

Diferente dos meios homogêneos, onde ocorre o espalhamento radial e perpendicular das linhas de corrente elétrica, no poço, considerando uma lama condutiva, há uma tendência das linhas de correntes permanecerem na lama. Portanto, foram desenvolvidas ferramentas que focalizam a passagem da corrente elétrica através das formações diminuindo esse efeito e possibilitando melhores medidas de resistividade das formações.

O primeiro perfil de resistividade com um sistema de focalização foi o Lateroperfil-3. Tal sistema consistia em um eletrodo cilíndrico central de corrente A_0 , com potencial fixo, posicionado entre dois outros A_1 e A'_1 , monitorados e mantidos com o mesmo potencial de A_0 . Tal configuração promove um bloqueio elétrico, onde as linhas de correntes saídas de A_0 não ultrapassam no sentido acima ou abaixo das posições de A_1 e A'_1 sendo, portanto, forçadas para dentro das camadas. Este sistema proporciona maior profundidade de investigação (Schlumberger, 2009).

Posteriormente foi desenvolvida a ferramenta $LL-7$, com sete eletrodos cilíndricos bem mais curtos. Dois dos eletrodos monitoram a corrente acima M_2 e M_1 e abaixo M'_2 e M'_1 do emissor A_0 . Dois outros A_1 e A'_1 , fazem um bloqueio, porque têm suas correntes ajustadas de tal modo que o potencial entre os monitores de cada par seja zerado, criando uma superfície equipotencial bastante próxima daquela do eletrodo central (Schlumberger, 2009).

1.4.2 Duplo Laterolog - DLL

A Duplo Laterolog é uma ferramenta formada por dois sistemas $LL-7$ usando distintas frequências de trabalho, 35 Hz e 280 Hz, denominados respectivamente, de LLD (Deep) e LLS (Shallow). A medição das resistividades é feita por um sistema denominado de potência constante, no qual, tanto a corrente de medição como a voltagem variam, permanecendo constante o produto entre elas (Nery, 2013).

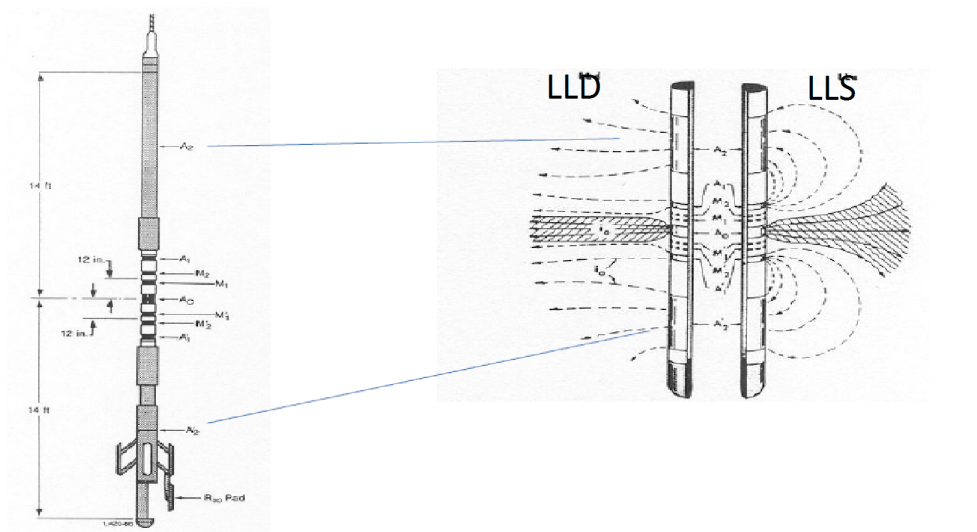


Figura 1.5: Ilustração da ferramenta Duplo Laterolog. Fonte: Adaptado das Notas de Aula PET370 (2012).

A equação base da investigação dos Lateroperfis é:

$$R = K \frac{V_0}{i_0} \quad (1.13)$$

onde, R é a resistividade da formação, K é a constante ferramental, i_0 e V_0 são a corrente elétrica e a diferença de potencial respectivamente.

Essa ferramenta mede resistividades em série. Como o erro de leitura é muito baixo, elas são recomendadas para altas resistividades e lamas condutivas. Perfis de R_{XO} são também utilizados para efetuar correções ambientais nas leituras de resistividade rasa e profunda e obter o valor da resistividade verdadeira da formação R_t .

1.4.3 Micro Esférica Focalizada - MSFL

Os perfis de micro resistividade são obtidos diminuindo-se radialmente a investigação das ferramentas. Desta forma, investiga-se apenas as zonas próximas às paredes do poço, resistividade do reboco R_{mc} e da zona lavada R_{XO} . É possível fazer analogia entre os princípios físicos, configurações e medições das macro e micro ferramentas.

A ferramenta Microesférica Focalizada (MSFL) foi idealizada no sentido de promover uma configuração esférica na distribuição da corrente enviada ao poço. A corrente de localização ou de bloqueio passa de A_0 para A_1 , preferentemente por dentro do reboco, tomando uma forma aproximada de uma esfera. Com esse sistema, o efeito do reboco é minimizado

e a ferramenta ainda permanece com uma investigação bastante rasa, sendo entre as ferramentas de microresistividades a que mais se aproxima de R_{XO} , a não ser quando o diâmetro de invasão for muito pequeno (Nery, 2013).

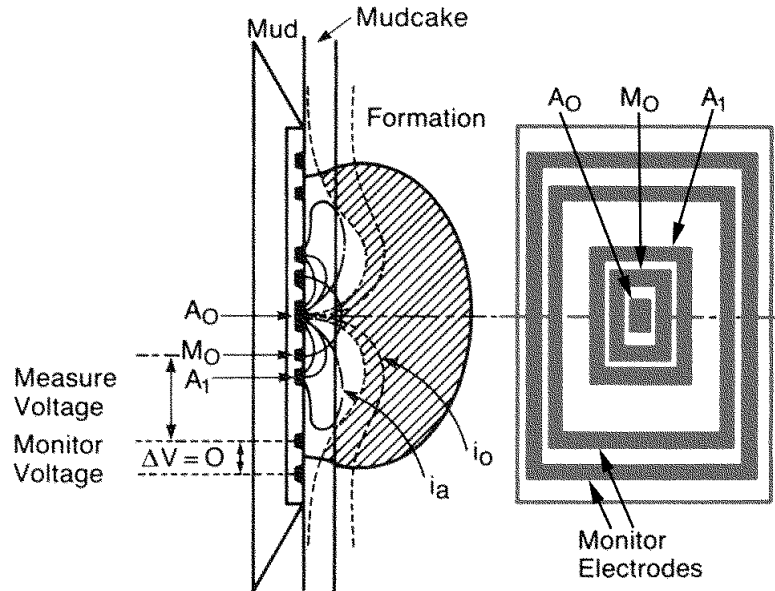


Figura 1.6: Ilustração da distribuição das linhas de corrente da ferramenta MSFL próximo a parede do poço. Fonte: Adaptado do Manual online de Petrofísica de Crain (2001).

1.5 Correções Ambientais

1.5.1 Efeito de Poço

A contribuição da porção de lama entre a ferramenta e a parede do poço, quantidade que varia sobretudo em função do diâmetro do poço, na medida de resistividade de uma formação, chama-se efeito de poço. Portanto, esse fenômeno sujeita as medidas de resistividade a correções. Uma maneira de fazê-las é utilizando os gráficos do Apêndice A.1, (Schlumberger, 2009). Neste trabalho, ajustamos funções baseadas nesses gráficos para automatizar essas correções.

1.5.2 Efeito da Invasão

As ferramentas de resistividade buscam respostas das diferentes zonas de uma formação rochosa de acordo com seu raio de investigação. No entanto, cada medida é influenciada pelas resistividades das demais zonas por se tratar de uma medida de resistividade em série. Portanto, o fator pseudo geométrico é função da ferramenta e do diâmetro de invasão que

pondera a contribuição de cada zona sob influência do filtrado da lama nessas medidas, de maneira que $\sum_{i=1}^n J_{(ferr,D_i)} = 1$. Além disso, quando se tem valores precisos de R_{XO} , o que é possível utilizando a ferramenta *MSFL*, podemos encontrar R_t . Vejamos:

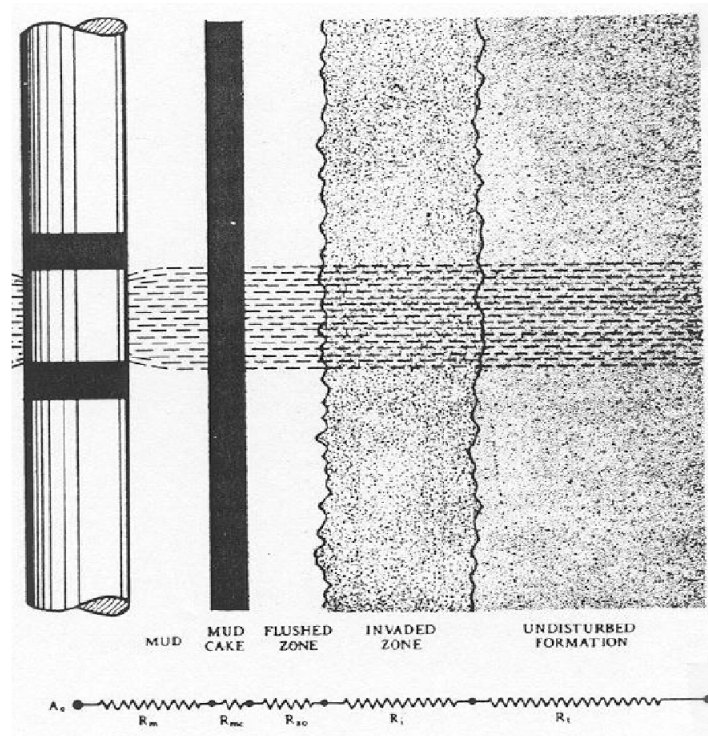


Figura 1.7: Ilustração do espalhamento focalizado das linhas de corrente e a medida em série de resistividades. Fonte: Adaptado das Notas de Aula PET370 (2012).

$$R_a = \sum_{i=1}^n J_i R_i \quad (1.14)$$

onde R_a é a resistividade aparente e R_i é a resistividade da i -ésima zona.

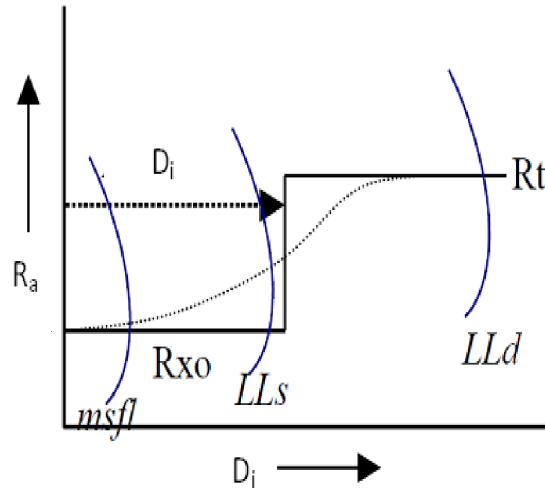


Figura 1.8: Step Profile. Lama condutiva, a resistividade aumenta à medida que D_i aumenta. Fonte: Adaptado das Notas de Aula PET370 (2012).

Com base na leitura dos três perfis em questão, pode-se criar o sistema de equações 1.15 com três equações e três incógnitas, D_i , R_{XO} e R_t . Essa é a solução analítica com base nas profundidades de investigação, figura 1.8:

$$\begin{aligned}
 (R_a)_{(LLD)} &= J_{XO(D_i)} R_{XO} + (1 - J_{XO(D_i)}) R_t \\
 (R'_a)_{(LLS)} &= J'_{XO(D_i)} R_{XO} + (1 - J'_{XO(D_i)}) R_t \\
 (R''_a)_{(XO)} &= J''_{XO(D_i)} R_{XO} + (1 - J''_{XO(D_i)}) R_t
 \end{aligned} \tag{1.15}$$

Outra solução para efetuar as correções, mais prática que a forma analítica, é utilizando o gráfico Tornado, Apêndice B.1. A partir das medidas de R_{MSFL} , R_{LLD} e R_{LLS} é possível encontrar valores corrigidos para o efeito de invasão de R_{XO} e R_t , além do diâmetro de invasão D_i .

1.5.3 Gráficos

Gráficos para correções de efeito de Poço - Borehole Correction

O Gráfico para correção de efeito de poço de medidas de resistividade profunda possui, no eixo das abscissas, a razão $\frac{R_{LLD}}{R_m}$ e, no eixo das ordenadas, a razão $\frac{R_{LLDcor}}{R_{LLD}}$. Para medidas de resistividade rasa a configuração é a mesma, porém, deve-se utilizar o seu respectivo gráfico. É importante que as formações tenham espessuras suficientemente grandes, maiores que a distância entre os eletrodos do sistema utilizado, para possibilitar essas correções.

Gráfico para correção de efeito de Invasão - Tornado

O gráfico Tornado, assim chamado devido sua aparência, é um conjunto de curvas plotadas numa escala log-log. Nas abscissas temos a razão $\frac{R_{LLD}}{R_{LLS}}$ e nas ordenadas $\frac{R_{LLD}}{R_{XO}}$. As curvas são distintas quanto a finalidade apesar de terem os mesmos pares ordenados como entrada. As linhas tracejadas na cor azul representam D_i . As linhas contínuas na cor azul representam a razão $\frac{R_t}{R_{XO}}$. As linhas contínuas na cor vermelha representam a razão $\frac{R_t}{R_{LLD}}$. Com essas funções encontramos os valores corrigidos para efeito de invasão das medidas de resistividade da zona virgem R_t , resistividade da zona lavada R_{XO} e o diâmetro de invasão D_i .

Restrições

A utilização do gráfico Tornado requer algumas condições. São elas:

- As medidas devem ser referentes a camadas espessas;
- O diâmetro do poço deve ser de no mínimo $8in.$;
- As medidas não devem ter sido realizadas em zonas que apresentam efeito Anullus;
- As medidas não devem ser referentes a zonas de transição entre água e outras fases, por exemplo, óleo ou gás;
- A razão $\frac{R_{XO}}{R_m}$ deve ser no máximo igual 50;
- Os dados devem ser previamente corrigidos para efeito de poço.

Nosso trabalho foi desenvolvido especificamente para os gráficos Rcor-2b (Correções de Efeito de Poço) e Rint-9b (Tornado) da ferramenta Duplo Laterolog, Log Interpretation Charts Edição 2009 (Schlumberger, 2009), Apêndices A.1 e B.1.

CAPÍTULO 2

Sistemática de Trabalho

Tendo em vista futuras aplicações deste programa na disciplina de Perfilagem Geofísica de Poços e em outros cursos, preferimos utilizar a linguagem Fortran no desenvolvimento do seu código. Neste trabalho, utilizamos o fluxograma do Anexo II.1 como base para o algoritmo. O código final do programa, adaptado para os testes realizados neste trabalho, estão no Anexo I.

2.1 Ajuste Polinomial da Função Diâmetro de Invasão (D_i)

Inicialmente, durante a pesquisa bibliográfica, buscavamos encontrar as equações que descrevessem o gráfico Tornado. Dentre outros artigos, verificamos que Ribeiro e Carrasquilla (2013) demonstram que, desenvolvendo a equação 2.1 na forma de uma função polinomial bicúbica, obtemos a equação 2.2. Vejamos:

$$\frac{R_t}{R_{LLD}} = f(\log[\frac{R_{LLD}}{R_{LLS}}, \frac{R_{LLD}}{R_{XO}}]) \quad (2.1)$$

onde: R_t é a resistividade da formação corrigida para o efeito de invasão, R_{LLD} é a medida de resistividade profunda, R_{LLS} é a medida de resistividade rasa e R_{XO} é a medida de resistividade da zona lavada.

$$\frac{R_t}{R_{LLD}} = 1 + D_i \quad (2.2)$$

onde:

$$D_i(x, y) = a_1x + a_2x^2 + a_3xy + a_4x^2y + a_5xy^2 + a_6x^2y^2 \quad (2.3)$$

e $x = \frac{R_{LLD}}{R_{LLS}}$, $y = \frac{R_{LLD}}{R_{XO}}$ e $a_1, a_2, a_3, \dots, a_6$ são os coeficientes deste polinômio.

Na forma matricial temos:

$$[S] = [A][P] \quad (2.4)$$

onde $[S]$ é o vetor das amostras de D_i , $[A]$ é a matriz das coordenadas (x, y) e $[P]$ é o vetor dos coeficientes.

Portanto, precisamos conhecer o vetor $[P]$ e encontrar os coeficientes do polinômio que ajusta D_i . Desde que o sistema 2.4 seja sobredeterminado, uma solução é a utilização da função pseudo-inversa conforme os passos a seguir:

$$[P] = [A]^\dagger [S] \quad (2.5)$$

onde $[A]^\dagger$ é a pseudo-inversa de $[A]$.

Sendo assim, a partir de pontos do gráfico Tornado, formamos as amostras para o sistema 2.4. Uma vez que o sistema formado atendia ao pré-requisito para o uso da pseudo-inversa, utilizamos a função interna `pinv` do MATLAB R2009a para cálculo de $[P]$. O resultado encontrado foi o seguinte:

$$D_i(x, y) = 1.00x + 0.36x^2 - 0.02xy - 0.11x^2y + 0.01x^2y^2 \quad (2.6)$$

Porém, diferente do trabalho citado, a solução aproximada que encontramos para $[P]$ não foi satisfatória. O modelo encontrado apresentou desvios elevados, acima de 10%, para pontos que não pertenciam ao espaço amostral dos pares (x, y) . Para pontos que pertenciam às amostras, o modelo apresentou desvios mínimos. Buscamos melhorar a amostragem, a fim de obter uma melhor aproximação da função D_i . No entanto, os resultados continuaram apresentando desvios elevados nas mesmas situações. Conseqüentemente, utilizamos o segundo método encontrado na bibliografia para descrever o gráfico Tornado.

2.2 Ajuste de Curvas para Correção de Efeito de Poço

A partir de amostras obtidas dos gráficos da Schlumberger, Anexo I, para as correções de efeito de poço de medidas de resistividade rasa R_{LLS} e profunda R_{LLD} da ferramenta Duplo Laterolog, ajustamos funções para inseri-las no nosso programa. Após a discretização daqueles gráficos, referentes a um poço de 8in. , transportamos os dados para o programa Microsoft Excel. As funções foram ajustadas segundo os modelos polinomial para R_{LLD} , e logaritmo para R_{LLS} , oferecidos por aquele programa. Os resultados foram os seguintes:

$$R_{LLDp} = (-1 \times 10^{-12} (R_{LLD}/R_m)^3 + 2 \times 10^{-08} (R_{LLD}/R_m)^2 - 8 \times 10^{-05} (R_{LLD}/R_m) + 0,9768) R_{LLD} \quad (2.7)$$

onde: R_{LLDp} é a medida de R_{LLD} corrigida para o efeito de poço, R_m é a resistividade da lama e o coeficiente de determinação é $R^2 = 0,9107$.

$$R_{LLSp} = (-0,009 \ln(R_{LLS}/R_m) + 1,0277) R_{LLS} \quad (2.8)$$

onde: R_{LLSp} é a medida de R_{LLS} corrigida para o efeito de poço e o coeficiente de determinação é $R^2 = 0,9439$.

Essas funções foram inseridas no nosso programa na seção Correções de Efeito de Poço. O objetivo é fornecer dados corrigidos para a seção Correções de Efeito de Invasão porque, assim como na utilização do gráfico Tornado, os dados de entrada dessa seção do programa devem ser previamente corrigidos para efeito de poço.

2.3 Equações de Crain para o Gráfico Tornado

No seu Handbook online, Crain (2001) apresenta uma seção sobre correções ambientais de poço e de invasão. Nesta seção, ele descreve equações para correções de medidas da ferramenta Duplo Laterolog que utilizamos aqui.

Descrição das Equações

Segundo Crain (2001), as correções para efeito de invasão da ferramenta Duplo Laterolog obedecem aos seguintes critérios e equações:

Se $(R_{LLD}/R_{XO}) \leq 1,0$ então $R_t = 1,7 \times R_{LLD} - 0,7 \times R_{LLS}$

Se $(R_{LLD}/R_{LLS}) \geq 1,1$ então $R_t = 1,1 \times R_{LLD}$

$C = (R_{LLS}/R_{XO}) \times ((R_{LLD} - R_{XO})/(R_{LLD} - R_{LLS}))$

Se $C = 1,7$ então $R_t = R_{LLD}$

Se $C \neq 1,78$ então $R_t = 2,18 \times C \times R_{LLD}/(1,78 \times C - 1)$

onde C é um termo auxiliar.

Através de exemplos, notamos que a intenção do autor foi considerar sempre a próxima condição, mesmo que a anterior fosse atendida. Em outras palavras, se um certo conjunto de dados satisfizer a condição $(R_{LLD}/R_{XO}) \leq 1,0$, e também a condição $C \neq 1,78$, então $R_t = 2,18 \times C \times R_{LLD}/(1,78 \times C - 1)$. A partir desses critérios e equações, foi desenvolvido o fluxograma descrito no Anexo II.1. Por sua vez, esse fluxograma deu origem ao código em linguagem Fortran do programa descrito no Anexo I.

Restrições de uso

Segundo Crain (2001), os cálculos podem aumentar ou diminuir os valores de R_t , porém, só devem ser consideradas como correções aquelas medidas que aumentaram em relação a correção anterior de efeito de poço. O fato deve-se a diminuição na resistividade da formação causado pelo efeito do filtrado da lama. Portanto, após a correção desse fenômeno, espera-se encontrar a resistividade verdadeira da formação, maior do que aquela sob influência do filtrado da lama. O programa também não contempla correções em zonas com hidrocarbonetos (o que deve ser motivo de novos projetos), pois a influência desses aumenta os valores de resistividade e fere uma das restrições para utilização do gráfico Tornado: não aplicar em zonas de transição.

2.4 Elaboração do Programa de Computador

Utilizamos o editor e compilador Force 2.0 para desenvolver o código em linguagem Fortran. O objetivo era elaborar um código simples e prático, capaz de ser facilmente utilizado e modificado. Buscamos também contemplar as restrições impostas pelo gráfico Tornado a fim de se obter maior precisão dos resultados.

A fim de facilitar os trabalhos, os dados que serão lidos pelo programa devem ser previamente editados e salvos em qualquer editor de textos, no formato .dat , seguindo a sequência de leitura observada no código. Por exemplo:

$Z_i(m)$	$R_{XO_i}(Ohm.m)$	$R_{LLS_i}(Ohm.m)$	$R_{LLD_i}(Ohm.m)$
Z_1	R_{XO1}	R_{LLS1}	R_{LLD1}
Z_2	R_{XO2}	R_{LLS2}	R_{LLD2}
Z_3	R_{XO3}	R_{LLS3}	R_{LLD3}
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Z_n	R_{XO_n}	R_{LLS_n}	R_{LLD_n}

Tabela 2.1: Tabela Exemplo - Entrada de dados

onde: Z_n representa a profundidade das n -ésimas medidas de R_{LLD} , R_{LLS} e R_{XO} .

Sendo assim, o programa é capaz de buscar os dados a serem lidos diretamente de um arquivo, segundo o padrão pré-estabelecido. Os dados são submetidos a correção de efeito de poço e posteriormente efeito de invasão. Os dados de saída, R_t e D_i , serão mostrados

na tela do computador e salvos no formato .txt num arquivo no mesmo diretório onde se encontra o programa.

Esse programa não dispensa a análise dos seus resultados, ou seja, aquele que estiver utilizando-o deve observar se há coerência nas respostas apresentadas.

2.4.1 Medidas

Testamos o programa utilizando dados provenientes dos perfis do Anexo III. Após calcular as coordenadas $x = \frac{R_{LLD_i}}{R_{LLS_i}}$ e $y = \frac{R_{LLD_i}}{R_{XO_i}}$, plotamos oito pontos no gráfico conforme indicado na figura 2.1, sendo dois deles coincidentes, (0.5,2.0). Cada ponto correspondente a uma profundidade entre 272 e 279 *m* conforme indicado pela letra *Z* na tabela 2.2. Fizemos adaptações no programa para calcular o erro de R_t e D_i em relação as medidas obtidas através do método gráfico, R_{tg} e D_{ig} . Calculamos também o erro de D_{ip} , medidas obtidas pela equação 2.6, em relação a D_{ig} . Inicialmente consideramos uma lama com resistividade de 0.1 Ohm.m @ 75°F (75Kppm NaCl) e posteriormente alteramos esse valor para 0.4 Ohm.m @ 75°F (15Kppm NaCl), para compararmos também os efeitos da variação desse parâmetro. Os dados utilizados foram os seguintes:

$Z(m)$	$R_{xo}(Ohm.m)$	$R_{LLS}(Ohm.m)$	$R_{LLD}(Ohm.m)$
272	0.5	1.8	2.0
273	0.7	1.5	1.8
274	0.7	1.8	2.7
275	0.5	1.5	2.2
276	0.7	1.7	2.5
277	1.0	2.0	3.0
278	1.0	2.0	2.8
279	0.5	1.8	2.0

Tabela 2.2: Teste - Entrada de dados

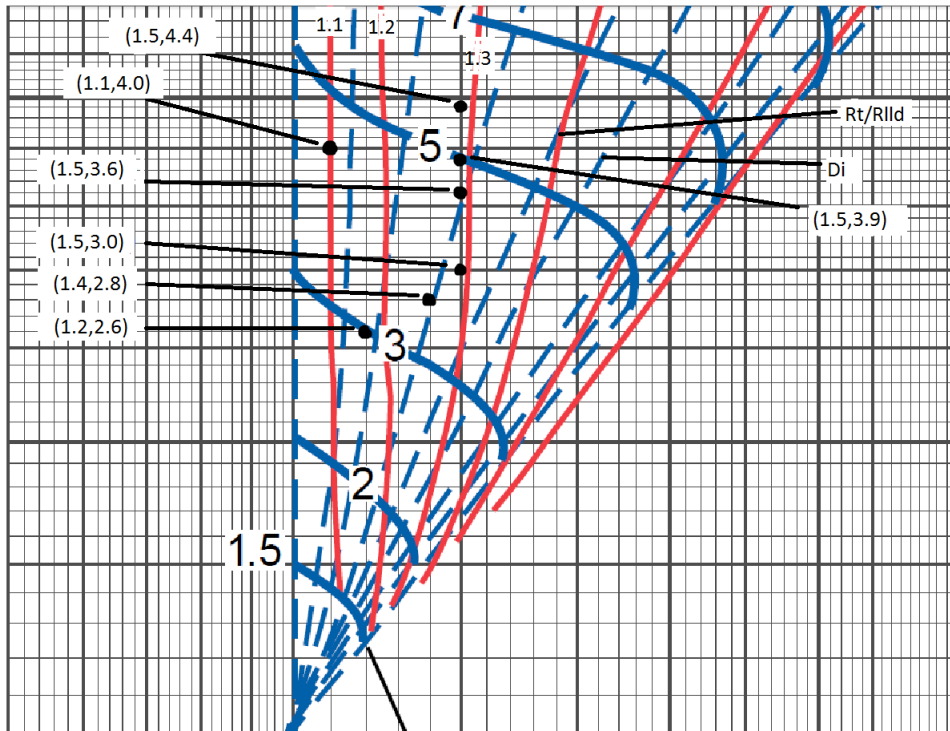


Figura 2.1: Coordenadas das amostras no gráfico Tornado.

Na tabela a seguir, R_{tg} e D_{ig} são as medidas obtidas através do método gráfico e D_{ip} foi obtido pelo ajuste polinomial, equação 2.6. Os resultados e o estudo dos erros relativos foram os seguintes:

$R_m(Ohm.m)$	$Z(m)$	$100 * R_t - R_{tg} /R_{tg}$	$100 * D_i - D_{ig} /D_{ig}$	$100 * D_{ip} - D_{ig} /D_{ig}$
0.1	272	10.80 %	89.72 %	77.06 %
0.4	272	10.53 %	89.79 %	-
0.1	273	17.56 %	87.42 %	92.94 %
0.4	273	16.91 %	87.63 %	-
0.1	274	6.51 %	93.22 %	25.00 %
0.4	274	6.11 %	93.29 %	-
0.1	275	8.83 %	91.61 %	49.09 %
0.4	275	8.55 %	91.67 %	-
0.1	276	4.87 %	93.87 %	16.57 %
0.4	276	4.44 %	93.95 %	-
0.1	277	12.34 %	93.75 %	4.60 %
0.4	277	11.38 %	93.93 %	-
0.1	278	6.04 %	93.98 %	12.43 %
0.4	278	5.53 %	94.07 %	-
0.1	279	7.06 %	92.08 %	45.22 %
0.4	279	6.76 %	92.14 %	-

Tabela 2.3: Resultado e estudo dos erros relativos das medidas.

CAPÍTULO 3

Resultados e Conclusões

Verificou-se que os erros de R_t relativos a R_{tg} foram aceitáveis, mantendo-se em torno de 10%. No entanto, o algoritmo mostrou-se ineficaz para o cálculo do D_i , assim como o modelo obtido pelo ajuste polinomial com base em Ribeiro e Carrasquilla (2013), apresentando erros relativos muito superiores a 10%. No entanto, apesar da não precisão verificada nos resultados referentes a D_i , o programa mostrou-se eficaz para correções de Efeito de Poço e de Invasão sobre medidas do Duplo Laterolog, gerando bons resultados para medidas de resistividade verdadeira da zona virgem R_t , principal objetivo desse trabalho, tornando essa tarefa mais prática do que a utilização dos seus gráficos, principalmente para avaliação de um grande número de amostras.

Os erros verificados para as medidas de D_i , obtidas através da equação 2.6, podem estar relacionados a não precisão das amostras que formaram o sistema matricial 2.5, leituras diretas do gráfico Tornado. Além disso, devemos levar em consideração a propagação dos erros durante a realização dos cálculos para encontrar a pseudo-inversa de $[A]$.

Com relação às medidas de D_i obtidas através das equações de Crain (2001), o autor afirma que este é um parâmetro indicador de qualidade e que não deve ser utilizado na obtenção de outros parâmetros.

De um modo geral, são muitas as restrições para utilização do gráfico Tornado. Os erros observados podem ter relação com tais restrições uma vez que é muito difícil garantir que todas elas sejam satisfeitas.

Sugerimos a elaboração de um novo trabalho que possa eliminar a restrição de utilização do programa em zonas sob influência de hidrocarbonetos e ainda aperfeiçoar as equações para determinação de D_i . Além disso, sugerimos a utilização deste programa no desenvolvimento de treinamentos e cursos na área de hidrogeologia e na disciplina de Perfilagem Geofísica de Poços.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado forças para concluir esse trabalho e conseqüentemente o curso de Geofísica. Obrigado por renovar minha fé e por mostrar-me que sou capaz. Agradeço também a minha esposa pela sua paciência, carinho e por ter comigo abdicado de momentos de lazer e descontração em nome desta realização. Ao meu filho que, desde o início de sua existência, encheu minha vida de paz, alegria e sorte. Papai te ama muito!

Aos meus pais, a quem devo tudo que conquistei e que ainda conquistarei nessa vida. Obrigado pelo exemplo, dedicação e o amor que sempre me deram. Tenho muito orgulho de vocês. Aos meus irmãos e primos, pela amizade, companheirismo e conselhos.

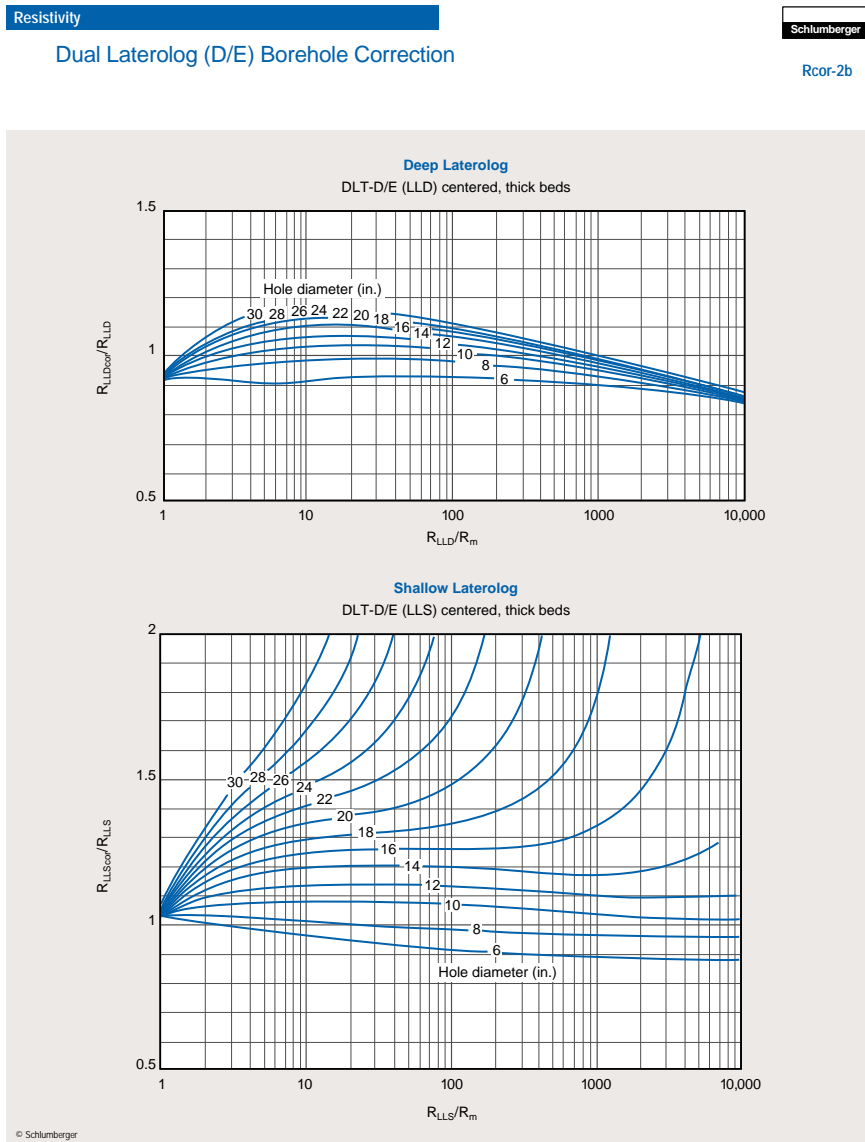
Aos meus colegas de trabalho da Torre de Controle de Salvador, os verdadeiros, aqueles com quem pude contar e compartilhar as dificuldades.

Ao Professor Girão pela orientação neste trabalho e pelo exemplo como profissional. Aos demais membros da banca examinadora pelas correções e melhorias que trouxeram a este trabalho.

Enfim, agradeço a todos que fizeram parte dessa conquista.

APÊNDICE A

Gráficos para Correções de Efeito de Poço

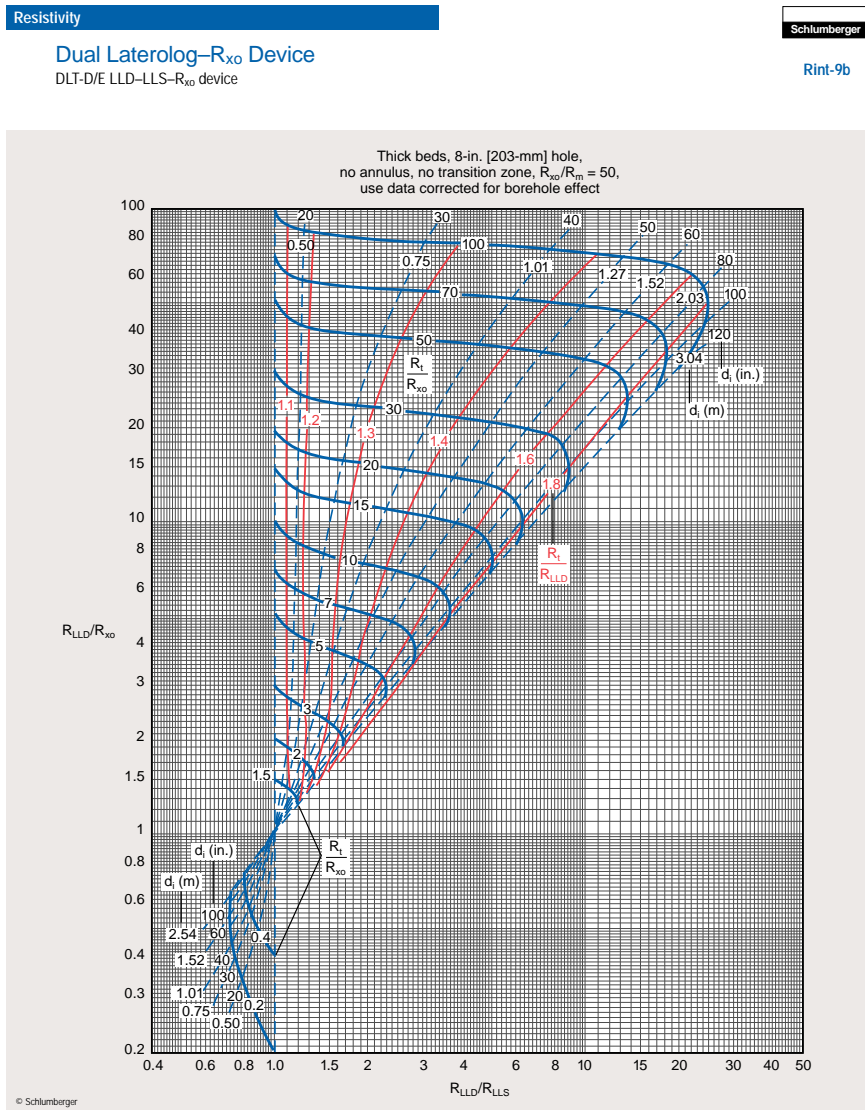


6-1

Figura A.1: Gráficos para Correções de Efeito de Poço. Fonte: (Schlumberger, 2009).

APÊNDICE B

Gráfico para Correção de Efeito de Invasão



6-7

Figura B.1: Gráfico Tornado. Fonte: (Schlumberger, 2009).

Referências

- Archie, G. E. (1942) The electrical resistivity as an aid in determining some reservoir characteristics, Am. Inst. metall. Engineers.
- Crain, E. R. (2001) Online shareware petrophysics training and reference manual, <http://www.spec2000.net/01-index.htm>.
- Darcy, H. (1856) Les fontaines publiques de la ville de dijon.
- Nery, G. G. (1996) Equações hiperbólicas relacionando R_w com STD: Determinação da qualidade da água através dos perfis geofísicos, Cong. Bras. Águas Subt. Anais, ABAS, Salvador, Brasil.
- Nery, G. G. (2013) Perfilagem Geofísica em Poço Aberto - Fundamentos Básicos com Ênfase em Petróleo, SBGF, Rj, Brasil.
- Ribeiro, M. e Carrasquilla, A. (2013) New approach to calculate the mud invasion in reservoirs using well logs.
- Rosa, E. S. (2004) Avaliação hidrogeológica do aquífero São Sebastião na falha de Olindina utilizando geofísica de poço e de superfície, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Bahia-Brasil.
- Schlumberger (2009) Log Interpretation Charts, Edição 2009.
- Schopper, J. R. (1982) Porosity and Permeability, In: LANDOLT- BÖRNSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series; Group 5. Geophysics and Space Research, Vol 1 Physical Properties of Rocks, Subvol. a Springer-Verlag Berlin.
- Serra, O. (1984) Fundamentals of Well Log Interpretation, vol 2, Amsterdam.
- Shön, J. H. (2004) Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics, vol. 18, Handbook of Geophysical Exploration - Seismic Exploration, Elsevier.
- Winsauer, W.; Shearing, H. M. J.; Masson, P. H. e Williams, M. (1952) Resistivity of Brine-Saturated Sands in Relation to Pore Geometry., American Association of Petroleum Geologists Bulletin.
- Worthington, P. F. (2003) The petrophysics of problematic reservoirs.

ANEXO I

Programa Correções Ambientais

```
INTEGER :: i
REAL :: Rm
REAL, DIMENSION(8) :: Z, RLLD, Rt, RLLS, RXO, Di, C, RLLDp, RLLSp
REAL, DIMENSION(8) :: Rtv, Div, Dic, ERtv, EDiv, EDic
WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'***** UFBA *****'
WRITE(*,*)'***** GEO213 *****'
WRITE(*,*)'***** PROG. Rt e Di *****'
WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'*****'
!*****!
!COLETA DE DADOS
WRITE(*,*)'INFORME O VALOR DE Rm'
READ(*,*)Rm
OPEN(2,FILE='in.DAT')
OPEN(3,FILE='out2.txt')
WRITE(3,5)Rm
WRITE(*,5)Rm
DO i=1,8
  READ(2,*) Z(i),RXO(i),RLLS(i),RLLD(i),Rtv(i),Div(i),Dic(i)
  !CORREÇÕES DE EFEITO DE POÇO
  RLLDp(i)=((-10)**(-12))*(RLLD(i)/Rm)**3+
  *(20**(-8))*(RLLD(i)/Rm)**2+
  *((-80)**(-5))*(RLLD(i)/Rm)+0.9768)*RLLD(i)
  RLLSp(i)=RLLS(i)*(-0.009*LOG(RLLS(i)/Rm)+1.0277)
  !CORREÇÕES DE INVASÃO
  C(i)=(RLLSp(i)/RXO(i))*((RLLDp(i)-RXO(i))/(RLLDp(i)-RLLSp(i)))
  IF (C(i)/=(1/1.78)) THEN
    Rt(i)=2.18*C(i)*RLLDp(i)/(1.78*C(i)-1)
  ELSE IF (C(i)==(1/1.7)) THEN
    Rt(i)=RLLDp(i)
  ELSE IF (RLLDp(i)/RLLSp(i)>=1.1) THEN
    Rt(i)=1.1*RLLDp(i)
  ELSE IF (RLLDp(i)/RXO(i)<=1) THEN
    Rt(i)=1.7*RLLDp(i)-0.7*RLLSp(i)
  ELSE
    Rt(i)=RLLDp(i)
  END IF
!CÁLCULO DE Di
  IF (Rt(i)/RLLDp(i)>1) THEN
    Di(i)=10.0**(Rt(i)/RLLDp(i)-1)
  ELSE IF (Rt(i)/RLLDp(i)<1) THEN
    Di(i)=160.0*(1-RLLDp(i)/Rt(i))
  ELSE
    Di(i)=0.0
  END IF
!TESTE DE CORREÇÃO
  IF (Rt(i)>=RLLDp(i)) THEN
```

```

        WRITE(3,10)i,Z(i),Rt(i),Di(i),Rtv(i),Div(i),Dic(i)
        WRITE(*,10)i,Z(i),Rt(i),Di(i),Rtv(i),Div(i),Dic(i)
    ELSE
        WRITE(3,10)i,Z(i),RLLDp(i),Di(i),Rtv(i),Div(i),Dic(i)
        WRITE(*,10)i,Z(i),RLLDp(i),Di(i),Rtv(i),Div(i),Dic(i)
    END IF
!REULTADOS E DESVIOS
    Ertv(i)=abs(100*(Rt(i)-Rtv(i))/Rtv(i))
    EDiv(i)=abs(100*(Di(i)-Div(i))/Div(i))
    EDic(i)=abs(100*(Dic(i)-Div(i))/Div(i))
    WRITE(3,20)Ertv(i),EDiv(i),EDic(i)
    WRITE(*,20)Ertv(i),EDiv(i),EDic(i)
5   FORMAT(2/,1X,'Resistividade da Lama: Rm = ',f6.2,1x,'Ohm.m',2/)
10  FORMAT(2/,1x,'Profundidade Z',I1,'= ',f6.2,1x,'m',2/,
    *1X,'Programa: Rt =',f6.2,1x,'Ohm.m',5x,'Di =',f6.2,1x,'in',2/,
    *1X,'Grafico: Rt =',f6.2,1x,'Ohm.m',5x,'Di =',f6.2,1x,'in',2/,
    *1x,'Funcao Polinomial: Di =',f6.2,1x,'in',3/)
20  FORMAT(1X,'Erro de Rt relativo a medida realizada no Grafico: ',
    *f8.2,1x,'% ',2/,
    *1x,'Erro de Di relativo a medida realizada no Grafico: ',
    *f8.2,1x,'% ',2/,
    *1x,'Erro de Di polinomial relativo a medida no Grafico: ',
    *f8.2,1x,'% ',5/)
    END DO
    CLOSE(2)
    CLOSE(3)
    PAUSE
    END

```

ANEXO II

Fluxograma Correções Ambientais

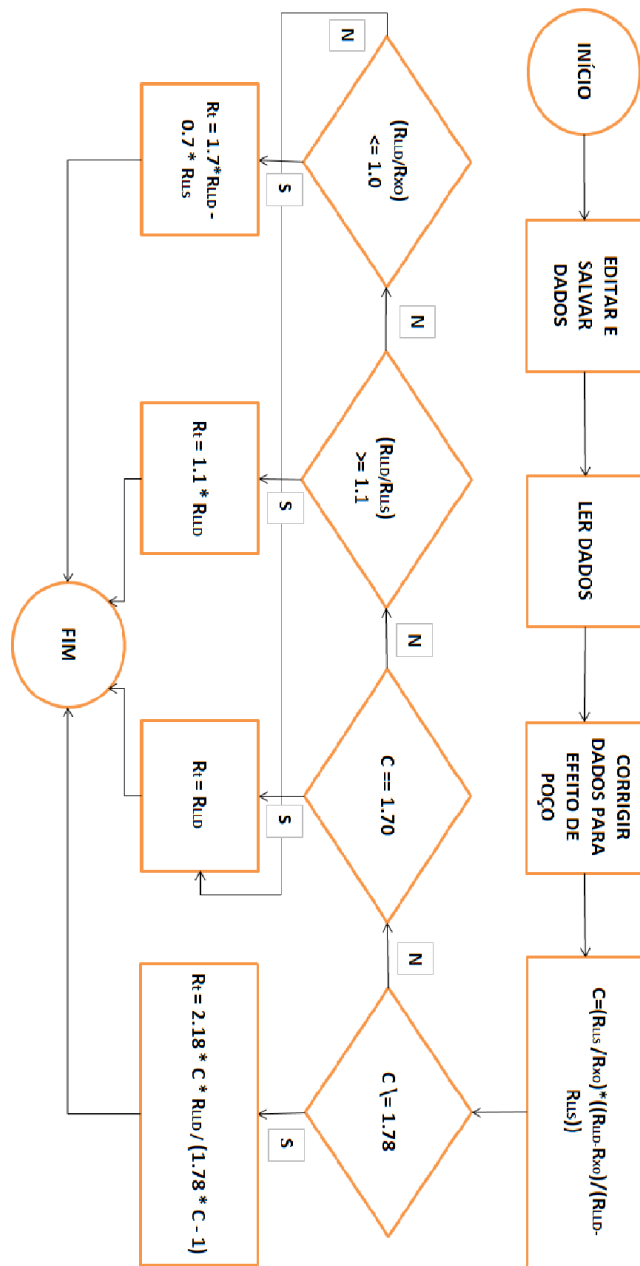


Figura II.1: Fluxograma Correções Ambientais.

ANEXO III

Perfis

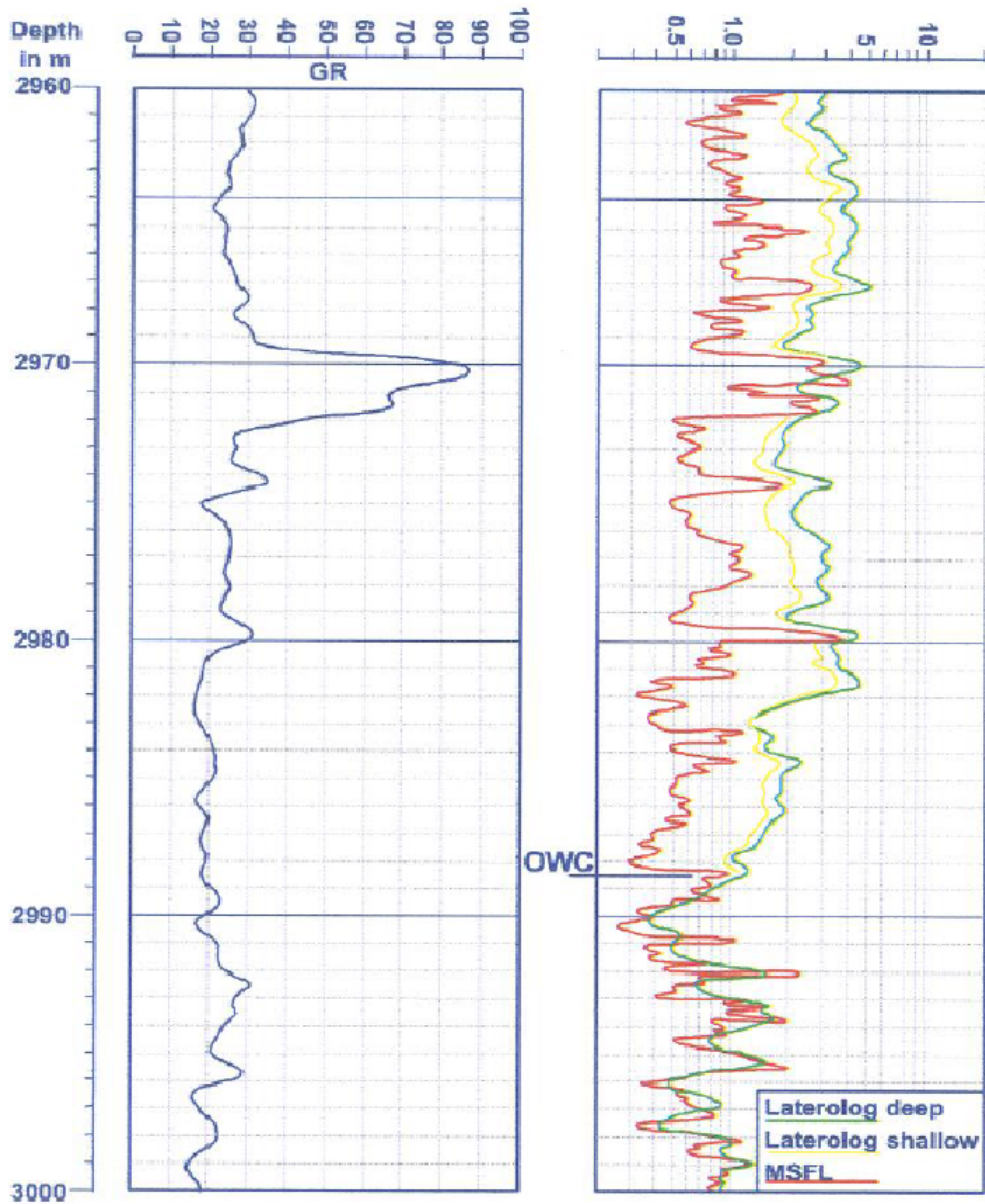


Figura III.1: Perfis de GR e Resistividades R_{XO} , R_{LLS} e R_{LLD} . Fonte: Notas de Aula PET370 (2012).