

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DECONVOLUÇÃO DE PERFIS DE POÇOS
ATRAVÉS DO AJUSTE DE ENERGIA

TESE APRESENTADA POR
CARLOS EDUARDO GUERRA

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação : 14/04/1994

COMITÊ DE TESE:

M. A. Lovell
Dr. Michael Anthony Lovell (Orientador)

Jadir da Conceição da Silva
Dr. Jadir da Conceição da Silva

Stefan M. Lüthi
Dr. Stefan Moritz Lüthi

BELÉM

1994

GUERRA, Carlos Eduardo. Deconvolução de perfis de poços através do ajuste de energia. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1994. 111 p. il. Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1994.

1. PERFILAGEM DE POÇOS. 2. TRATAMENTO DE PERFIS DE POÇOS. 3. DECONVOLUÇÃO. I. Título.

Aos meus pais Jose C. Guerra e
Irany B. Guerra.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Dr. Michael A. Lovell pela dedicação e aos demais membros da banca examinadora pelas correções e contribuições dadas.

Ao convênio UFPa/PETROBRÁS/FADESP/CNPq/FINEP pelo suporte financeiro a este programa de pós-graduação.

A Prof. Dra. Sonia D. Guerreiro pelo suporte financeiro dado após o término da minha bolsa.

Aos amigos André Andrade e João Protázio pela ajuda e contribuição dada durante a fase de correção.

A UFPa, ao Colegiado do curso de Pós-Graduação em Geofísica e ao corpo de professores e funcionários do Núcleo de Pesquisas em Geofísica de Petróleo que de uma forma direta ou indireta propiciaram condições favoráveis para o cumprimento desta tarefa.

A todos os amigos e colegas de mestrado e doutorado do Núcleo de Pesquisas em Geofísica de Petróleo que de forma direta ou indireta ajudaram no cumprimento deste trabalho.

SUMÁRIO

	p.
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 - INTRODUÇÃO	3
2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1 PERFILAGEM DE POÇO	6
2.2 CAMADAS FINAS E RESERVATÓRIOS LAMINARES	7
2.3 RESOLUÇÃO VERTICAL	9
2.4 FUNÇÃO RESPOSTA VERTICAL DA FERRAMENTA	12
2.5 A FERRAMENTA DE INDUÇÃO	16
2.5.1 Generalidades	16
2.5.2 A Física	16
2.5.3 O Fator Geométrico	17
2.5.4 Limitações	21
2.5.5 As Ferramentas de Indução Disponíveis	21
3 - MOTIVAÇÃO DO ESTUDO DA DECONVOLUÇÃO	24
3.1 O MODELO CONVOLUCIONAL	24
3.2 A TRANSFORMADA DE FOURIER	25
3.3 O TEOREMA DA CONVOLUÇÃO	29
3.4 O TEOREMA DE PARSEVAL	31
4 - METODOLOGIA	35
4.1 O PERFIL DE ALTA RESOLUÇÃO FILTRADO	35
4.2 A CORREÇÃO DO PERFIL DE BAIXA RESOLUÇÃO	41
4.2.1 O Perfil de Baixa Resolução Deconvolvido	41

4.2.2 Síntese	47
5 - APLICAÇÃO EM DADOS SINTÉTICOS	50
5.1 EXEMPLO 1	51
5.2 EXEMPLO 2	56
5.3 EXEMPLO 3	59
5.4 EXEMPLO 4	61
5.5 EXEMPLO 5	65
5.6 EXEMPLO 6	68
5.7 EXEMPLO 7	72
6 - APLICAÇÕES EM DADOS REAIS	76
6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	76
6.2 HISTÓRICO DA BACIA POTIGUAR	78
6.3 EXEMPLO 1	78
6.4 EXEMPLO 2	82
6.5 EXEMPLO 3	87
6.6 EXEMPLO 4	92
6.7 EXEMPLO 5	92
6.8 EXEMPLO 6	97
6.9 EXEMPLO 7	98
6.10 EXEMPLO 8	99
6.11 EXEMPLO 9	100
7 - CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

TABELAS

Tabela 2.1 Espessuras de camadas e ferramentas apropriadas(Adaptado de SERRA & ANDREANI, 1991)	9
Tabela 2.2 RESOLUÇÕES VERTICAIS DE ALGUMAS FERRAMENTAS DE PERFILAGEM (Adaptado de SERRA & ANDREANI, 1991)	11

FIGURAS

Figura 2.1	Resolução vertical intrínseca da ferramenta, obtida a partir da função resposta vertical da ferramenta.	10
Figura 2.2	Sistema linear que descreve o processo de obtenção de uma medida numa perfilagem.	12
Figura 2.3	Função resposta vertical como resposta do sistema ao impulso.	13
Figura 2.4	Função resposta vertical da ferramenta de indução (Extraído de THADANI- & MERCHANT, 1982).	15
Figura 2.5	Função resposta vertical da ferramenta sônica (Extraído de LOOYES-TIJN, 1982).	15
Figura 2.6	Princípio operacional da ferramenta de indução (Extraído de SERRA, 1984).	17
Figura 2.7	Sinais gerados nas bobinas emissora e receptoras (Adaptado de SERRA, 1984).	18
Figura 2.8	Fator geométrico radial em função do raio (Extraído de SERRA, 1984).	20
Figura 2.9	Fator geométrico vertical para sonda de indução com duas bobinas.	20
Figura 2.10	Perfis de indução da ferramenta 6FF40 sobre uma camada de 4.16 metros. O perfil em linha pontilhada representa os dados sem nenhum tipo de correção . O perfil em linha tracejada representa os dados com correção para o efeito de película (adaptado de SHEN, 1988).	23
Figura 3.1	Distribuição ideal de uma determinada propriedade petrofísica $c(z)$ em função da profundidade z	26
Figura 3.2	Função resposta vertical para a ferramenta de alta resolução $a(z)$ (linha contínua) e a função resposta vertical para a ferramenta de baixa resolução $b(z)$ (linha tracejada).	26
Figura 3.3	Em a, temos o resultado de $c(z) * a(z)$ que é o valor real da medida na zona de investigação rasa, e em b, temos $c(z) * b(z)$ que é a medida real na zona de investigação profunda.	27
Figura 3.4	Transformada de Fourier de uma função "caixa".	28
Figura 3.5	Exemplo gráfico do teorema da convolução (Extraído de BRIGHAM, 1974).	30
Figura 3.6	Espectro de frequência (b) da função resposta vertical da ferramenta de indução rasa e profunda (a). Nota-se que os pontos em que a curva corta a abscissa x são as frequências cegas (Extraído de BARBER, 1988).	32

Figura 3.7	Representação gráfica do teorema de Parseval (Extraído de BRIGHAM, 1974).	34
Figura 4.1	Perfil de condutividades para a zona de investigação rasa. A linha contínua representa as medidas obtidas pela ferramenta, já a linha tracejada representa a distribuição ideal de condutividades.	36
Figura 4.2	Perfil de condutividades para a zona de investigação profunda. A linha contínua representa as medidas obtidas pela ferramenta, já a linha tracejada representa a distribuição ideal de condutividades.	37
Figura 4.3	Perfil de alta resolução filtrado (linha contínua), comparado ao perfil de alta resolução (linha tracejada) e ao perfil de baixa resolução (linha pontilhada).	42
Figura 4.4	Reta que ajusta a_F a fim de obter a estimativa $\hat{b}$ do perfil de baixa resolução b num intervalo de boa correlação. Os parâmetros m e n são obtidos através de uma regressão linear.	44
Figura 4.5	Reta que ajusta a para obter a estimativa de alta resolução $\bar{b}$ do perfil b dentro de um intervalo qualquer. Os parâmetros p e q foram obtidos através de uma regressão linear.	45
Figura 4.6	Perfil de baixa resolução deconvolvido (linha contínua), comparado ao perfil de baixa resolução vertical (linha tracejada) e a função distribuição ideal de condutividades (linha pontilhada).	47
Figura 4.7	Fluxograma detalhado dos passos necessários para a aplicação da metodologia do ajuste de energia para a deconvolução de perfis.	48
Figura 5.1	Função resposta vertical da ferramenta de alta resolução (extraído de ANDRADE, 1992).	51
Figura 5.2	Função resposta vertical da ferramenta de baixa resolução (extraído de ANDRADE, 1992).	52
Figura 5.3	Função que caracteriza uma distribuição ideal de uma formação hipotética com sete camadas.	53
Figura 5.4	Perfil de alta resolução (linha contínua) comparado à função de distribuição de condutividades (linha tracejada).	53
Figura 5.5	Perfil de baixa resolução (linha contínua) comparado à função de distribuição de condutividades (linha tracejada).	54
Figura 5.6	Perfil de alta resolução filtrado (linha contínua) comparado ao perfil de alta resolução (linha tracejada) e o perfil de baixa resolução (linha pontilhada).	55

Figura 5.7	Perfil de baixa resolução deconvolvido(linha contínua) comparado ao perfil de baixa resolução convencional (linha tracejada) e a função distribuição ideal de condutividades(linha pontilhada).	55
Figura 5.8	Acima, a distribuição de condutividades para a zona de investigação rasa. Logo abaixo, a distribuição de condutividades da zona de investigação profunda, aqui chamada de zona virgem.	57
Figura 5.9	Acima, o perfil de alta resolução(linha contínua) juntamente com a distribuição ideal de condutividade rasa(linha tracejada). Logo abaixo, o perfil de baixa resolução(linha contínua) juntamente com a distribuição de condutividades profunda(linha tracejada).	58
Figura 5.10	Perfil de alta resolução filtrado(linha cheia) comparado ao perfil de alta resolução(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução(linha pontilhada).	59
Figura 5.11	Perfil de baixa resolução vertical deconvolvido(linha cheia) comparado ao perfil de baixa resolução convencional(linha tracejada) e a distribuição ideal de condutividades da zona virgem(linha pontilhada).	60
Figura 5.12	Acima, o perfil de alta resolução vertical. Abaixo, o perfil de baixa resolução vertical. Ambos os perfis estão acrescidos de ruído aleatório.	62
Figura 5.13	Perfil de alta resolução filtrado(linha contínua) comparado ao perfil de alta resolução(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução(linha pontilhada). Todos os perfis estão acrescido de ruído aleatório.	63
Figura 5.14	Perfil de baixa resolução deconvolvido(linha contínua) comparado com o perfil de baixa resolução vertical convencional(linha tracejada), ambos com ruídos. A linha pontilhada indica a distribuição ideal de condutividades da zona virgem.	63
Figura 5.15	Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona rasa, e logo abaixo a da zona de investigação profunda, para uma formação hipotética com a presença de um reservatório laminar.	64
Figura 5.16	Perfil de alta resolução(linha contínua) comparado à função distribuição(linha tracejada). Observe que o perfil apresenta um nível de ruído.	65
Figura 5.17	Perfil de baixa resolução vertical(linha contínua) juntamente com com função distribuição de condutividades da zona virgem(linha tracejada), com ruídos.	66
Figura 5.18	Perfil de alta resolução vertical filtrado(linha contínua) comparado ao perfil de alta resolução(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução(linha pontilhada).	66

Figura 5.19	Perfil de baixa resolução vertical deconvolvido(linha contínua) comparado ao perfil de baixa resolução convencional(linha tracejada) e a distribuição de condutividades da zona virgem(linha pontilhada). . .	67
Figura 5.20	Perfil de alta resolução filtrado pelo ajuste de energia (linha contínua) comparado com o obtido pela metodologia de NELSON & MITCHELL (1991)(linha tracejada).	68
Figura 5.21	Perfil de baixa resolução deconvolvido pelo método do ajuste de energia(linha contínua), comparado ao deconvolvido pelo método de NELSON & MITCHELL (1991)(linha tracejada).	69
Figura 5.22	Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona rasa (linha tracejada) para uma formação com distribuição de camadas aleatória, e o perfil de alta resolução vertical(linha cheia).	70
Figura 5.23	Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona profunda para uma formação com distribuição de camadas aleatória(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução vertical(linha cheia).	70
Figura 5.24	Perfil de alta resolução filtrado(linha cheia) juntamente com perfil de alta resolução(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução(linha pontilhada).	71
Figura 5.25	Perfil de baixa resolução vertical deconvolvido(linha cheia) comparado ao perfil de baixa resolução convencional(linha tracejada) e a distribuição ideal de condutividades da zona de investigação profunda(linha pontilhada).	72
Figura 5.26	Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona de investigação rasa (linha tracejada) para uma formação com distribuição de camadas aleatória, e o perfil de baixa resolução vertical(linha cheia). .	73
Figura 5.27	Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona de investigação profunda (linha tracejada) para uma formação com distribuição de camadas aleatória, e o perfil de alta resolução vertical(linha cheia). .	73
Figura 5.28	Perfil de alta resolução filtrado(linha cheia) juntamente com perfil de alta resolução(linha tracejada).	74
Figura 5.29	Perfil de baixa resolução vertical deconvolvido(linha cheia) comparado ao perfil de baixa resolução convencional(linha tracejada) e a distribuição ideal de condutividades da zona de investigação profunda(linha pontilhada).	75
Figura 6.1	Testemunho geológico do poço c referente a uma seção de reservatório.	79

Figura 6.2	Em (a), temos os perfis SP (Potencial Espontâneo), o GR (Raios Gama) e o Caliper, para uma dada seção do poço c. Em (b), temos os perfis de indução profunda ILD, o indução média ILM e o esférico focalizado para mesma seção.	80
Figura 6.3	Perfil SFLF comparado ao perfil SFL e ao perfil ILD. Ambos os perfis referem-se ao poço c.	81
Figura 6.4	Em a, temos os perfis SP, Caliper e GR do trecho selecionado. Em b temos o ILD comparado ao SFL e o perfil deconvolvido ILDD comparado ao perfil convencional ILD para este mesmo trecho.	83
Figura 6.5	Em (a), temos o SP, CALIPER e GR para uma dada seção do poço c. Em (b), os perfis ILD, ILM e SFL.	84
Figura 6.6	Perfil ILM comparado ao perfil ILMF e o perfil ILMF comparado ao perfil ILD.	85
Figura 6.7	ILM comparado ao ILD juntamente com o ILDD comparado ao ILD.	86
Figura 6.8	Resultado da deconvolução do perfil ILD feita pelo perfil ILM e pelo perfil SFL.	88
Figura 6.9	Em (a), temos os perfis SP, GR e CALIPER. Em (b), temos o SFL, o PHASOR-ILD e o PHASOR-ILM. Todos os perfis referem-se ao poço e.	89
Figura 6.10	Na trilha 1 perfis SFLF para um ajuste ao PHASOR-ILD e para um ajuste ao PHASOR-ILM. Na trilha 2 temos o perfil SFLF comparado ao perfil PHASOR-ILD. Na trilha 3 temos o perfil SFLF comparado ao perfil PHASOR-ILM.	90
Figura 6.11	Na trilha 1, temos o perfil SFL. Na trilha 2 temos o perfil PHASOR-ILD deconvolvido comparado ao PHASOR-ILD convencional. Na trilha 3 temos o o perfil PHASOR-ILM deconvolvido comparado ao perfil PHASOR-ILM convencional.	91
Figura 6.12	Perfil MSFL juntamente com o MSFLF(MSFL filtrado).	93
Figura 6.13	Perfil GR convencional comparado ao perfil GR deconvolvido(GRD).	94
Figura 6.14	Perfil MSFL juntamente com o MSFLF(MSFL filtrado).	95
Figura 6.15	Perfil SFL convencional comparado ao perfil SFL deconvolvido(SFLD).	96
Figura 6.16	Perfil ϕ_N convencional comparado ao ϕ_N deconvolvido $\phi_N D$ e o perfil P_e para o poço f.	97
Figura 6.17	Perfil de indução ILD juntamente com o indução deconvolvido ILDD e o perfil MSFL.	98
Figura 6.18	Em (a), temos o perfil MSFL referente ao poço f; em (b) temos os perfis de densidades ρ_b convencional e o deconvolvido $\rho_b D$	99

Figura 6.19 Perfil de indução ILM juntamente com o indução deconvolvido ILMD
e o perfil MSFL e o MSFL filtrado(MSFLF). 100

RESUMO

As medidas de resistividade são de fundamental importância para o cálculo da saturação de óleo em reservatórios potencialmente produtores. A combinação das medidas de resistividade rasa e profunda permite a obtenção dos parâmetros R_t , R_{xo} e d_i . Mas, em reservatórios complexos existem dificuldades em se obter leituras confiáveis de R_t , devido à baixa resolução vertical das ferramentas de investigação profunda.

Em reservatórios laminados, por exemplo, as leituras obtidas pela ferramenta de indução profunda (ILD) podem levar a uma interpretação errônea das mesmas, levando a acreditar que as medidas obtidas do perfil referem-se a uma única camada. Este problema pode ser em parte resolvido através de uma metodologia que melhore a resolução vertical dos perfis de investigação profunda, valendo-se do uso de informações obtidas de um perfil de alta resolução vertical, i.e; a curva de resistividade rasa. Uma abordagem neste sentido seria usar um perfil de alta resolução que apresente uma boa correlação com o perfil de investigação profunda. Esta correlação pode ser melhor avaliada se aplicarmos um filtro no perfil de alta resolução, de tal forma que o perfil resultante tenha teoricamente a mesma resolução vertical do perfil de baixa resolução. A obtenção deste filtro, porém, recai na premissa de que as funções respostas verticais para as ferramentas de alta e baixa resolução são disponíveis, o que não ocorre na prática.

Este trabalho se propõe mostrar uma nova abordagem onde o filtro pode ser obtido a partir de um tratamento no domínio da frequência. Tal tratamento visa igualar a energia espectral do perfil de alta resolução à energia espectral do perfil de baixa resolução tendo como base o Teorema de Parseval. Será mostrado que a resolução vertical depende fundamentalmente da energia espectral do perfil em questão. A seguir, uma regressão linear é aplicada sobre os perfis de alta resolução filtrado e de baixa resolução. Para cada ponto amostrado dos perfis, uma rotina de minimização é aplicada visando escolher o melhor intervalo de correlação entre os perfis. Finalmente, um fator de correção é aplicado sobre cada ponto do perfil de baixa resolução.

Os resultados obtidos com os perfis de indução são promissores, demonstrando a eficácia da abordagem e mesmo quando aplicada em perfis com diferentes propriedades petrofísicas, a metodologia funcionou satisfatoriamente, sem danificar os perfis originais.

ABSTRACT

Resistivity measurements are of fundamental importance for the calculation of oil saturation in potentially producing reservoirs. The combined measurement of shallow and deep resistivities enables the determination of the parameters R_t , R_{xo} and d_i . But in complex reservoirs we have difficulty in obtaining a confident reading of R_t , due to the low vertical resolution of deep reading tools.

In laminated reservoirs, for example, the deep induction reading ILD can be interpreted erroneously with the belief that the measurement refers to one bed. This may be true for extreme case of thick beds, but more often is not. This problem can be partly resolved by enhancement of the vertical resolution of the deep reading log through comparison with the high resolution (shallow resistivity) log. One approach is to use a high resolution log where there is good correlation with the deep reading log. This correlation can be better evaluated if we apply a filter to the high resolution log such that theoretically the resultant log has the same vertical resolution as the low resolution log. However, this assumes that the vertical response of the high and low resolution tools are available, and in practice this is often not the case.

In this study we attempt to demonstrate an alternative approach where the filter can be obtained from consideration of the frequency domain. The technique compares the spectral energy of the high and low resolution logs. It is shown that the vertical resolution depends fundamentally on the spectral energy of the actual log based on Parseval Theorem. Next a linear regression is applied to the filtered high resolution and low resolution logs and for each depth a minimisation routine is applied to determine the best correlation interval between the logs. Finally a correction factor is applied to each point on the low resolution log. This factor is considered by the correlation coefficients over the interval minimised for each point.

The results obtained with induction logs are promising and the methodology should be applied on different logs techniques.

1 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, temos observado um crescente interesse por parte dos analistas de perfis de poço em implementar métodos e procedimentos que melhorem a resolução vertical de alguns perfis, particularmente o de indução eletromagnética. Várias metodologias têm sido propostas, porém, nenhuma delas apresentaram resultados definitivos (MINETTE, 1990).

O problema da resolução vertical da maioria das ferramentas de perfilagem está relacionada a medidas de propriedades petrofísicas em camadas tão finas que a ferramenta não consegue efetuar uma medida precisa. Na verdade, a leitura obtida é uma média ponderada que leva em consideração as propriedades petrofísicas das camadas alvo e adjacentes. Tal problema se torna ainda mais grave quando nos deparamos com reservatórios laminares, com seqüências de várias camadas finas. Nestes tipos de formações, uma ferramenta de baixa resolução vertical não consegue efetuar uma medida precisa de uma camada individual. Desta forma, parâmetros importantes, tais como resistividade e porosidade, podem levar a cálculos de saturações irreais de água e óleo, que não refletem as características geológicas da formação. Assim, uma avaliação imprecisa da formação pode levar o analista de perfis a descartar zonas potencialmente produtoras.

Com a introdução da ferramenta de indução eletromagnética, a exemplo da 6FF40 (marca da SCHLUMBERGER), as pesquisas no sentido de se melhorar a resolução vertical das ferramentas de perfilagem passaram a dar prioridade ao tratamento de sinais, i.e., ao registro já obtido pela ferramenta. Neste sentido, procura-se desenvolver procedimentos matemáticos com a utilização de recursos computacionais. Isto pode ser observado pela ênfase dada na implementação de rotinas, valendo-se das teorias clássicas de tratamento da informação, técnicas de inversão, derivação, análise estatística, dentre outros. Tais procedimentos passaram a designar um conceito que atualmente é conhecido por "Deconvolução de Perfis de Poço". Matematicamente, a deconvolução é a operação inversa da convolução, mas em perfilagem de poço, alguns profissionais atribuem a operação de deconvolução como sendo qualquer metodologia de processamento (SOFTWARE) que melhore a resolução vertical dos perfis.

Métodos no domínio da frequência têm sido amplamente utilizados, mas o problema das frequências cegas (BARBER, 1988) nas curvas de indução é um sério obstáculo à operação da deconvolução. Nestas frequências, a ferramenta de indução não produz nenhuma resposta.

Dentro desta metodologia, podemos citar o trabalho de ZORSKY (1987), que tenta contornar o problema das frequências cegas através da introdução de um fator de estabilização na equação básica da deconvolução. Podemos ainda destacar o ENHANCED RESOLUTION PHASOR PROCESSING (BARBER, 1988) que contorna o problema das frequências cegas no perfil de indução profunda, através de informações obtidas do perfil de indução média. Uma outra forma de tratar o problema da deconvolução, ainda dentro do domínio da frequência, é através do conceito da função resposta vertical da ferramenta sob condições atuais de poço (ANDRADE, 1992), onde a função resposta vertical da ferramenta de baixa resolução pode ser estimada diretamente do perfil. Esta técnica associa informações de um perfil de alta resolução com informações de um perfil de baixa resolução para se obter a resposta vertical da ferramenta de baixa resolução e realizar diretamente a operação de deconvolução.

Existem ainda métodos que combinam respostas de dois ou mais sensores. Nesta abordagem, podemos destacar o ALFA PROCESSING (GALFORD et. al., 1986), onde se utiliza informações provenientes de dois sensores com espaçamentos diferentes. Ferramentas tais como o CNL (COMPENSATED NEUTRON LOG) e o LDT (LITHO-DENSITY TOOL) são ideais para a aplicação do processamento ALFA, pois ambas apresentam dois sensores com espaçamentos diferentes e realizam medidas da mesma grandeza física.

Uma outra metodologia inclui técnicas de inversão e derivadas. Nesta abordagem, temos o DIFERENCIAL PROCESSING (STREETER & ALLEN, 1992), que utiliza o conceito de subtração das respostas indesejáveis a fim de obter uma solução melhorada do problema da deconvolução. O processo baseia-se na aplicação de derivadas sobre o perfil de indução profunda deconvolvido.

Temos ainda uma outra abordagem que interage com programas que simulam efeitos de poço em lateroperfis (COSMO et al., 1991). Neste caso, uma seleção prévia dos parâmetros a serem simulados tem de ser feita, devido à complexidade das respostas das ferramentas laterais.

A deconvolução de perfis pode ser feita valendo-se também do uso de calibrações das medidas, juntamente com procedimentos de compensação dos efeitos de poço (SMITH, 1990). Esta técnica é utilizada para melhorar a resolução vertical dos perfis neutrônicos de longo espaçamento.

Análise de perfis com diferentes resoluções verticais também tem sido usada para a determinação de litologias laminares. Um processo bastante conhecido é o LAMINATED SAND ANALYSIS (ALLEN, 1984), que é utilizado na identificação de camadas finas.

Pode-se trabalhar também no domínio da profundidade, sem utilizar nenhuma transformação para o domínio da frequência. Neste tipo de abordagem, usa-se notação matricial, assim como critérios estatísticos para a minimização de erros.

Apresentaremos uma nova metodologia que utiliza duas ferramentas de resolução vertical diferentes e combina um tratamento no domínio da frequência com uma correção no domínio do espaço. Esta abordagem propõe melhorar a resolução vertical dos perfis de baixa resolução utilizando informações provenientes de perfis de alta resolução vertical. Um aumento na resolução vertical dos perfis de baixa resolução pode ser obtido por meio de uma filtragem juntamente com procedimentos estatísticos que resultam em correções a posteriori. Um filtro é aplicado ao perfil de alta resolução com o objetivo de igualar a sua resolução vertical à resolução vertical do perfil de baixa resolução.

Neste trabalho, mostraremos que o tratamento dado ao perfil de alta resolução no domínio da frequência elimina a necessidade do prévio conhecimento das funções resposta vertical das ferramentas. A seguir, os perfis de alta resolução e alta resolução filtrado são comparados ao perfil de baixa resolução, onde uma análise estatística é aplicada em intervalos em torno de cada ponto dos perfis. Por meio desta análise, são obtidas informações sobre a correlação entre os perfis de alta e baixa resolução vertical. Esta correlação é avaliada através do coeficiente de correlação, sendo que esta avaliação determinará o grau de correção a ser efetuada em cada ponto do perfil de baixa resolução. Esta metodologia oferece muitas vantagens, dentre as quais podemos destacar:

- Dispensa o conhecimento prévio das funções resposta vertical das ferramentas.
- Os perfis de baixa resolução vertical podem ser melhorados utilizando-se perfis de alta resolução vertical de propriedades petrofísicas diferentes.
- Eventos não correlacionáveis, i.e., ruídos, invasão e dados mau condicionados, que possam ocorrer nos perfis de alta resolução, são filtrados durante o processo de aplicação do filtro e da regressão linear.
- Não é necessário calibrar as medidas do perfil de alta resolução em relação às medidas do perfil de baixa resolução.

2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 PERFILAGEM DE POÇO

Podemos definir o termo *perfilagem de poço* como sendo o processo ou o conjunto de procedimentos pelo qual se pode obter um registro das características das rochas das formações atravessadas por um poço aberto. Estas características abrangem desde a mineralogia das rochas às propriedades físicas tais como resistividade e densidade. Estes registros são chamados de perfis de poço, constituindo, segundo muitos geólogos e geofísicos, a assinatura da rocha, visto que estas características são consequências de eventos e condições físicas, químicas e biológicas de épocas passadas (SERRA, 1984).

O primeiro serviço de perfilagem foi realizado em 1927 pelos irmãos Conrad e Marcel Schlumberger em um poço do campo francês de Pechelbronn. Para este poço, foram obtidas medidas de resistividade. Posteriormente, tivemos o aparecimento de uma ferramenta para medir condutividade baseada no princípio de indução eletromagnética (DOLL, 1949). Desde então, a perfilagem de poço foi se desenvolvendo, impulsionada pela pesquisa do petróleo; e atualmente, existe uma enorme variedade de ferramentas que são capazes de medir várias propriedades físicas ao mesmo tempo. Também a maneira como se obtém o registro dos parâmetros petrofísicos evoluiu, passando a ser feita por sondas multisensores que enviam os sinais para a superfície através de sistemas telemétricos. Uma vez na superfície, estes registros são armazenados e processados por computadores dentro de sofisticados caminhões laboratório. O resultado final da perfilagem é o perfil de poço, impresso em papel com formato adequado ou registrado em fita para posterior estudo em estações de trabalho.

A perfilagem de poço pode ser feita durante a perfuração, em poço aberto, após a perfuração e em poço revestido, i.e., com a parede revestida por cimento e tubulação de ferro. De qualquer forma, a perfilagem de poço é de fundamental importância para que possamos efetuar desde a avaliação de formações à avaliação de completação, onde procedemos na identificação de litologias, cálculo de parâmetros petrofísicos, estimativas de reservas, dentre outros.

2.2 CAMADAS FINAS E RESERVATÓRIOS LAMINARES

Não existe a priori uma definição padrão do que seja uma camada fina. Podemos definir camada fina como sendo aquela cuja espessura é de tal ordem que as ferramentas de perfilagem não conseguem efetuar uma medida confiável da propriedade petrofísica. Por outro lado, certos autores preferem uma definição em termos numéricos, i.e., camada fina é aquela cuja espessura varia em torno de cinco a sessenta centímetros (SERRA & ANDREANI, 1991). Para todos os efeitos, adotaremos a definição de ALLEN (1984), que define camada fina e/ou zonas laminares como sendo uma sequência de camadas de arenito, folhelho e arenito-argiloso alternados, sendo que a maioria delas possui espessura tão pequena que as ferramentas de perfilagem padrão não conseguem diferenciar a real variação das propriedades petrofísicas de cada uma. Se nestas sequências laminares, tivermos camadas saturadas com algum tipo de fluido, então, estas sequências passam a se chamar reservatórios laminares.

Reservatórios laminares ocorrem em várias partes do mundo. Como exemplo, podemos citar os campos ao longo da falha de Nesson ao norte de Dakota no Canadá, nas costas do Texas nos E.U.A. e na bacia de Potiguá no Rio Grande do Norte, Brasil. Geologicamente, a ocorrência de camadas finas é mais frequente nos seguintes tipos de ambientes:

- Turbiditos.
- Depósitos deltáicos.
- Depósitos de zonas de marés.
- Varvitos.
- Depósitos lacustrinos.
- Depósitos fluviais.

Estes depósitos possuem um alto potencial produtivo pois existe a ocorrência simultânea de rochas reservatório, rocha fonte e barreiras de permeabilidade, que facilitam o acúmulo de fluidos tais como água e óleo. Normalmente, a extensão destes reservatórios é grande o suficiente para garantir um alto volume de acumulação de hidrocarbonetos. A existência de zonas porosas e não porosas, dispostas alternadamente, também pode ser caracterizada como formações do tipo laminares ou camadas finas.

Uma análise de camadas finas implica em se obter soluções para os seguintes problemas (SERRA & ANDREANI, 1991):

- Determinação de litologias e a composição das mesmas.
- Localização de camadas porosas.
- Determinação da mineralogia.
- Cálculo da porosidade efetiva.
- Identificação do fluido.
- Determinação da saturação do fluido presente na formação .
- Estimativa da permeabilidade e produtividade.
- Espessura real e aparente das camadas

Tais problemas podem ser resolvidos valendo-se do uso de perfis de alta resolução , procedimentos de interpretação adaptados e/ou processamento de perfis.

As ferramentas de alta resolução são capazes de observar camadas com espessuras de até cinco milímetros. A ferramenta de varredura elétrica (FMS, marca da Schlumberger) é capaz de registrar camadas menores que um centímetro. Já a ferramenta de propagação eletromagnética (EPT) é sensível a camadas de até cinco centímetros. Embora as ferramentas de alta resolução possam detectar camadas muito finas, elas não resolvem sozinhas todos aqueles problemas anteriormente descritos. Por isso, um conjunto de perfis e uma análise integrada se fazem necessários a fim de obtermos respostas mais confiáveis.

Segundo ALLEN (1984), a existência de camadas finas pode ser apontada pelos seguintes indicativos:

- Os perfis SP e GR indicam uma formação argilosa através de suas variações .
- Perfil de porosidade ruidoso.
- Perfil de densidade é simétrico ao perfil neutrônico.
- Resistividade nas zonas de folhelho mais alta do que o normal, com variações .
- O perfil SFL apresenta muitos picos, indicando a presença de camadas finas de alta resistividade.
- Os perfis MSFL e EPT apresentam alto grau de atividade.

- Existência de curvas de resistividade rasa e profundas com separações maiores do que as observadas em folhelhos adjacentes, indicando zonas com permeabilidade e porosidade.

É importante ressaltar que as indicações acima auxiliam bastante, mas mesmo assim não são suficientes para se compor uma avaliação de formação segura frente a reservatórios laminares. Assim, manipulações nos perfis de baixa resolução passaram a fazer parte integrante deste processo, onde a maior ênfase é dada no sentido de melhorar a resolução vertical destes perfis, utilizando-se algoritmos computacionais como aqueles dos processos deconvolutivos.

2.3 RESOLUÇÃO VERTICAL

Sabemos que a espessura de uma camada pode ser um fator limitante na obtenção de uma medida precisa. Assim, a espessura mínima de uma camada na qual a ferramenta de perfilagem pode obter uma leitura verdadeira de uma determinada propriedade petrofísica é definida como *resolução vertical da ferramenta*. Na Tabela 2.1, podemos observar a relação entre espessura de camadas e as respectivas ferramentas apropriadas à observação destas. Embora a definição anterior de resolução vertical seja clara sob o ponto de vista literal,

Tabela 2.1 - Espessuras de camadas e ferramentas apropriadas (Adaptado de SERRA & ANDREANI, 1991)

<i>Menor camada (cm)</i>	<i>Ferramenta</i>
100	indução padrão
30	Laterais, Phasor, CNL
10	GR, Densidade, Sônico
3	MSFL, EPT, ERL, LDT
1	Dipmeter
0.3	FMS
0.1	Seção de testemunho

ela não nos fornece uma idéia quantitativa. Neste caso, uma definição matemática se torna necessária. Assim, temos definido o conceito de resolução vertical intrínseca, que é a distância, no eixo da profundidade, entre dois pontos simétricos em relação a metade do valor máximo da função resposta da ferramenta (Figura 2.1).

A resolução vertical intrínseca pode ser obtida de forma aproximada através da geometria da ferramenta. Por exemplo, nas ferramentas de indução, ela pode ser tomada pela distância

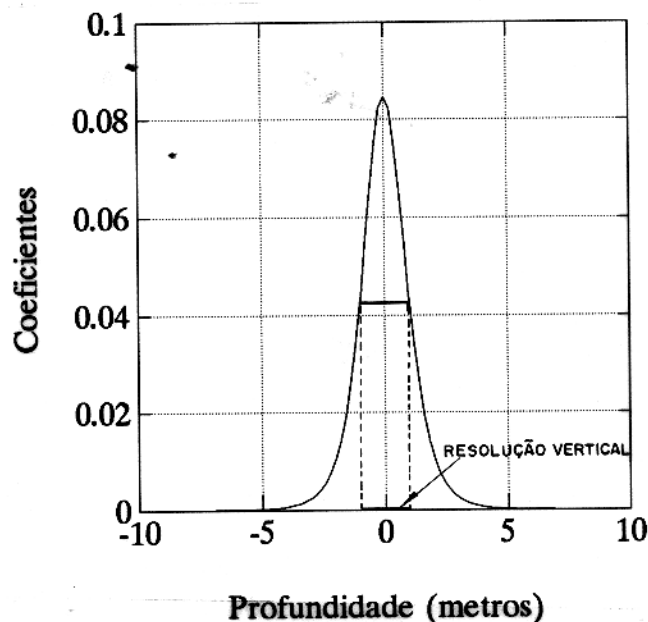


Figura 2.1 - Resolução vertical intrínseca da ferramenta, obtida a partir da função resposta vertical da ferramenta.

entre as bobinas emissoras e receptoras. Já nas ferramentas laterais, ela é obtida pelo espaçamento entre os eletrodos. O interessante é notar que ao aumentarmos o espaçamento entre os eletrodos; por exemplo, aumentamos a profundidade de investigação da ferramenta lateral, mas também comprometemos a sua resolução vertical. Diminuindo o espaçamento, temos um aumento na resolução vertical com uma conseqüente diminuição da profundidade de investigação. É por este motivo que as ferramentas de microresistividade, tal como a MSFL, lêem a zona invadida enquanto que a ferramenta ILD consegue ler a zona virgem.

Também podemos definir resolução vertical de uma ferramenta em termos qualitativos, i.e., a menor camada definida através de sua litologia, textura, porosidade e saturação, que pode ser diferenciada. A resolução vertical qualitativa pode em alguns casos exceder a resolução vertical intrínseca da ferramenta, mas somente esta é um fator limitante numa avaliação quantitativa de perfis.

Os perfis propriamente ditos também apresentam uma resolução vertical que é determinada pela resolução vertical intrínseca, pelo intervalo de amostragem e pela velocidade da ferramenta ao longo do poço. Quanto menor for a taxa de amostragem, menor será a resolução vertical do perfil (Tabela 2.2). Se a taxa de amostragem for tal que o intervalo entre cada amostra seja a metade da resolução vertical intrínseca da ferramenta, então, podemos afirmar que a resolução vertical do perfil se iguala à resolução vertical intrínseca.

Tabela 2.2 - RESOLUÇÕES VERTICAIS DE ALGUMAS FERRAMENTAS DE PERFILAGEM (Adaptado de SERRA & ANDREANI, 1991)

<i>Ferramenta</i>	<i>Resolução Vertical Intrínseca (cm)</i>	<i>Intervalo de Amostragem (cm)</i>	<i>Resolução Vertical do perfil (cm)</i>
EPT eatt	5.08	5.08	10.16
	5.08	1.016	5.08
MSFL	12.70	5.08	12.70
SFL	25.0	15.0	25.0
PHASOR	150.0	15.0	150.0
Dipmeter			
HDT	1.27	0.508	1.27
SHDT	1.27	0.508	1.27
FMS	0.513	0.254	0.513
GR	20.32	15.24	30.48
	30.38	15.24	30.48
SP	243.84	15.24	182.88
LDT	40.64	15.24	50.8
	40.64	5.08	40.64
CNL	50.8	15.24	60.96
	50.8	5.08	60.96

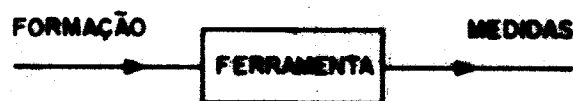


Figura 2.2 - Sistema linear que descreve o processo de obtenção de uma medida numa perfilagem.

2.4 FUNÇÃO RESPOSTA VERTICAL DA FERRAMENTA

As ferramentas de perfilagem não fazem uma medida pontual das propriedades petrofísicas das camadas. Na verdade, o sinal gerado por uma ferramenta pode ser considerado como uma média ponderada das propriedades petrofísicas contidas num dado volume de rocha observado (PETROBRÁS, 1991). A função peso utilizada nesta média é chamada de *função resposta vertical da ferramenta* e é descrita pela integral abaixo:

$$W(z) = \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} W(z, r, \theta) d\theta dr, \quad (2.1)$$

onde $W(z, r, \theta)$ define o suporte de medida, i.e., o volume de investigação da ferramenta; $W(z)$ é a função resposta vertical da ferramenta e z é a direção do eixo do poço.

As medidas obtidas de uma perfilagem podem ser consideradas como uma operação linear. Dada uma entrada C_n (distribuição das propriedades petrofísicas), teremos uma saída l_n (medidas da ferramenta) descrita na forma mostrada na Figura 2.2. A operação mostrada na Figura 2.2 é definida matematicamente pela equação (2.2) e é denominada de *convolução*

$$l_n = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} W_m C_{n-m}. \quad (2.2)$$

Observando a equação (2.2), W_m é a resposta vertical da ferramenta, i.e., a função peso definida na equação (2.1). Neste caso, a operação está na forma discretizada, pois o sinal



Figura 2.3 - Função resposta vertical como resposta do sistema ao impulso.

obtido numa perfilagem não é uma função na forma contínua. Ela é, na realidade, amostrada ponto a ponto, a um intervalo fixo. W_m também é descrita como a resposta do sistema a uma função impulso (Figura 2.3). A função impulso é definida por :

$$\sigma(z) \neq 0 \text{ somente se } z = 0, \quad (2.3)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(z) dz = 1. \quad (2.4)$$

Assim, se $W(z)$ for a função que descreve o sistema em questão, teremos por (2.3) e (2.4):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(z - a) W(z) dz = W(a). \quad (2.5)$$

Voltando à equação (2.2), temos que W_m é a função resposta vertical da ferramenta num sistema linear invariante com a profundidade. Em geral, W_m é um operador simétrico com uma banda positiva e outra negativa, centrada em W_0 . Isto ocorre devido ao fato da ferramenta ser sensível à formação presente acima e abaixo do ponto de medida.

Segundo NOSAL (1983), uma função W_m pode ser chamada de função resposta se ela obedecer a três axiomas básicos:

1. A área compreendida pela função W_m é unitária:

$$\int_{m=-\infty}^{+\infty} W_m = 1. \quad (2.6)$$

2. A função é simétrica em relação a seu centro:

$$W_m = W_{-m}. \quad (2.7)$$

3. O maior peso da função resposta deve estar em seu centro:

$$W_0 > W_m \forall m \neq 0. \quad (2.8)$$

A equação (2.6) reflete a obrigatoriedade da ferramenta em medir o valor real da propriedade petrofísica frente a uma camada espessa. Em outras palavras, quando a ferramenta está posicionada frente ao centro desta camada, ela "enxergará" um meio homogêneo e uniforme. Para que isto ocorra, é necessário que a espessura desta camada seja maior do que a resolução vertical da ferramenta.

A equação (2.7) faz com que as medidas sejam invariantes com relação a direção do movimento da ferramenta, ou seja, tanto faz a ferramenta subir ou descer ao longo do poço, que as medidas obtidas serão as mesmas.

Finalmente, a equação (2.8) faz com que a ferramenta atribua maior peso exatamente no ponto de medida, minimizando a influência das porções adjacentes acima e abaixo deste ponto.

Embora o modelo adotado por NOSAL (1983) seja uma aproximação razoável para o comportamento da função resposta vertical para uma ferramenta, sabemos que é muito difícil verificar uma interação linear entre a ferramenta e uma formação real. Como exemplo, podemos citar as ferramentas de resistividade, onde a resposta vertical é função da própria resistividade da formação. Assim, podemos afirmar que o processo de obtenção das medidas de resistividade não se constitui num sistema linear invariante com a profundidade (LOOYESTIJN, 1982). A Figura 2.4 mostra um exemplo de uma função resposta vertical não linear, relativa à ferramenta de indução eletromagnética (THADANI & MERCHANT, 1982).

Um bom exemplo de interação linear entre ferramenta e meio, pode ser observado nas medidas de tempo de trânsito obtidas pelas ferramentas sônicas. Segundo Striping apud LOOYESTIJN (1982), o tempo de trânsito de uma determinada formação é obtido pela integral do tempo de trânsito sobre todas as camadas atravessadas pela ferramenta. Por isto, a resposta da ferramenta sônica ao impulso é uma função do tipo *caixa* (Figura 2.5).

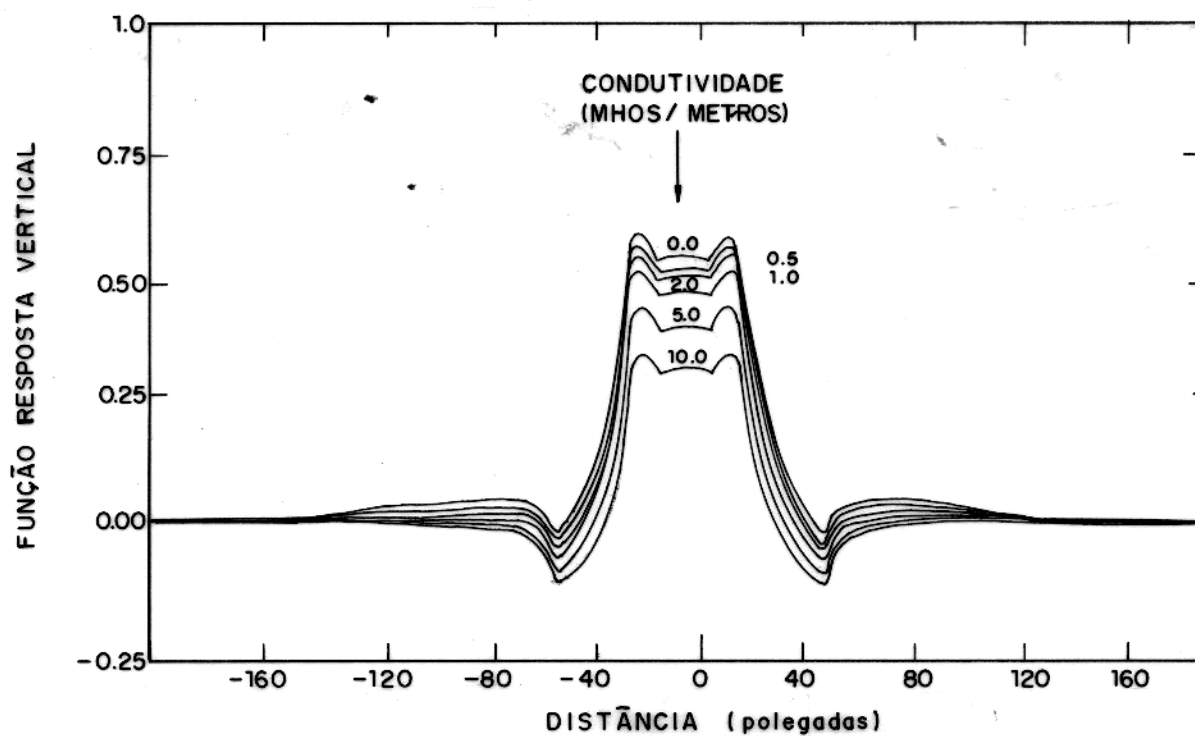


Figura 2.4 - Função resposta vertical da ferramenta de indução (Extraído de THADANI & MERCHANT, 1982).

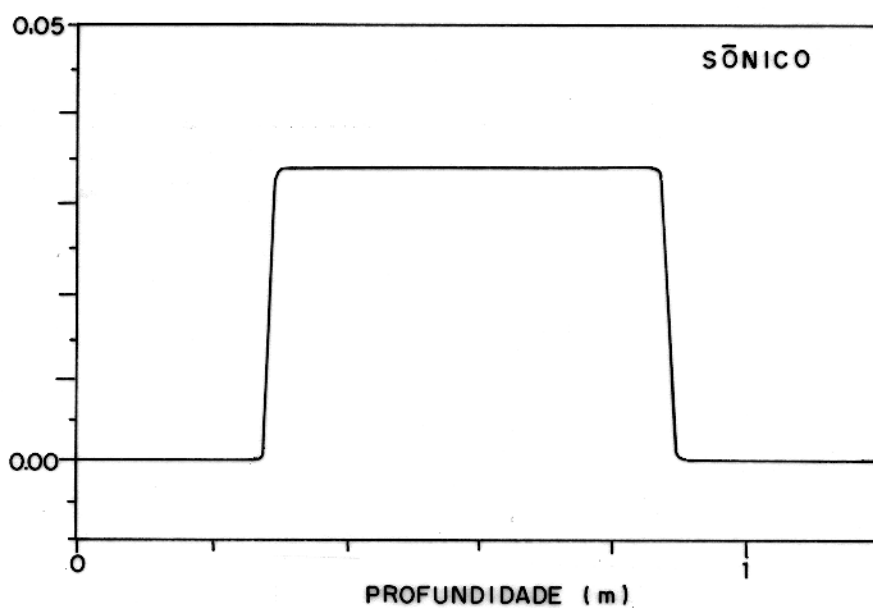


Figura 2.5 - Função resposta vertical da ferramenta sônica (Extraído de LOOYES-TIJN, 1982).

2.5 A FERRAMENTA DE INDUÇÃO

A ferramenta de indução eletromagnética foi originalmente desenvolvida para medir a condutividade (inverso da resistividade) da formação em poços não revestidos e perfurados com lama à base de óleo e/ou ar. As ferramentas que usam eletrodos não funcionam em lamas não condutivas.

Experiências recentes têm demonstrado que os perfis de indução oferecem muitas vantagens sobre a maioria dos outros perfis de ferramentas baseadas em eletrodos, quando usados em poços perfurados com lama baseada em água e/ou óleo. A ferramenta de indução foi projetada de modo a ter uma grande profundidade de investigação, minimizando assim os chamados efeitos de poço e a influência da zona invadida (SCHLUMBERGER, 1989b).

2.5.1 Generalidades

A ferramenta de indução é o resultado da adaptação, desenvolvimento e evolução de um dispositivo usado inicialmente como detector de minas por Doll apud ANDERSON et al.(1988), então engenheiro chefe da Schlumberger. Doll apud ANDERSON et al.(1988) percebeu que tal dispositivo podia ser utilizado para medir a condutividade da formação em poços perfurados com lama à base de óleo. Já em 1949, três anos depois de suas primeiras experiências, o primeiro perfil de indução foi obtido no Texas, iniciando assim a utilização da ferramenta de indução pela indústria (DOLL, 1949).

2.5.2 A Física

Observando a Figura 2.6, vemos que o oscilador produz uma corrente alternada de alta frequência na bobina emissora. Isto faz com que apareça um campo eletromagnético, que por sua vez induz laços de correntes coaxiais e horizontais que rodeiam a formação. Cada um destes laços de corrente gera o seu próprio campo eletromagnético. O campo total resultante é detectado pela bobina receptora e a força eletromotriz resultante é proporcional ao fluxo magnético. Como a corrente da bobina tem amplitude e frequência constantes, a intensidade das correntes de Foucault induzidas na formação é proporcional a condutividade, e assim também é a força eletromotriz induzida na bobina receptora.

A corrente na bobina receptora, chamada de sinal R está 180° fora de fase em relação à corrente emissora. Por outro lado, o acoplamento indutivo entre as duas bobinas produz uma corrente na bobina receptora, chamada de sinal X , que está 90° fora de fase. Desta

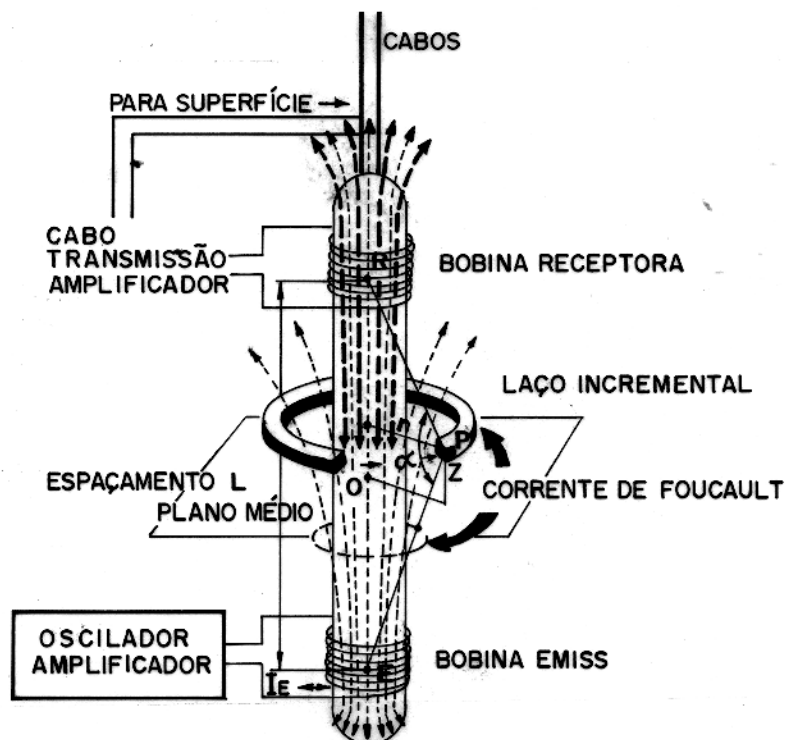


Figura 2.6 - Princípio operacional da ferramenta de indução (Extraído de SERRA, 1984).

forma, um detetor de fase é usado para separar o sinal indesejável, i.e., o sinal X . A Figura 2.7 mostra os sinais R e X .

2.5.3 O Fator Geométrico

No item 2.4, foi feito um breve estudo sobre as chamadas funções respostas verticais das ferramentas de perfilagem. A teoria do fator geométrico foi a primeira aproximação a ser proposta sobre a resposta da ferramenta, considerando o caso da ferramenta estar perfeitamente centralizada frente a uma formação homogênea, isotrópica e de extensão infinita (SERRA, 1984).

Desprezando os efeitos da indutância mútua dos laços de correntes axiais, o sinal gerado por cada um destes laços elementares será proporcional às suas condutividades, ponderados segundo um fator geométrico que depende da posição do laço relativamente à ferramenta. Assim, temos

$$e = kgc, \quad (2.9)$$

onde e é a força eletromotriz na bobina emissora, g é o fator geométrico para cada laço elementar, c é a condutividade e k é uma constante relacionada com a sonda, dada por:

$$k = \frac{\pi \mu^2 f^2 I_E S_E S_R n_E n_R}{L}, \quad (2.10)$$

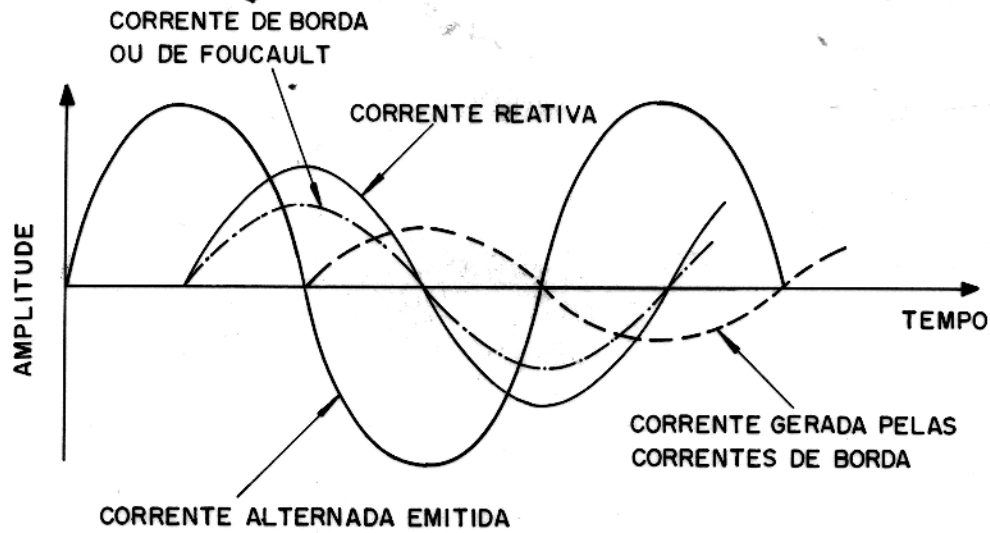


Figura 2.7 - Sinais gerados nas bobinas emissora e receptoras (Adaptado de SER-RA, 1984).

onde f é a frequência da corrente emissora, I_E é a intensidade da corrente emissora, L é o espaçamento entre as bobinas, S_E é a área ocupada por um laço da bobina emissora, S_R é a área ocupada por um laço da bobina receptora, n_E é o número de espiras da bobina emissora, n_R é o número de espiras da bobina receptora e μ é a permeabilidade magnética da formação. Já o fator geométrico g pode ser expresso em função da fase entre os sinais, ou seja

$$g = \frac{\sin^3 \alpha}{2L^2}, \quad (2.11)$$

onde α é o ângulo que descreve a posição de cada laço.

Uma forma mais interessante de expressar o fator geométrico é em termos de raio e distância em relação ao centro da linha que liga as bobinas emissora e receptoras,

$$g = \frac{L}{2} \frac{r^3}{\left[r^2 + \left(\frac{L}{2} - z \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \left[r^2 + \left(\frac{L}{2} + z \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.12)$$

onde r é a distância relativa ao plano que passa pelo ponto médio da distância entre as bobinas emissoras e receptoras.

A equação (2.9) mostra a força eletromotriz induzida por um único laço. Para se obter o sinal total gerado, é necessário efetuar a integração de e em relação a r e z ,

$$e_T = k \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} g c d r d z. \quad (2.13)$$

Para o caso em que tivermos zonas com diferentes condutividades, podemos aplicar o princípio da superposição sobre a solução da equação (2.13), resultando em

$$e_T = k[c_A G_A + c_B G_B + \dots], \quad (2.14)$$

onde $G_A, G_B \dots$ são denominados de fatores geométricos integrados, sendo obtidos pela integral,

$$G_R = \int \int_R g dr dz \quad (2.15)$$

onde R são as regiões $A, B, \dots$ com suas respectivas condutividade. O valor de G depende basicamente da posição e da direção de cada região condutiva. Na verdade, G representa a fração de contribuição de cada zona para a composição do sinal total. Desta forma, a condutividade aparente total é expressa da seguinte forma:

$$c_a = \frac{e_T}{k} = c_A G_A + c_B G_B + \dots \quad (2.16)$$

A equação (2.16) nada mais é do que uma convolução e é interessante notar que a soma dos fatores $G_A, G_B, \dots$ é igual a unidade,

$$G_A + G_B + \dots = 1. \quad (2.17)$$

Observando a equação (2.15), notamos que o fator geométrico integrado pode ser subdivididos em dois outros fatores; um radial e outro longitudinal. O fator geométrico radial leva em consideração a influência de cada zona no sentido radial, i.e., penetrando pelo interior da formação (Figura 2.8). Por este motivo, o fator geométrico radial é responsável pela profundidade de investigação da ferramenta. Já o fator geométrico longitudinal é responsável pelo peso de cada zona em termos de distância vertical, por isto ele é responsável pela resolução vertical da ferramenta. Como o nosso interesse repousa no fator geométrico vertical, é necessário efetuar a integração de g da seguinte forma:

$$G_z = \int_{r=0}^{r=+\infty} g dr. \quad (2.18)$$

Após algumas manipulações , o resultado da equação (2.18) é dado por:

$$G_z = \begin{cases} \frac{1}{2L} & \text{para } -\frac{L}{2} < z < +\frac{L}{2}; \\ \frac{L}{8z^2} & \text{para } z < -\frac{L}{2}. \end{cases} \quad (2.19)$$

O resultado (2.19) pode ser observado na Figura 2.9 e representa o fator geométrico vertical para uma sonda de duas bobinas. Para sondas com mais bobinas, é necessário apenas aplicar a equação (2.19) para cada conjunto de bobinas emissora-receptora e somar os resultados.

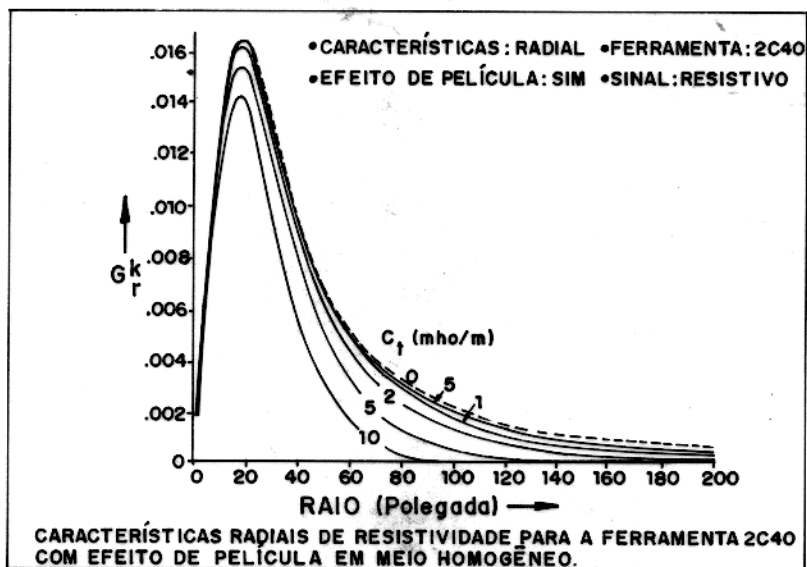


Figura 2.8 - Fator geométrico radial em função do raio (Extraído de SERRA, 1984).

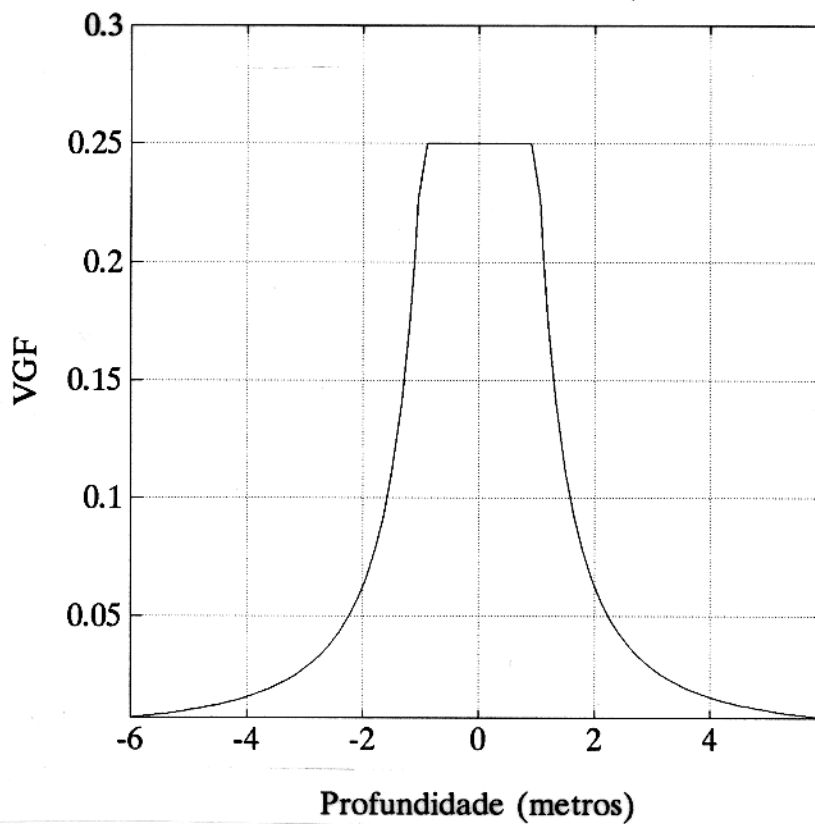


Figura 2.9 - Fator geométrico vertical para sonda de indução com duas bobinas.

2.5.4 Limitações

Doll apud ANDERSON et al.(1988) tentou explicar a resposta da ferramenta de indução através da teoria do fator geométrico. A teoria funciona satisfatoriamente para condutividades baixas, mas ela falha frente às formações de alta condutividade devido a vários fatores que foram desprezados na confecção da teoria. Por exemplo, as interações eletromagnéticas entre as correntes de borda que fluem na vizinhança de cada laço foram desprezadas. Doll apud ANDERSON et al.(1988) também não levou em consideração as perdas resistivas em cada laço, além de supor que os campos eletromagnéticos formam-se instantaneamente. Estes fenômenos reduzem a força eletromotriz induzida, principalmente em ambientes de alta condutividade. Esta redução é denominada de efeito de película (SKIN EFFECT). Este termo é bastante conhecido na engenharia elétrica e é a designação de um fenômeno que ocorre em condutores metálicos, em que correntes alternadas de altas frequências tendem a se propagarem pela borda do condutor (ANDERSON et al., 1988).

Um outro problema da ferramenta de indução é o efeito de borda (SHOULDER-BEFFECT) que ocorre quando a ferramenta se encontra frente a uma camada fina altamente resistiva. Neste caso, a força eletromotriz induzida é fortemente influenciada pelas correntes de borda nas camadas adjacentes mais condutivas, diminuindo assim as correntes no interior da camada de interesse. A Figura 2.10 mostra de uma forma muito clara este tipo de efeito, onde a resistividade medida é da ordem de 22 ohmm enquanto que a resistividade verdadeira da formação é de 100 ohmm (SHEN, 1988).

2.5.5 As Ferramentas de Indução Disponíveis

Durante mais de vinte e cinco anos, a indução tem sido a ferramenta de resistividade mais utilizada em poços com formações de média e baixa resistividade, perfurados com lama à base de água doce, óleo ou ar. Durante este período, muitas ferramentas baseadas no princípio de indução foram desenvolvidas (SCHLUMBERGER, 1989b).

- A ferramenta 6FF40, que possui um dispositivo indutivo de 6 bobinas. Possui também um eletrodo SP.
- O sistema DIL-LL8, possuindo um dispositivo de indução para leituras profundas e outro para leituras médias, além do eletrodo SP e do dispositivo normal LL8.
- A ferramenta ISF, que inclui um dispositivo de indução profunda, um SFL e um eletrodo SP.

- A ferramenta DIL-SFL, incluindo um dispositivo de indução profunda, um de indução média, um SFL e um eletrodo SP.
- A ferramenta PHASOR, que inclui um dispositivo de indução profunda, um de indução média, um SFL e um eletrodo SP. Pode operar com frequências entre 10 a 40KHz. Esta ferramenta também registra o sinal em quadratura X. Isto garante uma maior precisão na correção das medidas para o efeito de película.
- A ferramenta 6FF28, que é uma versão reduzida da ferramenta 6FF40.

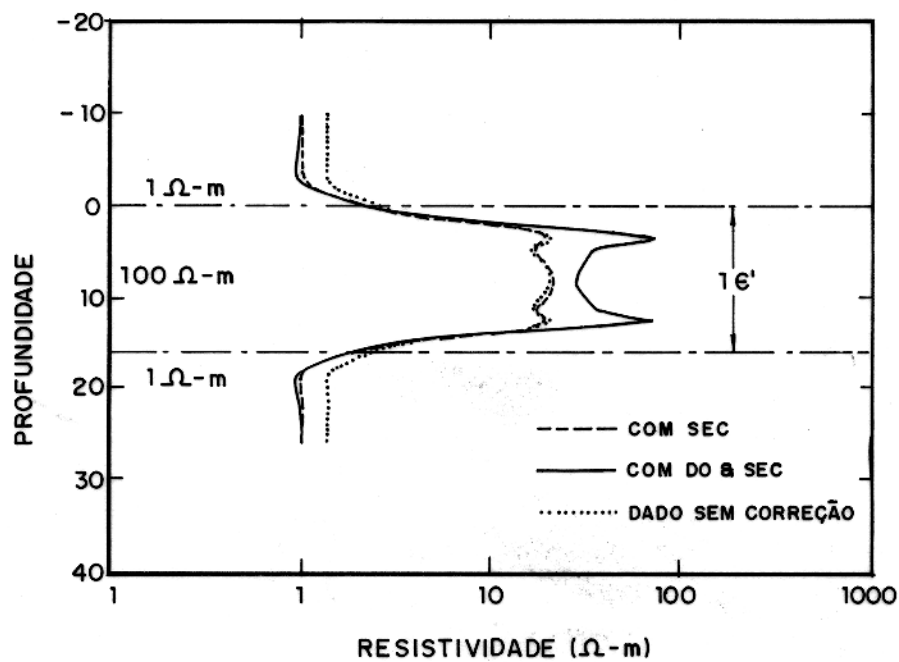


Figura 2.10 - Perfis de indução da ferramenta 6FF40 sobre uma camada de 4.16 metros. O perfil em linha pontilhada representa os dados sem nenhum tipo de correção. O perfil em linha tracejada representa os dados com correção para o efeito de película (adaptado de SHEN, 1988).

3 - MOTIVAÇÃO DO ESTUDO DA DECONVOLUÇÃO

A deconvolução de perfis é um problema clássico na perfilagem de poço. Atualmente, a maioria dos perfis ditos de baixa resolução vertical já passou por algum tipo de ajuste de sinal durante a fase de perfilagem, ou então irá sofrer algum outro tipo de tratamento a posteriori. Normalmente, a deconvolução é mais utilizada como um ajuste a posteriori, visando melhorar a resolução vertical dos perfis de baixa resolução.

Existem diversas maneiras de se tratar a deconvolução, mas de uma forma geral, podemos agrupá-las em duas correntes distintas: A primeira é a abordagem no domínio da frequência. A segunda abordagem trabalha no domínio do espaço, usando técnicas de otimização.

De uma maneira geral, a grande maioria das metodologias proposta para a operação da deconvolução precisa, de uma forma ou de outra, do conhecimento prévio da função resposta vertical das ferramentas. Esta necessidade esbarra na dificuldade de se obter uma resposta vertical única para todo perfil, devido a sua dependência com o parâmetro mensurado, a exemplo do indução profunda. Assim, muitos algoritmos lançam mão de simplificações excessivas e/ou técnicas de modelamento, que acabam por danificar os resultados finais. Desta forma, o objetivo deste trabalho está em **tratar a deconvolução, eliminando a necessidade de se conhecer previamente as funções resposta vertical das ferramentas.**

3.1 O MODELO CONVOLUCIONAL

A grande maioria dos perfis de poços são obtidos através de processos que produzem medidas aparentes e que não refletem, na maioria dos casos, as *propriedades petrofísicas verdadeiras da formação*. Tais medidas são obtidas pelas ferramentas através de uma média móvel ponderada dessas propriedades (BARBER, 1988).

A maneira como a ferramenta de indução (ID) mascara a condutividade da formação é muito bem conhecida (DOLL, 1949; GIANZERO & ANDERSON, 1982). Sem considerar o efeito de superfície (Skin Effect) e admitindo uma ferramenta de duas bobinas, a resposta vertical da ferramenta é dada pela teoria de DOLL (1949), conhecida como fator geométrico

vertical :

$$g(z) = \begin{cases} \frac{1}{2L} & \text{para } |z| \leq \frac{L}{2} \\ \frac{L}{8z^2} & \text{para } |z| > \frac{L}{2}. \end{cases} \quad (3.1)$$

A convolução de $g(z)$ com a função que descreve a condutividade real da formação (σ_R) produz a seguinte medida

$$\sigma(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(z - z') \sigma_R(z') dz', \quad (3.2)$$

onde z é o ponto de medida da ferramenta e z' representa as posições dos pontos adjacentes na formação que contribuem para a medida realizada em z . Em termos de dados discretizados, i.e., a forma real como as propriedades petrofísicas da formação são representadas, temos

$$\sigma_Z = \sum_{i=1}^N g_i \sigma_{R_{Z-i}}, \quad (3.3)$$

onde N é o número de coeficientes da função resposta vertical da ferramenta, i são os pontos adjacentes na formação que contribuem para a medida.

Desta forma, podemos perceber que a resolução vertical da ferramenta depende fundamentalmente do comportamento de $g(z)$.

Neste trabalho, iremos supor que as medidas de resistividades se dão através de um modelo convolucional, i.e, a medida real da propriedade petrofísica lida no perfil é o resultado da convolução entre a função resposta vertical da ferramenta com a distribuição verdadeira das propriedades petrofísicas da formação. Desta forma, se tivermos uma função $c(z)$, que representa uma distribuição ideal das propriedades petrofísicas de uma dada formação (Figura 3.1), e se tivermos as funções respostas verticais para as ferramentas de alta e baixa resolução $a(z)$ e $b(z)$ (Figura 3.2), então o valor real das medidas na zona de investigação rasa e profunda será dada pela operação $c(z) * a(z)$ e $c(z) * b(z)$, respectivamente (Figura 3.3).

3.2 A TRANSFORMADA DE FOURIER

Uma maneira útil de estudar o comportamento de um determinado sinal é através de seu espectro de frequência. No entanto, para obtermos este espectro é necessário efetuar uma transformação no sinal original. Esta transformação é feita através da aplicação de uma técnica matemática denominada de *transformada de Fourier*. Esta transformação representa, por exemplo, a passagem do domínio do espaço, no qual a função estaria originalmente definida, para o domínio da frequência.

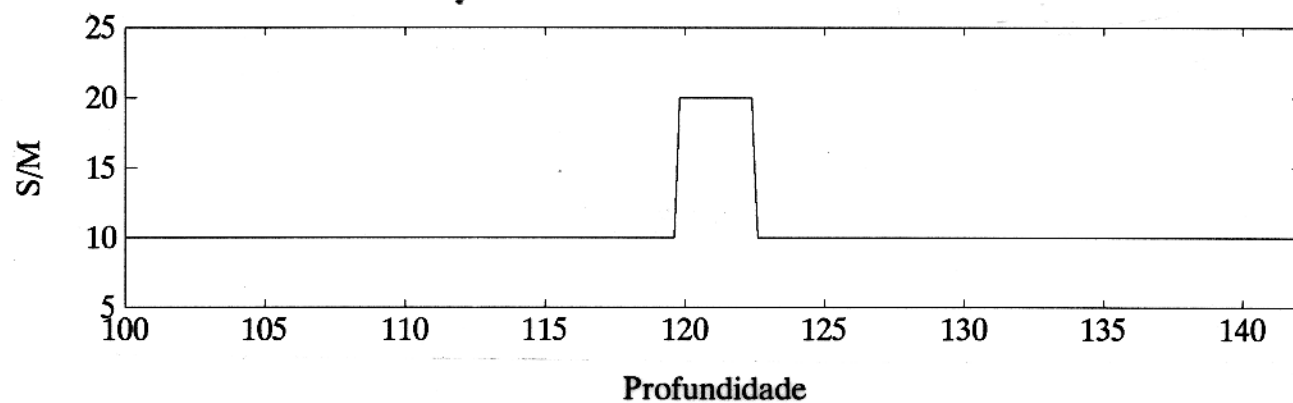


Figura 3.1 - Distribuição ideal de uma determinada propriedade petrofísica $c(z)$ em função da profundidade z .

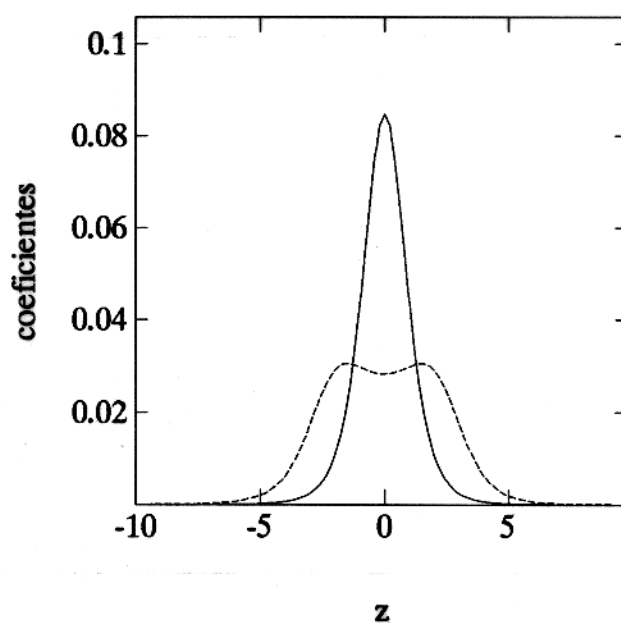


Figura 3.2 - Função resposta vertical para a ferramenta de alta resolução $a(z)$ (linha contínua) e a função resposta vertical para a ferramenta de baixa resolução $b(z)$ (linha tracejada).

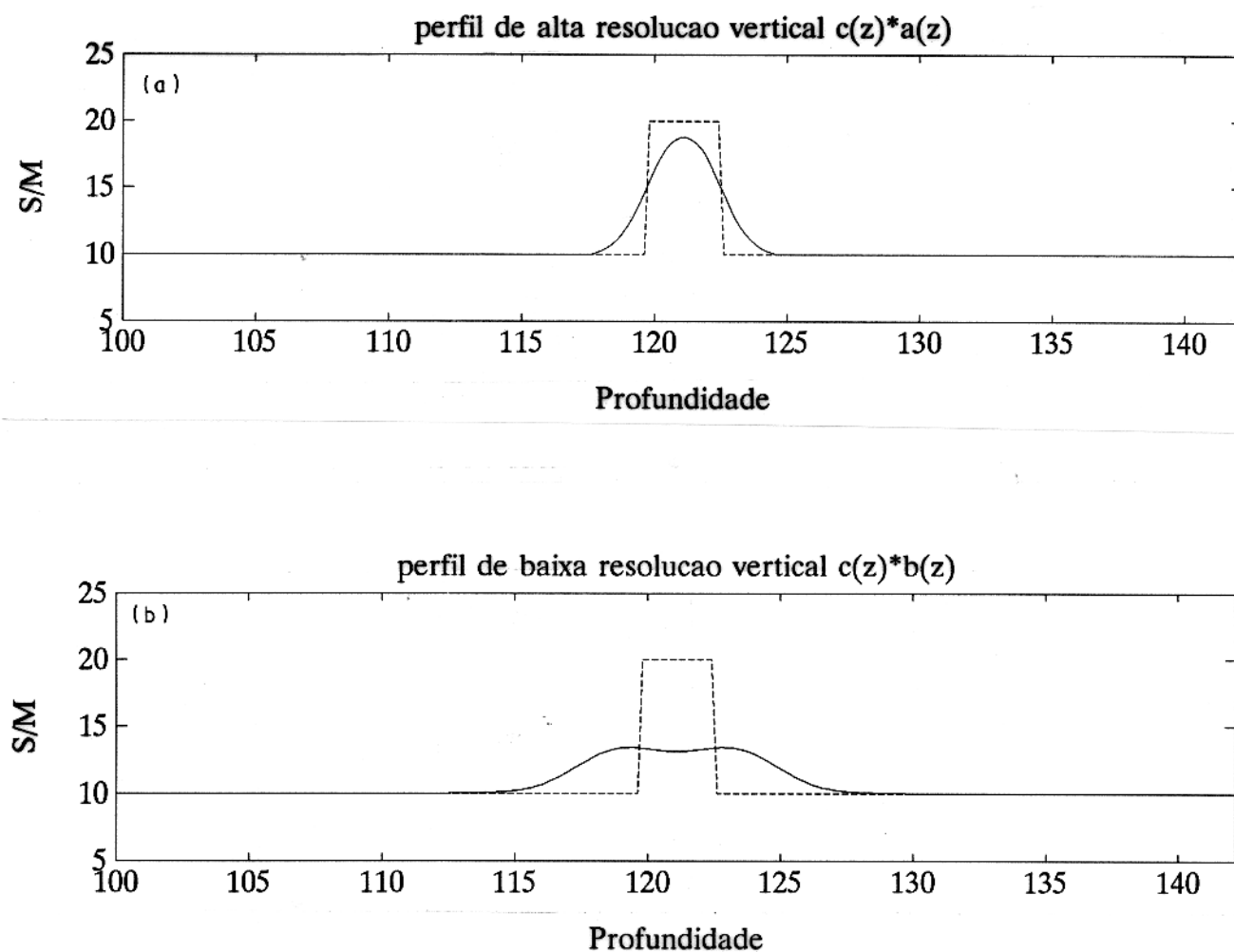


Figura 3.3 - Em a, temos o resultado de $c(z) * a(z)$ que é o valor real da medida na zona de investigação rasa, e em b, temos $c(z) * b(z)$ que é a medida real na zona de investigação profunda.

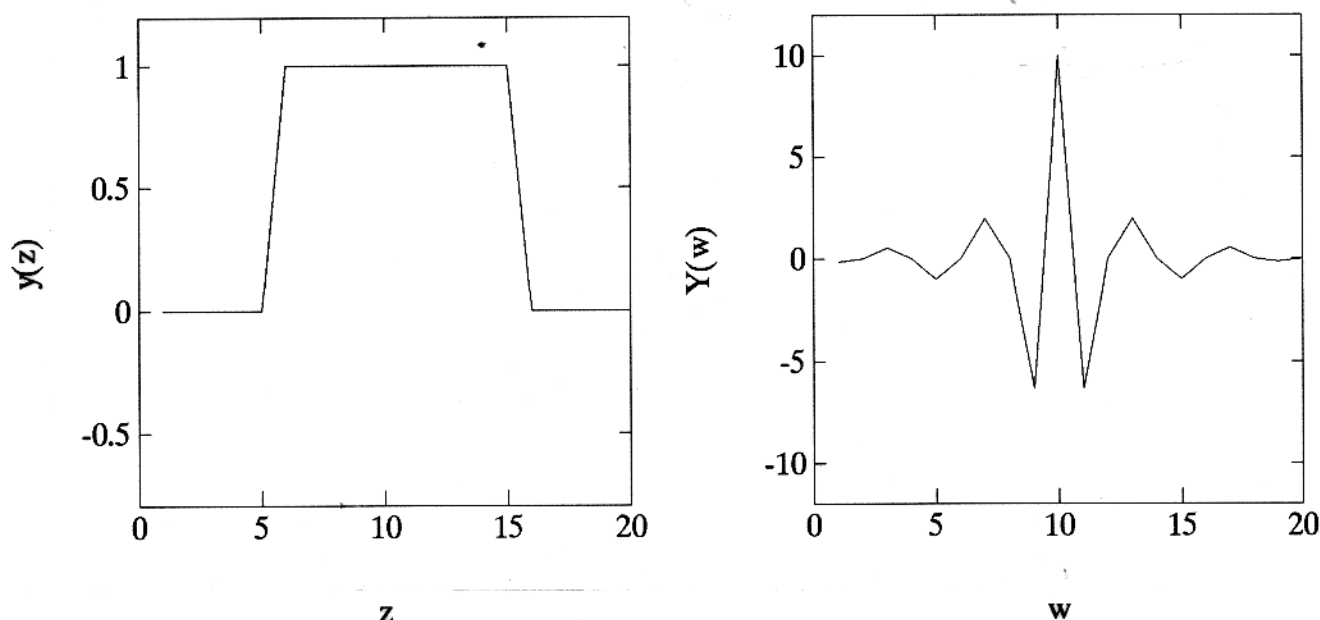


Figura 3.4 - Transformada de Fourier de uma função "caixa".

Os perfis de poços também podem ser trabalhados no domínio da frequência, mas para isto é necessário efetuar a transformação dos dados em profundidades para o domínio da frequência espacial, valendo-se do uso de operadores específicos. Assim, definimos o par de transformada de Fourier na forma contínua com sendo

$$Y(w) = a_1 \int_{-\infty}^{+\infty} y(z) e^{-jwz} dz \quad (3.4)$$

e

$$y(z) = a_2 \int_{-\infty}^{+\infty} Y(w) e^{jwz} dw, \quad (3.5)$$

para $w = 2\pi f$, onde $y(z)$ é uma função definida em todo intervalo real $R = (-\infty, +\infty)$, $Y(w)$ representa a função $y(z)$ no domínio da frequência espacial. Na Figura 3.4, temos um exemplo da aplicação da transformada de Fourier sobre uma função "caixa".

Como a transformada de Fourier de $y(z)$ é uma forma de representá-la como somatórios de senóides com diferentes frequências, notamos que é impossível diferenciar a frequência de cada uma destas senóides (Figura 3.4). Assim, é necessário considerar todas as frequências de $Y(w)$.

Não podemos obter, na prática, um sinal com uma amostragem infinita, por este motivo é necessário usarmos a transformada de Fourier na forma discretizada, i. e. ,

$$Y_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n e^{-i2\pi \frac{nm}{N}} \quad (3.6)$$

e

$$y_n = \sum_{m=0}^{N-1} Y_m e^{i2\pi \frac{nm}{N}}, \quad (3.7)$$

onde $n = \frac{z}{\Delta z}$ é a n -ésima amostra com espaçamento $\Delta z = \frac{z}{N}$ para N amostras, e $m = \frac{w}{\Delta w}$ é a m -ésima amostra com espaçamento $\Delta w = \frac{w}{N}$, também para N amostras.

Um dos problemas da transformada de Fourier é a amplificação de ruídos, assim como a impossibilidade de distinguirmos o ruído do sinal, no domínio da frequência; além do fato de que muitos algoritmos que efetuam a transformada de Fourier requerem um número de amostras como sendo múltiplo de dois. Existem diversos pacotes que fazem a transformada de Fourier, dentre os quais podemos destacar o MATLAB, que possui uma função denominada FFT (fast Fourier transform) que pode inclusive fazer a transformada de Fourier de uma função discretizada com um número de amostras diferente de um múltiplo de dois.

3.3 O TEOREMA DA CONVOLUÇÃO

Uma das vantagens de se trabalhar no domínio da frequência é a facilidade obtida no sentido de se efetuar operações com funções. Como exemplo, a convolução no domínio do espaço pode ser simplesmente reduzida à uma multiplicação no domínio da frequência. Esta simplicidade pode ser explicada pelo teorema da convolução, que afirma : "Se uma função $g(z)$ possui uma transformada de Fourier $G(w)$ e se uma outra função $\sigma(z)$ possui uma transformada de Fourier $\Sigma(w)$, então a transformada de Fourier da convolução de $g(z)$ com $\sigma(z)$ é igual ao produto de $G(w)$ por $\Sigma(w)$, ou seja,

$$g(z) * \sigma(z) \iff G(w)\Sigma(w). \quad (3.8)$$

A Figura 3.5 mostra graficamente o teorema da convolução. Neste exemplo, o resultado da convolução entre as funções caixa (a) e (b) resulta em (e), que por sua vez pode ser obtido pela transformada de Fourier inversa do produto das transformadas (c) e (d).

Uma aplicação do teorema da convolução é a suavização de curvas. No domínio do tempo/espaço esta operação envolveria a manipulação de matrizes, que computacionalmente

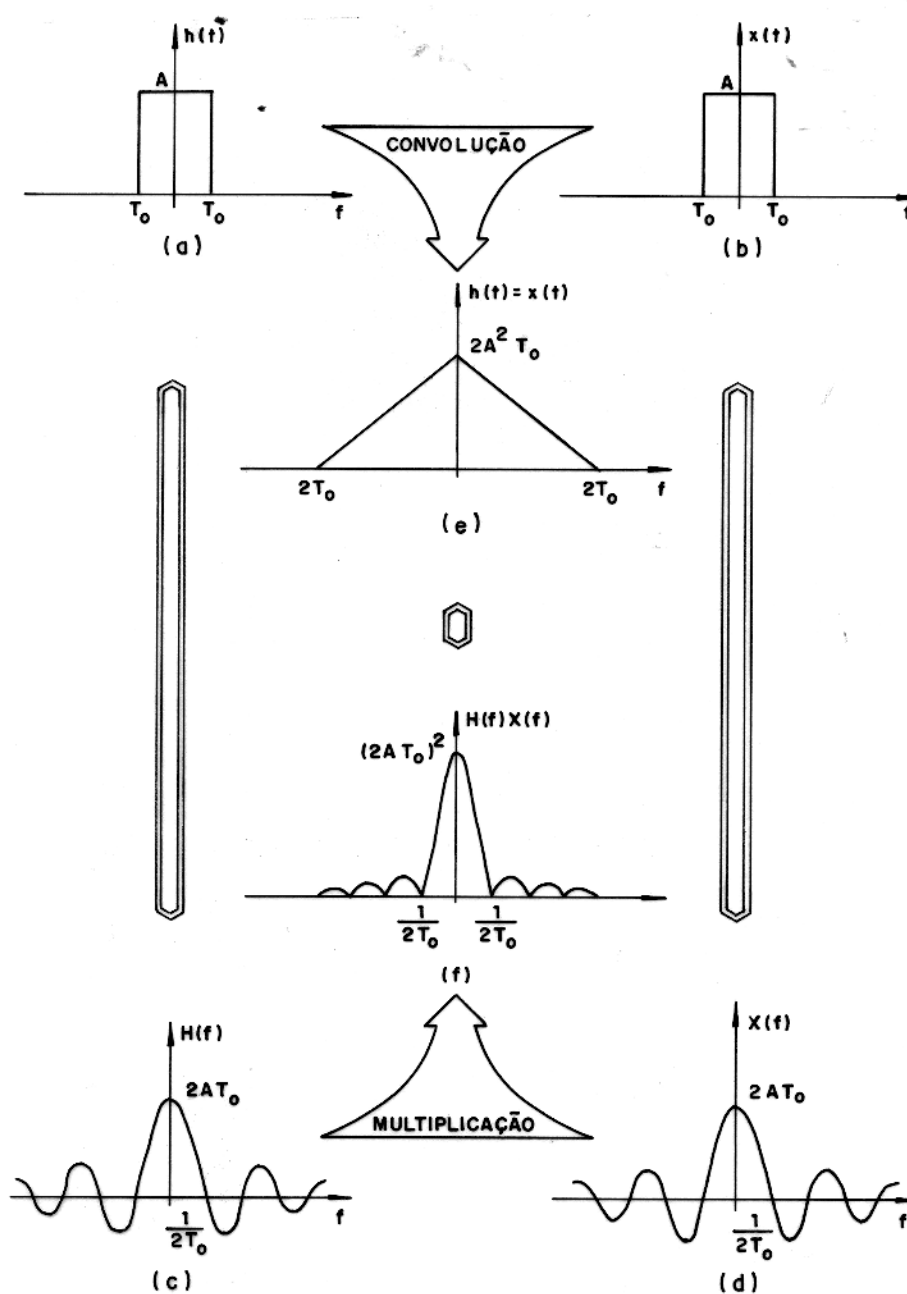


Figura 3.5 - Exemplo gráfico do teorema da convolução (Extraído de BRIGHAM, 1974).

está sujeita a instabilidades. Já no domínio da frequência a suavização envolveria apenas uma simples operação de multiplicação.

Uma outra aplicação óbvia do teorema da convolução é a deconvolução. Como exemplo, se $c(z)$ for a função que descreve a medida de condutividade de uma dada formação e se $g(z)$ for a função resposta vertical da ferramenta corrida nesta formação, e se ainda $\sigma(z)$ for a função distribuição de condutividade real desta formação, então $\sigma(z)$ poderia ser teoricamente recuperada bastando apenas o conhecimento de $c(z)$ e $g(z)$. Matematicamente, a recuperação de $\sigma(z)$ é feita da seguinte forma :

$$c(z) = g(z) * \sigma(z). \quad (3.9)$$

Aplicando o teorema da convolução, obtemos

$$C(w) = G(w)\Sigma(w). \quad (3.10)$$

Podemos então obter $\Sigma(w)$ fazendo

$$\Sigma(w) = \frac{C(w)}{G(w)}. \quad (3.11)$$

Aplicando a transformada de Fourier inversa sobre a divisão $\frac{C(w)}{G(w)}$, podemos recuperar $\sigma(z)$.

O problema da deconvolução seria extremamente simples se $G(w)$ fosse maior que zero para todas as frequências espaciais w . O problema é que $G(w)$ nem sempre está definida para todas as frequências de seu espectro, como é o caso da ferramenta de indução profunda, que simplesmente não responde a algumas frequências espaciais. Tais frequências são denominadas de frequências cegas (Figura 3.6). Como $G(w)$ é igual a zero nestas frequências, a deconvolução dada pela solução da equação (3.11) não pode ser efetuada.

3.4 O TEOREMA DE PARSEVAL

Em algumas situações é mais conveniente trabalharmos com a energia do sinal em vez de considerarmos somente o sinal propriamente dito. Desta forma, precisamos provar que a energia total de um dado sinal no domínio do espaço é igual a energia deste mesmo sinal no domínio da frequência. Assim, o teorema de PARSEVAL nos diz que

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |c(z)|^2 dz = \int_{-\infty}^{+\infty} |C(w)|^2 dw. \quad (3.12)$$

Para chegarmos ao resultado acima, devemos considerar a energia total de $c(z)$ dada por

$$e(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} |c(z)|^2 dz = \int_{-\infty}^{+\infty} c(z)c^*(z)dz, \quad (3.13)$$

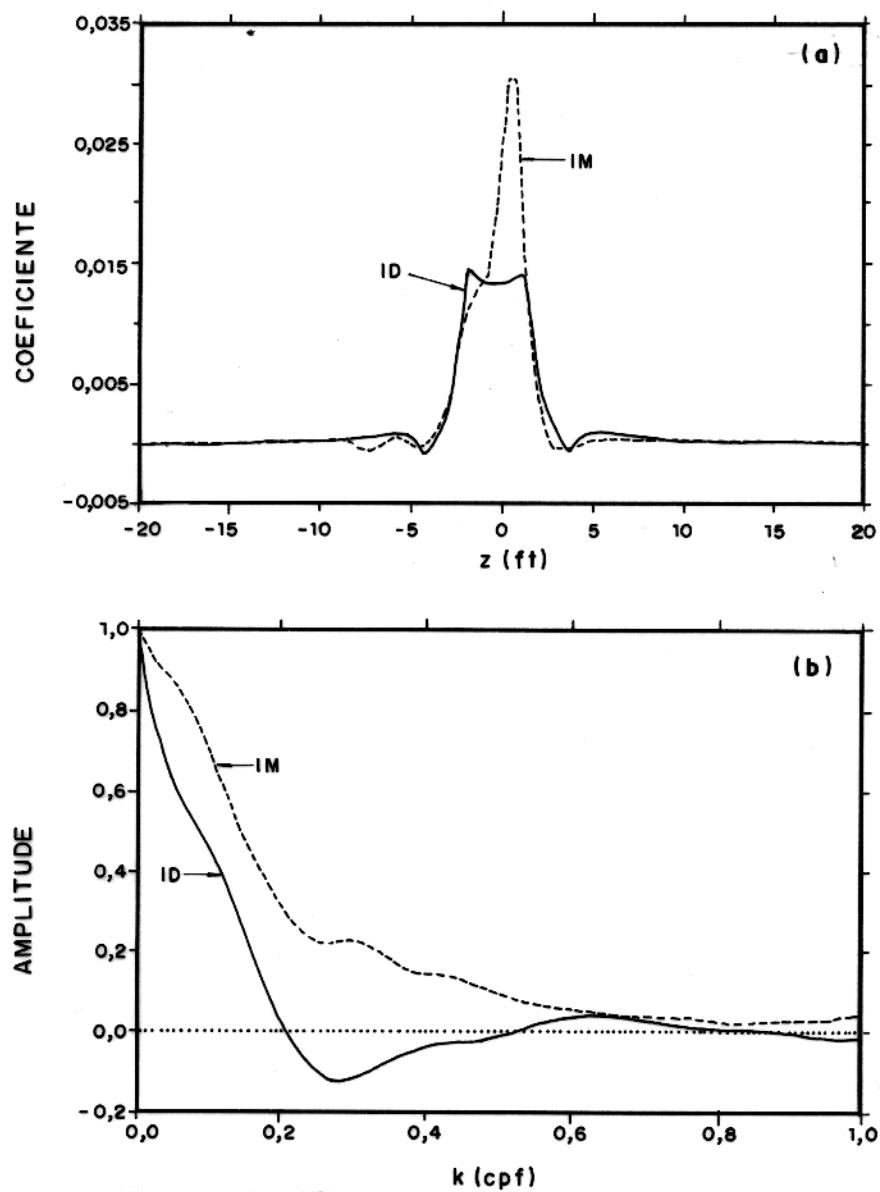


Figura 3.6 - Espectro de frequência (b) da função resposta vertical da ferramenta de indução rasa e profunda (a). Nota-se que os pontos em que a curva corta a abscissa x são as frequências cegas (Extraído de BARBER, 1988).

onde $c^*(z)$ corresponde ao conjugado complexo de $c(z)$. Por outro lado, a transformada de Fourier de $c(z)$ é dada por

$$E(w') = \int_{-\infty}^{+\infty} c(z)c^*(z)e^{-jw'z}dz. \quad (3.14)$$

Pelo teorema da convolução

$$\int_{-\infty}^{+\infty} c(z)c^*(z)e^{-jw'z}dz = C(w') * C^*(-w'). \quad (3.15)$$

Assim,

$$C(w') * C^*(-w') = \int_{-\infty}^{+\infty} C(w)C^*(w - w')dw. \quad (3.16)$$

Fazendo $w' = 0$, temos

$$\int_{-\infty}^{+\infty} c(z)c^*(z)e^{-jw'z}dz = \int_{-\infty}^{+\infty} C(w)C^*(w - w')dw = \int_{-\infty}^{+\infty} C(w)C^*(w)dw. \quad (3.17)$$

e finalmente,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} C(w)C^*(w)dw = \int_{-\infty}^{+\infty} |C(w)|^2 dw = \int_{-\infty}^{+\infty} c(z)c^*(z)e^{-jw'z}dz, \quad (3.18)$$

pois $C(w)C^*(w) = |C(w)|^2$.¹ Este resultado equivale a dizer que a energia total do sinal $c(z)$, no domínio da frequência, é igual a energia total da transformada de Fourier de $c(z)$.

A Figura 3.7 mostra claramente o teorema de PARSEVAL.

Sob o ponto de vista do tratamento de sinais, os perfis de poços possuem uma energia total que, segundo o teorema de PARSEVAL, é a mesma no domínio do espaço e no domínio da frequência. Assim, podemos teoricamente diminuir a energia de um perfil de alta resolução por meio de filtros, muito embora tais procedimentos envolvam cuidados adicionais no sentido de não se perder informações importantes.

¹Demonstração no APÊNDICE A

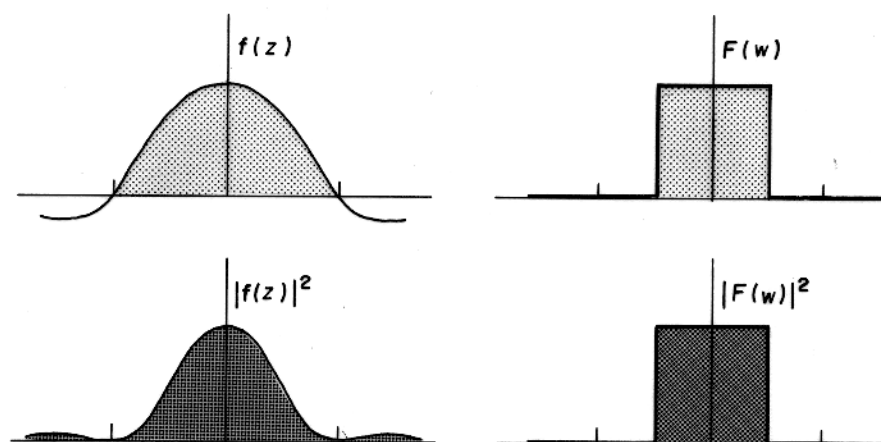


Figura 3.7 - Representação gráfica do teorema de Parseval (Extraído de BRIGHAM, 1974).

4 - METODOLOGIA

Nos capítulos anteriores, vimos que a maneira como uma ferramenta de perfilagem obtém uma medida pode ser descrita aproximadamente por um modelo convolucional. Assim, podemos realizar a deconvolução no domínio da frequência através de uma divisão. Porém, para que a deconvolução funcione corretamente, é necessário satisfazer duas condições: na primeira, a função resposta vertical da ferramenta deve ser única por todo o perfil. Na segunda, o filtro inverso deve ser estável, i.e., o espectro de frequência da função resposta vertical da ferramenta de baixa resolução não pode apresentar valores nulos ou próximos de zero. Nos perfis de resistividade/condutividade, notamos que as duas condições não são obedecidas. Por exemplo, os perfis de indução não possuem uma resposta vertical única; e o que é mais grave, o espectro da função resposta vertical do perfil de indução profunda (ID) possui frequências cegas. Assim, qualquer algoritmo que tente realizar a deconvolução usando as funções respostas verticais das ferramentas de indução irão esbarrar em um problema de estabilidade computacional.

A metodologia que apresentaremos a seguir combina um tratamento no domínio da frequência e um no domínio da profundidade. No domínio da frequência, obtemos um filtro que aplicado ao perfil de alta resolução vertical, produz um outro perfil calculado, com resolução vertical idêntica à resolução do perfil de baixa resolução vertical. **Este filtro é numericamente estável e único para cada perfil**, pois o uso do teorema de **PARSEVAL** para a obtenção de seus coeficientes dispensa o uso das funções resposta vertical, contornando assim o problema da falta de unicidade destas funções, bem como o problema das frequências cegas no ID. No domínio do espaço, um critério estatístico é usado para corrigir o perfil de baixa resolução ponto a ponto. Tal critério envolve um teste de dependência linear entre o perfil de baixa resolução vertical e o de alta resolução filtrado, para a escolha do melhor intervalo de correlação em torno de cada ponto a ser corrigido no perfil de baixa resolução vertical.

4.1 O PERFIL DE ALTA RESOLUÇÃO FILTRADO

O filtro pretendido terá como função ajustar a energia total do espectro de frequências do perfil de alta resolução vertical à energia espectral total do perfil de baixa resolução.

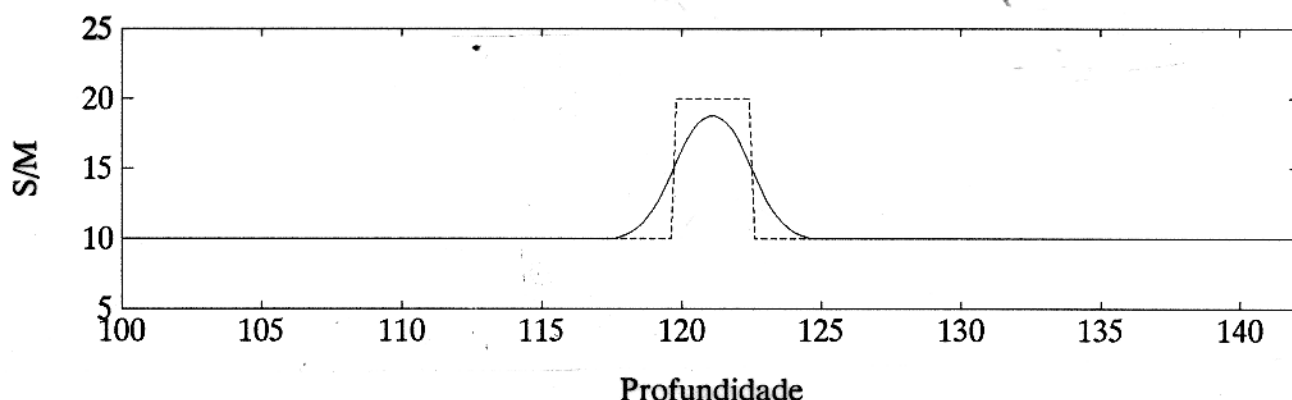


Figura 4.1 - Perfil de condutividades para a zona de investigação rasa. A linha contínua representa as medidas obtidas pela ferramenta, já a linha tracejada representa a distribuição ideal de condutividades.

Será demonstrado que a resolução vertical de uma determinada ferramenta está fortemente ligada à energia do sinal produzido por ela. Uma vez que a resolução vertical de um perfil está associada à sua energia espectral, o ajuste de energia produzido sobre o perfil de alta resolução também servirá como um ajuste de resolução vertical. Desta forma, a metodologia do ajuste de energia se constituirá numa maneira nova e mais eficiente de se obter um perfil de alta resolução filtrado que tenha a mesma resolução vertical que o perfil de baixa.

A medida de uma determinada propriedade, produzida por uma ferramenta de investigação rasa, pode ser obtida por

$$a(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(z - z') \bar{a}(z') dz', \quad (4.1)$$

onde $f(z)$ é a função resposta da ferramenta e $\bar{a}(z')$ é a função que representa o perfil ideal da propriedade petrofísica da zona de investigação rasa, medida em subsuperfície. A variável z representa a posição de medida da ferramenta, e z' as posições dos pontos adjacentes na formação que contribuem para a medida realizada em z . Na Figura 4.1, temos um exemplo de perfil de investigação rasa $a(z)$, que representa os valores de condutividades medidos por esta ferramenta, sobre uma formação hipotética dada pela distribuição de condutividades $\bar{a}(z)$. Pelo teorema da convolução, podemos escrever

$$A(w) = F(w) \bar{A}(w) \text{ ou } A = F \bar{A}, \quad (4.2)$$

onde $A(w)$, $F(w)$ e $\bar{A}(w)$ representam as transformadas de Fourier das funções $a(z)$, $f(z)$ e $\bar{a}(z)$, respectivamente. Por maior simplicidade, designaremos F , A e $\bar{A}$ como os vetores que

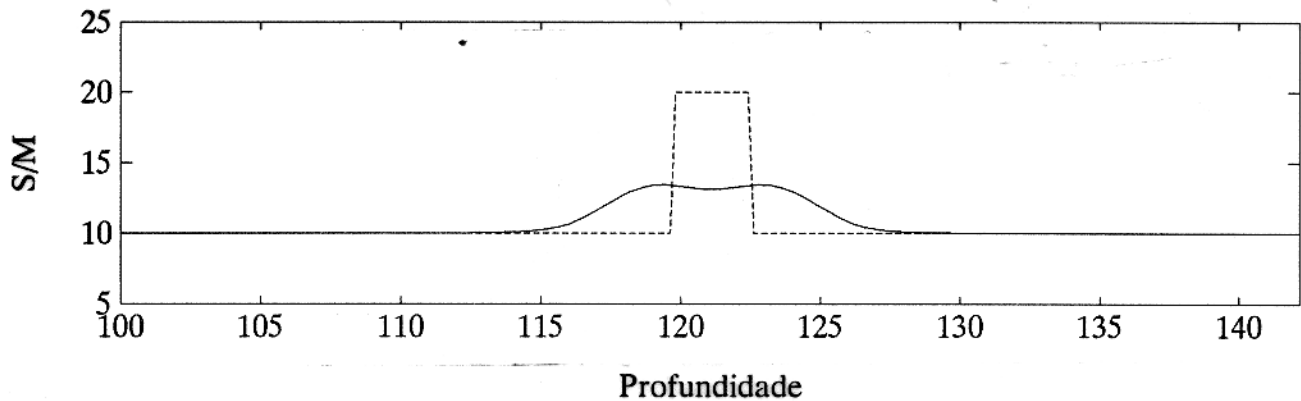


Figura 4.2 - Perfil de condutividades para a zona de investigação profunda. A linha contínua representa as medidas obtidas pela ferramenta, já a linha tracejada representa a distribuição ideal de condutividades.

armazenam os coeficientes de $F(w)$, as medidas do perfil de alta resolução $A(w)$ e as medidas da função distribuição $\bar{A}(w)$, respectivamente. Da mesma forma, podemos escrever a medida realizada por uma ferramenta de investigação profunda,

$$b(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(z - z') \bar{b}(z') dz', \quad (4.3)$$

onde $\bar{b}(z)$ é a função que representa o perfil ideal das propriedades petrofísicas da zona de investigação profunda, $g(z)$ representa a função resposta vertical da ferramenta. Na Figura 4.2, temos o perfil de investigação profunda $b(z)$, que representa os valores de condutividade $\bar{b}(z)$ da zona de investigação profunda de uma formação hipotética. Logo abaixo, temos as transformadas de Fourier $B(w)$, $G(w)$ e $\bar{B}(w)$ de $b(z)$, $g(z)$ e $\bar{b}(z)$, respectivamente.

$$B(w) = G(w)\bar{B}(w) \text{ ou } B = G\bar{B}, \quad (4.4)$$

onde, por maior simplicidade, designaremos G como sendo o vetor que armazena os coeficientes de $G(w)$, B e $\bar{B}$ como sendo os vetores que armazenam as medidas do perfil de baixa resolução $B(w)$ e da função distribuição $\bar{B}(w)$.

Inicialmente, desejamos analisar o comportamento de uma ferramenta de baixa resolução na zona de investigação rasa. Para isto, admitiremos que o perfil de alta resolução fornecerá uma distribuição aproximada das propriedades petrofísicas na zona de investigação rasa. Desta forma, a aplicação de um dado filtro $H(w)$, ao perfil de alta resolução $A(w)$, produzirá

um perfil $A_F(w)$ cuja resolução vertical é igual à resolução vertical do perfil de baixa resolução. Assim, pelo teorema da convolução, temos

$$A_F(w) = H(w)A(w) \text{ ou } A_F = HA \quad (4.5)$$

onde A_F e H são os vetores que armazenam as medidas do perfil de alta resolução filtrado $A_F(w)$ e os coeficientes do filtro $H(w)$, respectivamente. A operação mostrada na equação anterior será idêntica à convolução $h(z) * a(z)$, sendo que a_F refletirá as mudanças litológicas na zona de investigação rasa, sob o ponto de vista de uma ferramenta de baixa resolução. Se a parede do poço não apresentar problemas de rugosidade e desmoronamento, o perfil filtrado deverá apresentar o mesmo comportamento do perfil de baixa resolução. Desta forma, podemos afirmar que a informação de baixa resolução vem da mesma região investigada pela ferramenta de alta resolução, e assim podemos produzir um perfil de baixa resolução a partir do perfil de alta resolução.

Temos então que desenhar um filtro $h(z)$, que aplicado ao perfil de alta resolução, produza um perfil filtrado com a mesma resolução vertical do perfil de baixa resolução. No entanto, obter $h(z)$ no domínio do espaço significa resolver um sistema que estabeleça uma relação entre a função resposta vertical da ferramenta de baixa resolução e a função resposta vertical da ferramenta de alta resolução. Como partimos do princípio de que não temos o conhecimento destas funções, torna-se necessário obter uma forma nova e alternativa de filtragem. Assim, partiremos do conceito de energia dos sinais no domínio da frequência a fim de chegarmos ao perfil a_F , **dispondo apenas do conhecimento de a (perfil de alta resolução) e b (perfil de baixa resolução)**. Para tanto, utilizaremos o teorema de Parseval, que estabelece a igualdade da energia do sinal nos dois domínios, ou seja,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |a(z)|^2 dz = \int_{-\infty}^{+\infty} |A(w)|^2 dw. \quad (4.6)$$

Desejamos que este filtro torne a energia do perfil de alta resolução filtrado (E_{AF}) a mais próxima possível da energia do perfil de investigação profunda (E_B),

$$E_{AF} \cong E_B. \quad (4.7)$$

Assim,

$$|A_F|^2 = |B|^2 \quad (4.8)$$

onde $|A_F|$ e $|B|$ são as normas dos vetores complexos que armazenam as medidas dos perfis de alta resolução filtrado e baixa resolução, respectivamente. Como A_F é dado por

HA , temos então,

$$|HA|^2 = |B|^2 \quad (4.9)$$

que equivale a

$$[HA][HA]^* = |B|^2, \quad (4.10)$$

onde $[HA]^*$ significa o complexo conjugado de HA . Aplicando o princípio de comutatividade e distributividade das funções, a expressão acima pode ser escrita da seguinte forma:

$$HAH^*A^* = |B|^2, \quad (4.11)$$

que equivale a

$$A(HH^*)A^* = |B|^2. \quad (4.12)$$

Mas temos que a norma ao quadrado de H e A é dada por HH^* e AA^* , respectivamente. Assim,

$$A|H|^2A^* = |B|^2, \quad (4.13)$$

e que se reduz a

$$|H|^2|A|^2 = |B|^2, \quad (4.14)$$

de onde se pode obter o espectro de energia do filtro H :

$$|H|^2 = \frac{|B|^2}{|A|^2}. \quad (4.15)$$

Extraindo a raiz quadrada dos dois membros da expressão anterior, temos:

$$\sqrt{|H|^2} = \sqrt{\frac{|B|^2}{|A|^2}}. \quad (4.16)$$

Finalmente chegamos ao resultado

$$H = \frac{B}{A}. \quad (4.17)$$

Com o espectro de energia do filtro, podemos obter H e efetuar a operação HA que produzirá o perfil filtrado A_F . Uma vez que os perfis são considerados perfeitamente ajustados em profundidade e possuem a mesma taxa de amostragem, a informação de fase para o perfil filtrado é dispensável.

Mostraremos que o perfil filtrado possui a mesma resolução vertical que o perfil B . Da equação (4.5), sabemos que

$$A_F = HA. \quad (4.18)$$

Temos então, por (4.15), que

$$H^*H = \frac{B^*B}{A^*A} \Rightarrow H = \frac{B}{A} \quad (4.19)$$

onde H é o vetor com os coeficientes do filtro no domínio da frequência, logo, por (4.2) e (4.4),

$$H = \frac{G\bar{B}}{F\bar{A}}. \quad (4.20)$$

Nos trechos em que há boa correlação entre A e B , os dois perfis estarão realizando as mesmas medidas a uma mesma profundidade radial, ou seja,

$$\bar{B} \cong \bar{A}. \quad (4.21)$$

Assim, nos intervalos de correlação ótima, podemos simplificar a expressão (4.20),

$$H = \frac{G}{F}. \quad (4.22)$$

Como F é o espectro de frequências da função resposta vertical da ferramenta de investigação rasa, não há a existência de frequências cegas. Assim, a operação $\frac{G}{F}$ é possível e H é estável. Por outro lado H também é único, pois ele é obtido pelo ajuste da energia

espectral do perfil de alta resolução. Desta forma, o perfil de alta resolução filtrado é obtido pelo produto de H e A , ou seja,

$$A_F = HA. \quad (4.23)$$

De (4.2) e (4.22), temos que

$$A_F = \frac{G}{F} F \bar{A}, \quad (4.24)$$

e finalmente chegamos a

$$A_F = G \bar{A} \quad (4.25)$$

ou seja, assumindo que $\bar{A} \cong \bar{B}$, temos que $A_F \cong G \bar{B}$ e finalmente temos então $A_F \cong B$ para os intervalos de correlação ótima. Utilizando a transformada inversa de Fourier, obtemos A_F no domínio do espaço,

$$A_F(w) \Leftrightarrow a_F(z), \quad (4.26)$$

que equivale a

$$a_F(z) = g * \bar{a} \text{ ou } a_F(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(z - z') \bar{a}(z') dz'. \quad (4.27)$$

Observando as expressões (4.25) e (4.27), notamos que a filtragem do perfil A é equivalente ao produto de G por $\bar{A}$ ou a convolução $g * \bar{a}$, ou seja, a leitura que uma ferramenta de baixa resolução faria na zona de investigação rasa. Assim, a resolução vertical de a_F é igual a de b .

Assim, o resultado da filtragem da curva $a(z)$ de investigação rasa mostrada na Figura 4.1 pode ser observada na Figura 4.3, juntamente com os perfis de alta e baixa resolução.

4.2 A CORREÇÃO DO PERFIL DE BAIXA RESOLUÇÃO

4.2.1 O Perfil de Baixa Resolução Deconvolvido

A observação do perfil de alta resolução filtrado nos leva a perceber que em alguns trechos, o perfil a_F comporta-se de maneira muito semelhante ao perfil b , enquanto que em outros

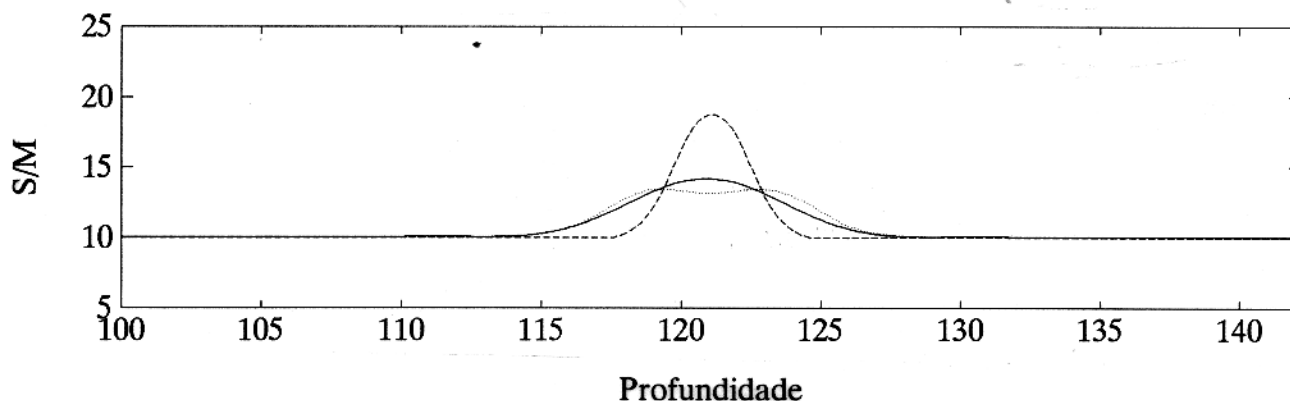


Figura 4.3 - Perfil de alta resolução filtrado (linha contínua), comparado ao perfil de alta resolução (linha tracejada) e ao perfil de baixa resolução (linha pontilhada).

trechos, notamos que a_F não possui nenhuma característica de b . Estas diferenças ocorrem devido ao fato de não termos as mesmas condições de poço em toda a extensão dos perfis. Obviamente existirão locais onde haverá desmoronamento da parede do poço, ou então, a parede do poço apresentará uma alta rugosidade, ou ainda teremos um diâmetro de invasão muito grande. Em termos de litologia, poderemos ter estruturas discordantes, camadas com mergulho muito acentuado, dentre outros. Como a ferramenta de investigação rasa tem uma profundidade de investigação menor do que a ferramenta de baixa resolução, é evidente que todos estes efeitos afetarão mais as medidas de alta resolução do que as medidas de baixa resolução. Assim, podemos afirmar que as ferramentas de alta e baixa resolução vertical examinam zonas distintas. Então, o problema limita-se a verificar se a formação que atravessa o poço é a mesma nas zonas de alta e baixa resolução. O perfil de alta resolução não nos fornece uma idéia clara, pois como já foi dito, ele é muito influenciado pelos efeitos de poço. Mas o perfil a_F pode nos fornecer esta informação, pois a_F nada mais é do que o comportamento de baixa resolução da zona investigada por a . Por isto, se o tipo de formação que atravessa ambas as zonas for a mesma, não há razão para supor que as variações das propriedades petrofísicas observadas nas curvas a_F e b sejam muito diferentes uma da outra. Torna-se necessário, então, introduzirmos uma medida de semelhança entre a_F e b para que a informação extraída de a , para corrigir b , seja relativa a um mesmo evento geológico, i. e., à mesma formação. Esta medida de semelhança evitaria teoricamente uma transferência dos indesejáveis efeitos de poço para o perfil de baixa resolução, se usássemos somente a curva de alta resolução. A correlação entre b e a_F nos fornecerá esta medida de semelhança.

Entretanto, não nos interessa correlacionar b com a_F utilizando-se todas as amostras dos perfis, pois existem trechos nos perfis a_F e b que tem correlação ótima, enquanto que em outros a correlação será menor, e ainda em outros, poderá não existir correlação nenhuma. Além disto, poderá existir situações onde uma boa correlação em termos matemáticos não signifique absolutamente nada fisicamente. Como a extensão destes trechos é variável, é necessário examinar uma série de intervalos com diferentes comprimentos. Normalmente, a análise de correlação aplicada a perfis é efetuada em intervalos de comprimentos fixos. Na metodologia do ajuste de energia adotaremos um novo princípio para a análise de correlação. Este princípio se baseia na varredura de intervalos com comprimentos variáveis, assim como na verificação da dependência linear entre a_F e b em cada intervalo.

Para cada ponto dos perfis a_F e b , faz-se o comprimento do intervalo variar de um valor mínimo até a um valor máximo. Os comprimentos dos intervalos máximo e mínimo dependerão fundamentalmente dos tipos de perfis que estão sendo usados. Por exemplo, se usarmos os perfis SFL e o ILD, o intervalo varia de 55 centímetros a 3.5 metros. A taxa de amostragem dos perfis também é de fundamental importância, pois se a taxa for muito baixa, teremos que aumentar o tamanho dos intervalos mínimo e máximo para evitar um número muito reduzido de amostras. Para cada intervalo de comprimento n , fazemos a posição deste intervalo variar em torno do ponto. Para cada variação de posição do intervalo em questão, calculamos o coeficiente de correlação ρ , dado por

$$\rho = \frac{S_{a_F b}}{S_{a_F} S_b} = \frac{\sum (a_F - \bar{a}_F)(b - \bar{b})}{\sqrt{\sum (a_F - \bar{a}_F)^2} \sqrt{\sum (b - \bar{b})^2}}, \quad (4.28)$$

onde $S_{a_F b}$, S_{a_F} e S_b são os valores da covariância entre a_F e b , da variância de a_F e da variância de b , respectivamente. Além disto, calculamos também a estimativa de baixa resolução $\hat{b}$, a partir de a_F obtida através de um ajuste no sentido dos mínimos quadrados, determinando dois parâmetros m e n que estimam uma reta de ajuste. Assim, temos

$$\hat{b} = m a_F + n. \quad (4.29)$$

A partir de $\hat{b}$, definimos o vetor de resíduos $\hat{e}$ como sendo

$$\hat{e} = \hat{b} - b. \quad (4.30)$$

Uma vez varrida todas as posições possíveis, é necessário escolher o intervalo de melhor correlação, através da minimização de uma função w dada por

$$w = (1 - \rho)s^2, \quad (4.31)$$

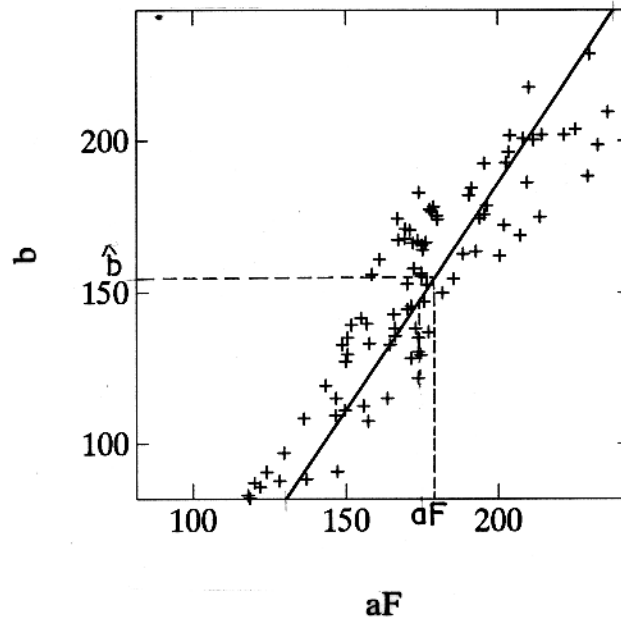


Figura 4.4 - Reta que ajusta a_F a fim de obter a estimativa $\hat{b}$ do perfil de baixa resolução b num intervalo de boa correlação. Os parâmetros m e n são obtidos através de uma regressão linear.

sendo que s é o desvio padrão amostral dado por

$$s = \sqrt{\frac{(b - \hat{b})}{n}}, \quad (4.32)$$

onde n é o comprimento do intervalo em termos de amostras. No intervalo de melhor correlação, teremos a estimativa $\hat{b}$ representada na Figura 4.4.

Como n varia de um mínimo a um máximo, no final do processo teremos uma série de intervalos ótimos com diferentes comprimentos. Neste ponto, é necessário efetuar **um teste de linearidade** a fim de saber qual destes intervalos ótimos estabelece a melhor relação de linearidade entre a_F e b . Assim, o parâmetro m de cada intervalo ótimo é testado pela relação abaixo

$$|m| > t_p \frac{s}{a_{Fxx}}, \quad (4.33)$$

onde t_p é o erro da amostragem, para 95% de confiança, s é o desvio padrão estimado e a_{Fxx} é o somatório das amplitudes das medidas do perfil de alta resolução filtrado (LEME, 1967).

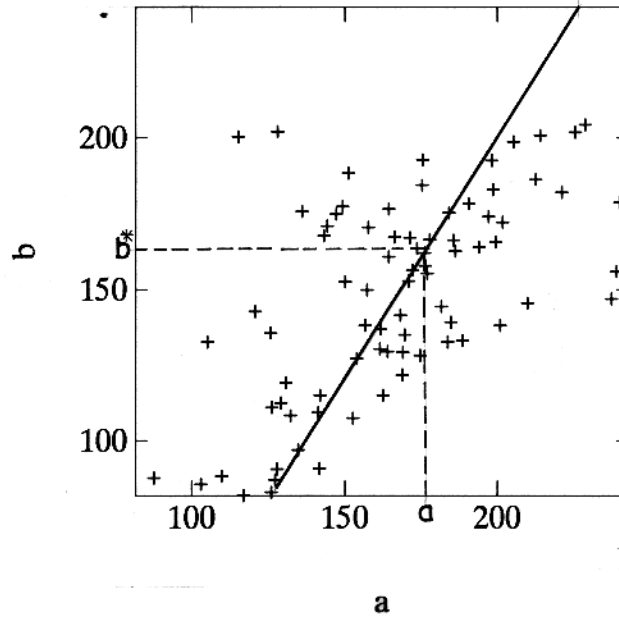


Figura 4.5 - Reta que ajusta a para obter a estimativa de alta resolução $\bar{b}$ do perfil b dentro de um intervalo qualquer. Os parâmetros p e q foram obtidos através de uma regressão linear.

O intervalo ótimo com o maior m que satisfaça a relação acima será considerado o melhor intervalo de correlação entre a_F e b .

De posse do intervalo de melhor correlação, determinamos a estimativa de alta resolução $\bar{b}$ do perfil b , a partir de a , através de uma reta de ajuste no sentido dos mínimos quadrados. Neste ajuste, definimos os parâmetros p e q que define a reta

$$\bar{b} = pa + q. \quad (4.34)$$

Na Figura 4.5, temos a reta que ajusta os valores de a para obter a estimativa de alta resolução $\bar{b}$ do perfil de baixa resolução b , num intervalo qualquer.

Assim, determinamos um novo vetor de resíduos,

$$\bar{e} = \bar{b} - b^+, \quad (4.35)$$

onde b^+ é o valor do perfil de investigação profunda com resolução vertical melhorada. Assumimos, então, a hipótese de que os vetores de resíduos $\hat{e}$ e $\bar{e}$ variam diretamente com a medida; proposta inicialmente por NELSON & MITCHELL(1991),

$$\frac{\hat{e}}{b^+} = \frac{\bar{e}}{b}. \quad (4.36)$$

O problema é que como não conhecemos o valor b^+ , o erro $\bar{e}$ também é desconhecido. Além disto, o ajuste efetuado na expressão (4.34) nem sempre satisfaz a relação de linearidade $|p| > t_{p \frac{2}{a_{xx}}}$. Assim, nos intervalos de correlação ótima, assumimos as seguintes hipóteses:

$$p = m, \quad (4.37)$$

$$q = n. \quad (4.38)$$

Desta forma, redefinimos $\bar{b}$ da seguinte forma

$$\bar{b} = ma + n. \quad (4.39)$$

Da equação (4.36) obtemos

$$b^+ = b \frac{\bar{e}}{\hat{e}} \quad (4.40)$$

e das equações (4.30), (4.35) e (4.40), obtemos

$$\frac{\hat{b} - b}{\hat{b}} = \frac{\bar{b} - b^+}{\bar{b}} \quad (4.41)$$

ou

$$\hat{b}b^+ - bb^+ = \bar{b}b - b^+b, \quad (4.42)$$

que após algumas manipulações, reduz-se a

$$b^+ = b \frac{\bar{b}}{\hat{b}}. \quad (4.43)$$

Esta condição é obtida assumindo intervalos de boa correlação entre a_F e b . Em outros casos, a premissa inicial estaria violada. Para solucionar este problema, buscamos uma medida que estima a quantidade e/ou qualidade da correlação realizada sobre b . Esta medida pode ser obtida a partir da regressão linear entre b e a_F , ou seja, calculando o coeficiente de correlação ρ . O coeficiente de correlação servirá como ponderador do valor corrigido b^+ , ou seja, a medida corrigida se aproximará da estimativa de alta resolução $\bar{b}$; caso contrário, ela se aproximará de b . Assim, definimos a função que medirá a grau de correção a ser efetuada na medida de baixa resolução como sendo

$$\text{para } 0 \leq \rho \leq 1 : \begin{cases} \text{se } \rho < 0.3 \Rightarrow b^* = b, \\ \text{se } \rho > 0.8 \Rightarrow b^* = b^+, \\ \text{se } 0.3 \leq \rho \leq 0.8 \Rightarrow b^* = b^+ \rho^2 + (1 - \rho^2)b. \end{cases} \quad (4.44)$$

A ponderação do valor corrigido feita em tres níveis, mostrada em (4.44) representa uma maneira nova de ajustar a medida deconvolvida, de forma a evidenciar mais claramente os intervalos de boa correlação entre os perfis.

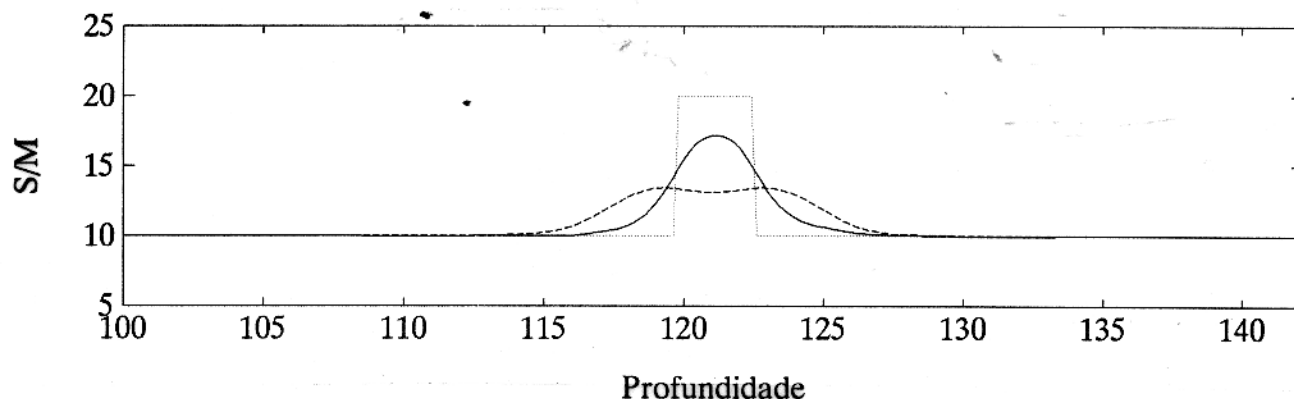


Figura 4.6 - Perfil de baixa resolução deconvolvido (linha contínua), comparado ao perfil de baixa resolução vertical (linha tracejada) e a função distribuição ideal de condutividades (linha pontilhada).

Assim, após a aplicação desta etapa, o perfil de baixa resolução deconvolvido (b^*), relativo ao exemplo mostrado no item 4.1, pode ser observado na Figura 4.6, juntamente com perfil de baixa resolução e a distribuição ideal de condutividades.

4.2.2 Síntese

Definiremos agora, um fluxograma de passos (Figura 4.7) contendo detalhadamente todas as etapas empregadas nesta metodologia, a fim de facilitar o seu emprego.

O primeiro passo consiste em admitir que as medidas dos perfis foram obtidas por um modelo convolucional onde as interações ferramenta-formação formam um sistema linear invariante com a profundidade. A partir desta premissa, poderemos aceitar que a filtragem do perfil de alta resolução refletirá o comportamento da ferramenta de baixa resolução na zona de investigação rasa. No segundo passo, obtemos as transformadas de Fourier dos perfis de alta e baixa resolução a partir de um algoritmo qualquer, que pode ser uma FFT ou semelhante. Ainda no passo 2, obtemos as energias totais dos perfis de alta e baixa resolução no domínio da frequência. No passo 3, calculamos os coeficientes do filtro H , tendo como critério o ajuste de energia do perfil de alta resolução, de modos que a energia total deste se aproxime da energia total do perfil de baixa resolução. O quarto passo é o produto dos coeficientes do filtro H pelo perfil de alta resolução A . A seguir, deve-se recuperar o perfil de alta resolução filtrado usando a transformada de Fourier inversa, que também pode ser feita pelo algoritmo da IFFT. O quinto passo consiste na correção do perfil de baixa resolução. Uma varredura é realizada ponto a ponto nos perfis de alta resolução

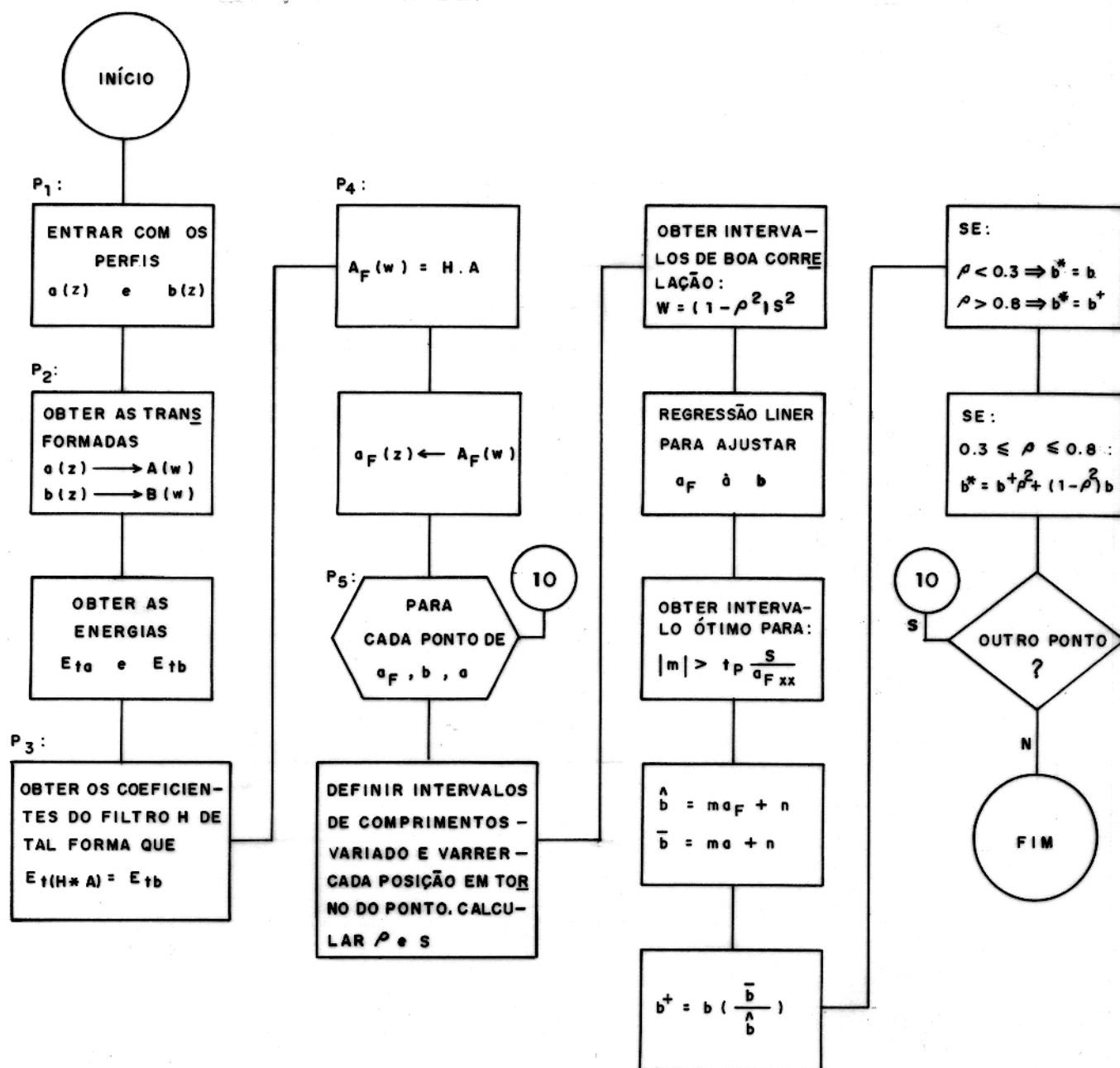


Figura 4.7 - Fluxograma detalhado dos passos necessários para a aplicação da metodologia do ajuste de energia para a deconvolução de perfis.

filtrado, baixa resolução e alta resolução, a fim de definir o melhor intervalo de correlação. O comprimento deste intervalo é arbitrário, devendo-se levar em conta a amostragem do perfil e a resolução vertical dos perfis. Como exemplo, se usarmos o perfil SFL para corrigir o perfil ILD, e se ainda ambos forem amostrados à 0.20 centímetros, um comprimento razoável para o intervalo ótimo ficaria em torno de 3.5 metros.

Durante a processo de varredura, a posição deste intervalo é modificada de modo a cobrir toda a vizinhança do ponto que está sendo analisado. Para cada intervalo posicional, calculamos o coeficiente de correlação ρ , os parâmetros m e n do ajuste linear e o desvio padrão s da estimativa do ajuste. Então, uma rotina de minimização w é aplicada com o objetivo de escolher o intervalo posicional ótimo. O processo de varredura é repetido para outros intervalos de comprimentos diferentes. Finalmente, um teste de linearidade é aplicado sobre os intervalos ótimos, a fim de escolher o melhor intervalo de correlação entre a_F e b . De posse deste intervalo, procede-se na correção do ponto. Todo o processo é então repetido para todos os pontos do perfil de baixa resolução.

Uma filtragem eficiente é fundamental para obtermos um perfil de alta resolução filtrado que sirva como bom parâmetro na análise de regressão. Desta forma, devemos ter um cuidado especial com o tipo de filtragem a ser efetuada, de modo que esta não corte informação excessiva do perfil de alta resolução e que também a filtragem não introduza ruídos. O comprimento do intervalo também é fundamental para obtermos boas estimativas. Um intervalo muito grande pode prejudicar o resultado final das correções, pois o coeficiente de correlação tende a diminuir devido ao aumento da variância amostral. Porém, um intervalo muito pequeno pode produzir falsas estimativas, degradando o perfil deconvolvido. Eventos associados aos perfis de alta resolução podem também prejudicar os resultados finais. Dentro destes eventos, podemos destacar a invasão e as fontes de ruídos. Finalmente, devemos levar em conta que a correlação entre os perfis de alta e baixa resolução tem um papel fundamental no bom desempenho da metodologia.

5 - APLICAÇÃO EM DADOS SINTÉTICOS

Podemos simular uma determinada formação através de um modelo ou por uma função que represente a distribuição de uma determinada propriedade petrofísica. Como exemplo, podemos representar as camadas de um determinado trecho de reservatório através de uma função contínua por partes, onde as descontinuidades representam as interfaces, os intervalos de continuidade representam as camadas e o valor da função em cada um destes intervalos de continuidade representa o valor ideal da propriedade petrofísica na camada.

Em relação aos perfis, será adotado o modelo convolucional, ou seja, o perfil sintético que representará as medidas de uma determinada propriedade petrofísica é o resultado da convolução entre a função resposta vertical de uma ferramenta hipotética com uma função distribuição ideal da propriedade petrofísica em questão.

Assim, se tivermos a função resposta vertical $vr f(z_i - z_j)$ de uma dada ferramenta e a função distribuição ideal da propriedade petrofísica $s(z_j)$ então, a leitura real desta ferramenta será dada por

$$r(z_j) = \sum_{j=1}^n vr f(z_i - z_j) s(z_j), \quad (5.1)$$

onde z_j é o ponto de medida, i.e., a profundidade, z_i são os pontos adjacentes ao ponto de medida, n é o número de coeficientes de $vr f$. Por outro lado, $s(z_j)$ é dado por

$$s(z_j) = \{s_2, s_3, \dots, s_n\} = s_1 + \sum_1^n h_n(z_j) s_n, \quad (5.2)$$

onde

$$h_n(z_j) = \{0, 1\}. \quad (5.3)$$

Temos que $h_n(z_j)$ é a função que representa os limites entre as camadas, i.e., a cada transição 0-1 teremos um novo valor para s , i.e., uma nova camada. Finalmente, teremos o perfil sintético, que é dado por

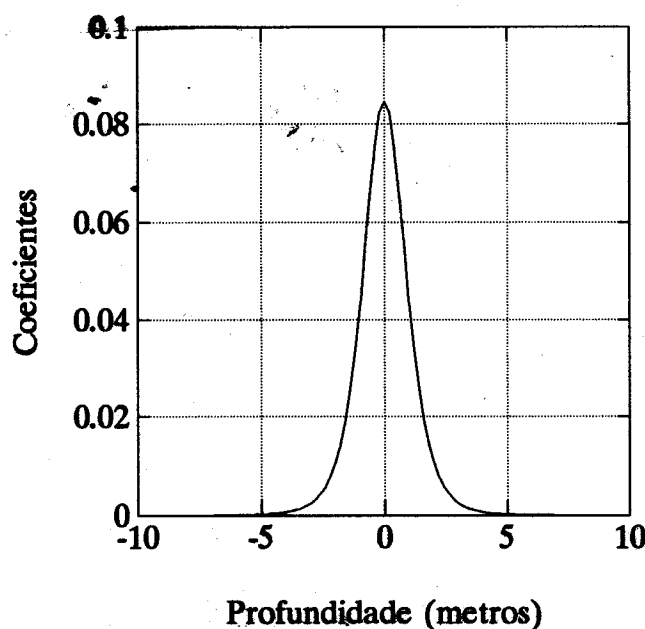


Figura 5.1 - Função resposta vertical da ferramenta de alta resolução (extraído de ANDRADE, 1992).

$$r(z_i) = \sum_{j=1}^n (s_1 + s_n) \sum_{j=1}^n vrf(z_i - z_j) h_n(z_j). \quad (5.4)$$

Na Figura 5.1, temos a função resposta vertical da ferramenta de alta resolução. Pela definição de resolução vertical intrínseca, a resolução vertical para esta ferramenta é de 2.2 metros. Na Figura 5.2, temos a função resposta vertical para a ferramenta de baixa resolução. Usando o mesmo princípio, a resolução vertical desta ferramenta é de 6.6 metros. Podemos notar que a função resposta da ferrameta de baixa resolução possui dois máximos. Esta característica é muito comum na ferramenta de indução profunda e sua origem está associada ao efeito de acoplamento entre as bobinas.

5.1 EXEMPLO 1

Na Figura 5.3, temos a função de distribuição de condutividade que será utilizada para caracterizar as zonas de investigação rasa e profunda. A situação visa simular uma formação hipotética com condições perfeitas de poço, sem invasão e com sete camadas perfeitamente horizontais, que atravessam o poço sem sofrer nenhuma alteração. Assim, esta distribuição servirá para a caracterização de ambas as zonas. Nas profundidades entre 110 e 125 metros,

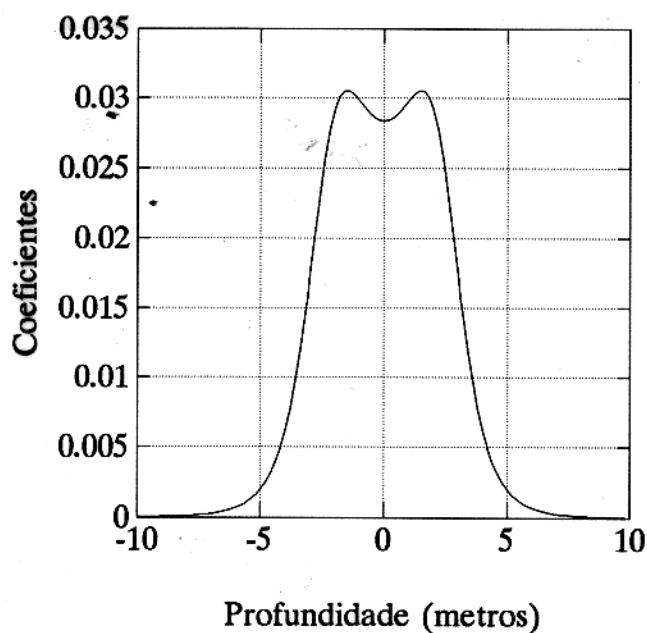


Figura 5.2 - Função resposta vertical da ferramenta de baixa resolução (extraído de ANDRADE, 1992).

temos três camadas com espessura de 5.0 metros cada uma, enquanto que as outras camadas tem o comprimento de 10 metros cada.

Na Figura 5.4, temos o perfil de alta resolução, que é o resultado da convolução da função resposta da Figura 5.1 com a distribuição de condutividade observada na Figura 5.3. Com uma resolução vertical de 2.2 metros, esta ferramenta não teve dificuldades em obter condutividades ideais nas camadas com espessura de dez metros. Nas camadas com espessuras de cinco metros, a curva ainda consegue alcançar as condutividades ideais, embora num intervalo mais restrito ao centro. Nas vizinhanças das interfaces de cada camada, podemos notar que a curva não consegue alcançar o valor ideal. Este efeito é particularmente maior nas camadas de menor espessura e tem origem na operação de convolução, pois nas vizinhanças de cada interface, o número de coeficientes da função resposta vertical que interage com a camada vizinha tem um peso expressivo sobre a medida. Este efeito é comumente chamado de *efeito de borda*, e é um fator limitante na avaliação de formações em reservatórios complexos. Na Figura 5.5, temos o perfil de baixa resolução obtido pela convolução da função resposta da Figura 5.2 com a distribuição observada na Figura 5.3. Nas profundidades entre 110 e 125 metros, a ferramenta praticamente não percebeu o contraste de condutividade entre as três camadas. Como a resolução vertical desta ferramenta é de 6.6 metros e as camadas neste trecho têm apenas 5.0 metros, o efeito de borda é muito grande, por isso a ferramenta acaba praticamente registrando uma média das três camadas. Um analista que não conhecesse este modelo, poderia jogar que a deflexão na curva condutividade neste trecho é tão somente

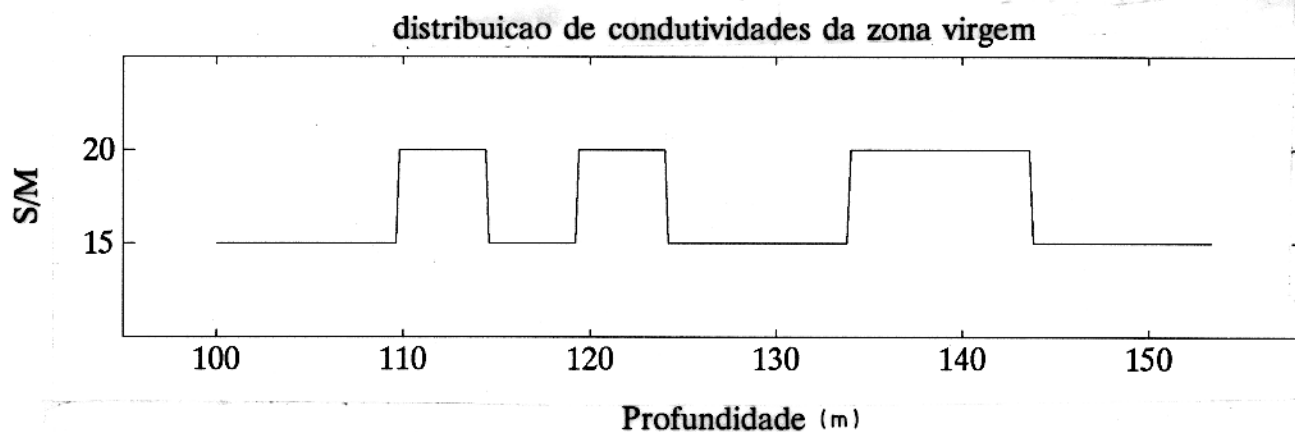


Figura 5.3 - Função que caracteriza uma distribuição ideal de uma formação hipotética com sete camadas.

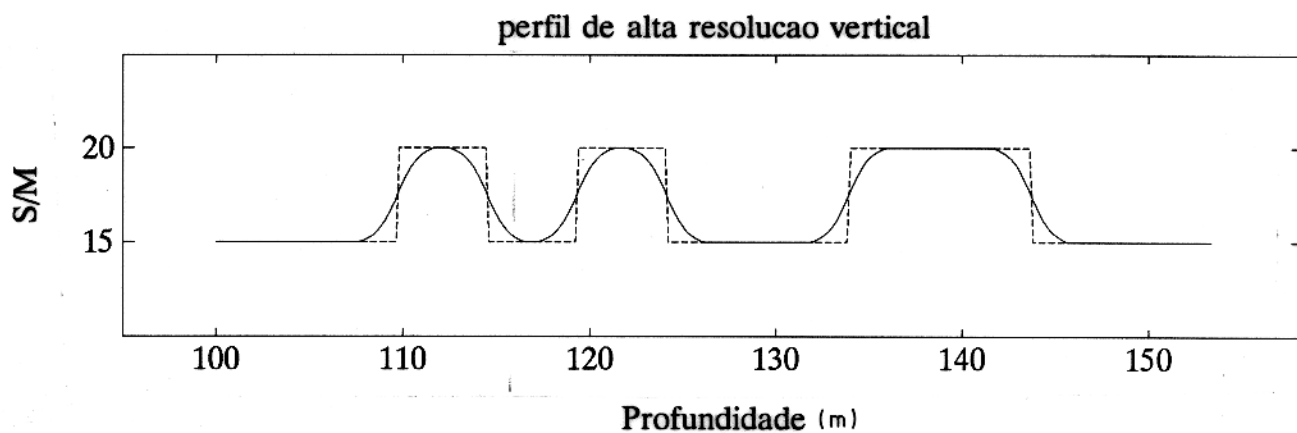


Figura 5.4 - Perfil de alta resolução (linha contínua) comparado à função de distribuição de condutividades (linha tracejada).

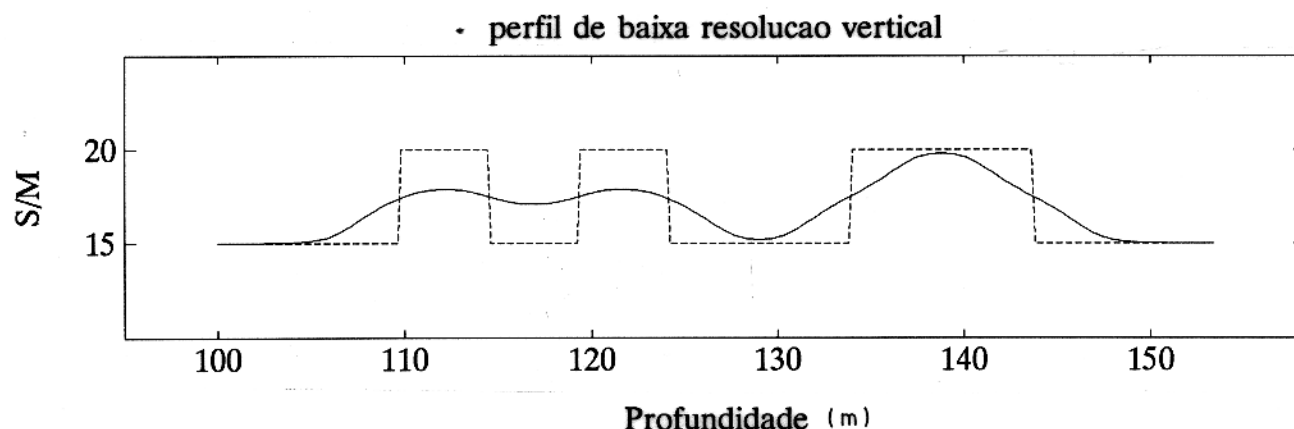


Figura 5.5 - Perfil de baixa resolução(linha contínua) comparado à função de distribuição de condutividades(linha tracejada).

devido a uma camada de 20 metros, ou então, duas camadas de 10 metros. Já nas camadas de 10 metros, a ferramenta de baixa resolução consegue se aproximar mais do valor ideal, embora a medida ainda fique bem aquém dos valores obtidos no perfil de alta resolução.

A aplicação da metodologia aqui proposta começa com o tratameto do perfil de baixa resolução no domínio da frequência. Nesta fase, a energia do perfil de alta resolução é filtrada de modo a gerar um outro perfil que tenha a mesma energia do perfil de baixa resolução. A Figura 5.6 mostra o perfil de alta resolução filtrado, juntamente com o perfil de alta resolução e o perfil de baixa resolução vertical. É interessante observar que o perfil de alta resolução filtrado possui um comportamento muito semelhante ao perfil de baixa resolução, o que corrobora a afirmação de que a informação de baixa resolução vem da mesma região na qual a informação de alta resolução é obtida. Uma vez obtido o perfil de alta resolução filtrado, partimos para a análise de correlação entre os perfis de baixa resolução e o de alta resolução filtrado, e a correção do perfil de baixa resolução. Na Figura 5.7, temos o perfil de baixa resolução deconvolvido, juntamente com o perfil de baixa resolução convencional. Podemos notar que a deconvolução diminuiu sensivelmente o efeito de borda nas interfaces entre as camadas. Nas profundidades entre 110 e 125 metros, observamos que a curva deconvolvida está muito mais próxima da função distribuição do que a curva não corrigida. Nas profundidades entre 125 e 145, nota-se que, embora a curva deconvolvida ainda não atinja os valores ideais, podemos observar que ela se amolda mais aos limites entre as camadas da função distribuição, devido à correção do efeito de borda.

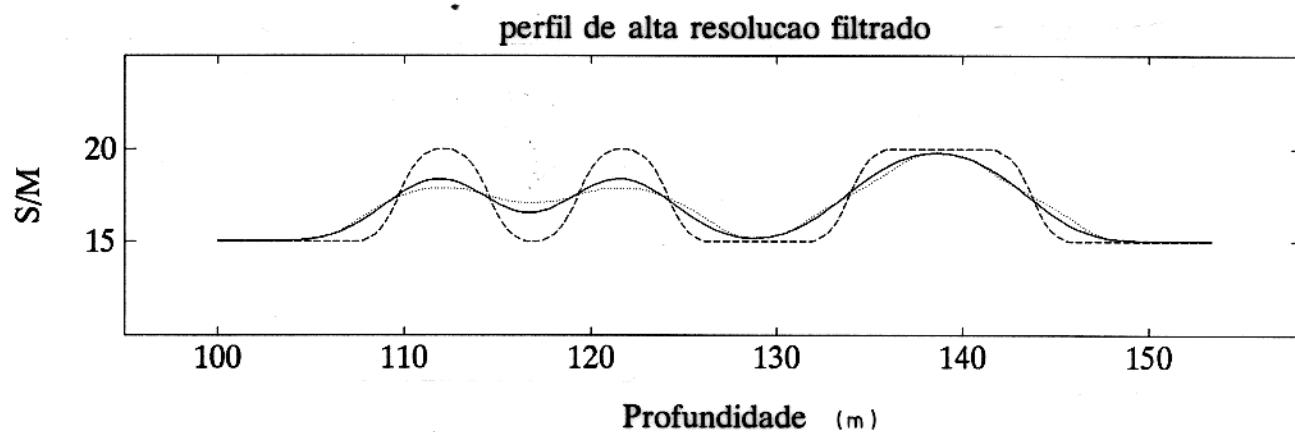


Figura 5.6 - Perfil de alta resolução filtrado(linha contínua) comparado ao perfil de alta resolução(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução(linha pontilhada).

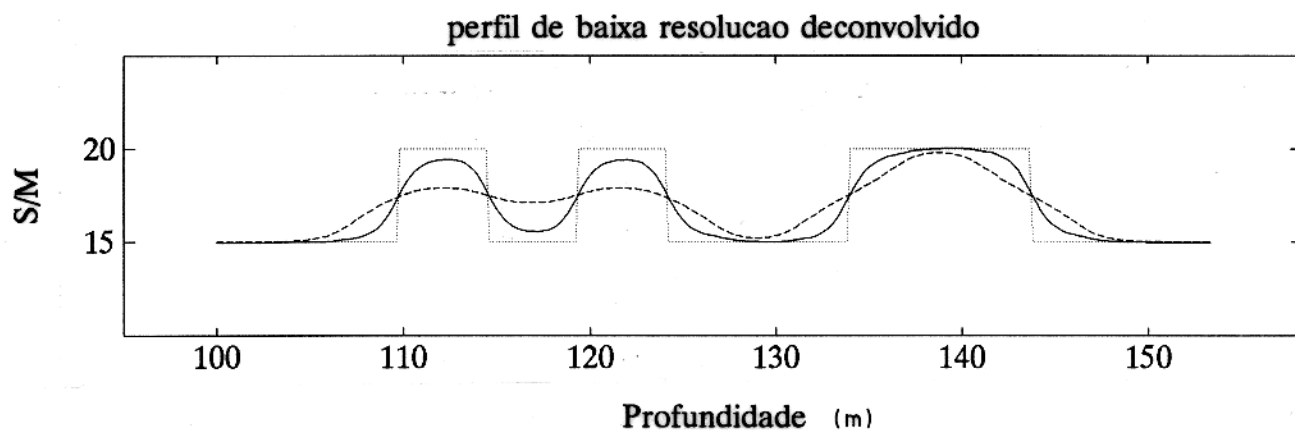


Figura 5.7 - Perfil de baixa resolução deconvolvido(linha contínua) comparado ao perfil de baixa resolução convencional (linha tracejada) e a função distribuição ideal de condutividades(linha pontilhada).

5.2 EXEMPLO 2

O modelo apresentado no exemplo 1 não ocorre numa formação real pois, na realidade, a zona investigada pela ferramenta de alta resolução apresenta-se contaminada pelos efeitos de poço. Por exemplo, podemos citar o desmoronamento da parede do poço em folhelhos. O desmoronamento provoca o alargamento do poço, fazendo com que a ferramenta de investigação rasa obtenha uma leitura fortemente influenciada pela lama de perfuração. De todos os efeitos de poço, talvez o mais importante seja a invasão do filtrado da lama em camadas permeáveis. A invasão pode nos fornecer um forte indicativo das chamadas zonas de reservatório, podendo este estar saturado com óleo ou água. Por outro lado, a invasão pode influenciar negativamente os registros de alta resolução. Por exemplo, se a lama apresentar alta salinidade, os registros de condutividade numa zona de alta permeabilidade apresentarão valores maiores do que o normal. Em reservatórios laminares saturados com fluidos resistivos, esta característica é marcante, sendo que um erro de avaliação pode levar o analista de perfil a descartar zonas potencialmente produtoras.

O modelo aqui apresentado leva em consideração a invasão do filtrado da lama. Supondo que lama de perfuração tenha uma alta salinidade, a Figura 5.8 mostra a distribuição de condutividades na zona de investigação rasa e a distribuição de condutividades na zona de investigação profunda. Observando estas distribuições, podemos notar que nas profundidades de 120 à 126 e 145 à 170 metros, as camadas mais condutivas apresentam-se com valores maiores na distribuição de condutividades rasas do que as observadas nas distribuições de condutividades profundas. Este é um efeito típico da invasão sobre a zona de investigação rasa. Nos outros intervalos, os valores de condutividade para ambas distribuições são as mesmas, evidenciando camadas não permeáveis.

Na Figura 5.9, temos os perfis de alta e baixa resolução vertical. Observe que o perfil de alta resolução consegue obter leituras excelentes, enquanto que nas profundidades entre 120 e 126 e, 157 e 160 metros, a leitura das camadas finas fica mais baixa, devido ao fato das espessuras destas camadas serem próximas da resolução vertical da ferramenta de alta resolução. Mas ainda assim, o perfil dá um bom indicativo de mudança litológica, o que não ocorre simplesmente observando o perfil de baixa resolução. Na Figura 5.10, temos o perfil de alta resolução filtrado (linha contínua) comparado ao perfil de alta resolução (linha tracejada) e o perfil de baixa (linha pontilhada). Embora o perfil de alta resolução tenha um comportamento diferente do perfil de baixa resolução, o perfil de alta resolução filtrado apresenta a mesma tendência do perfil de baixa resolução, provando mais uma vez que o comportamento de baixa resolução da zona rasa é o mesmo do observado na zona virgem, pois as camadas que atravessam ambas as zonas são as mesmas. O perfil de baixa resolução

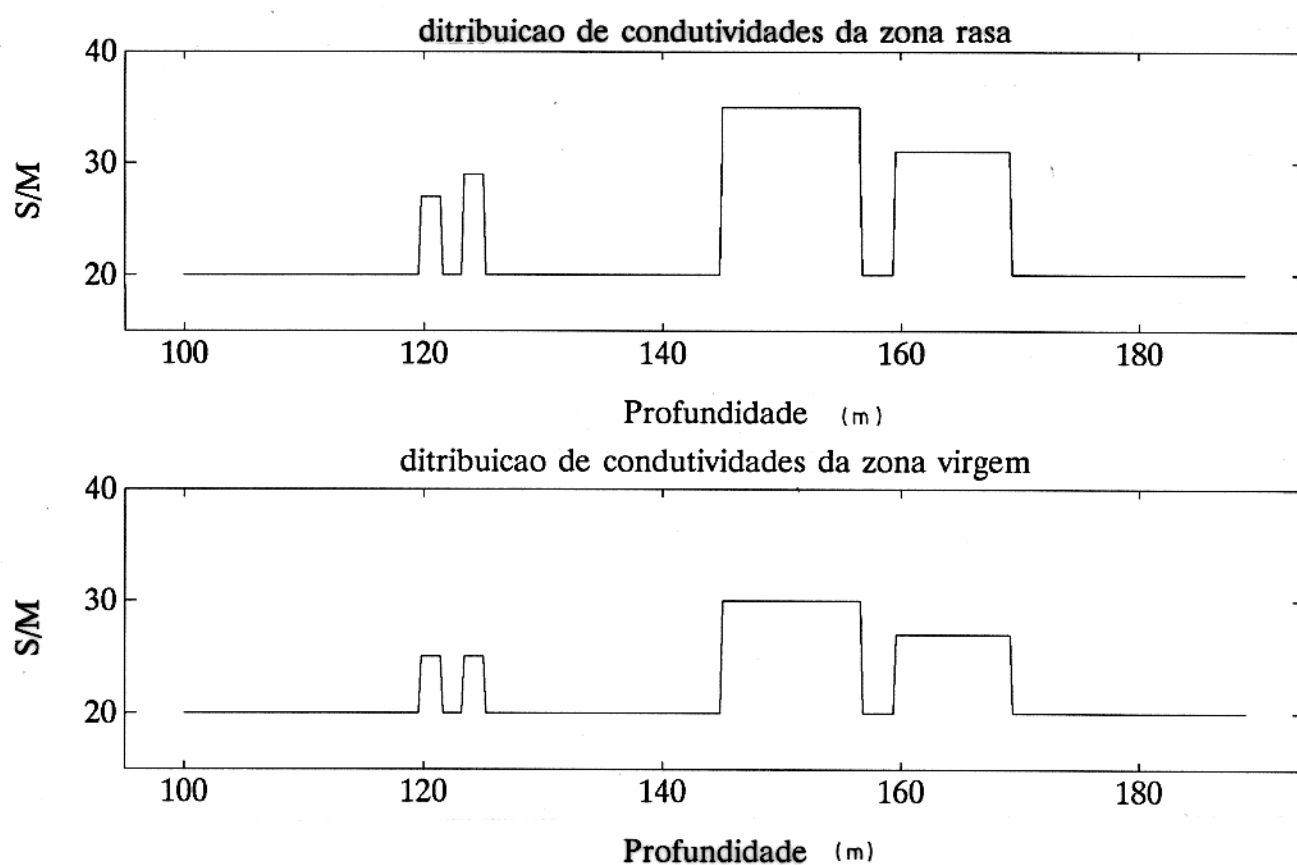


Figura 5.8 - Acima, a distribuição de condutividades para a zona de investigação rasa. Logo abaixo, a distribuição de condutividades da zona de investigação profunda, aqui chamada de zona virgem.

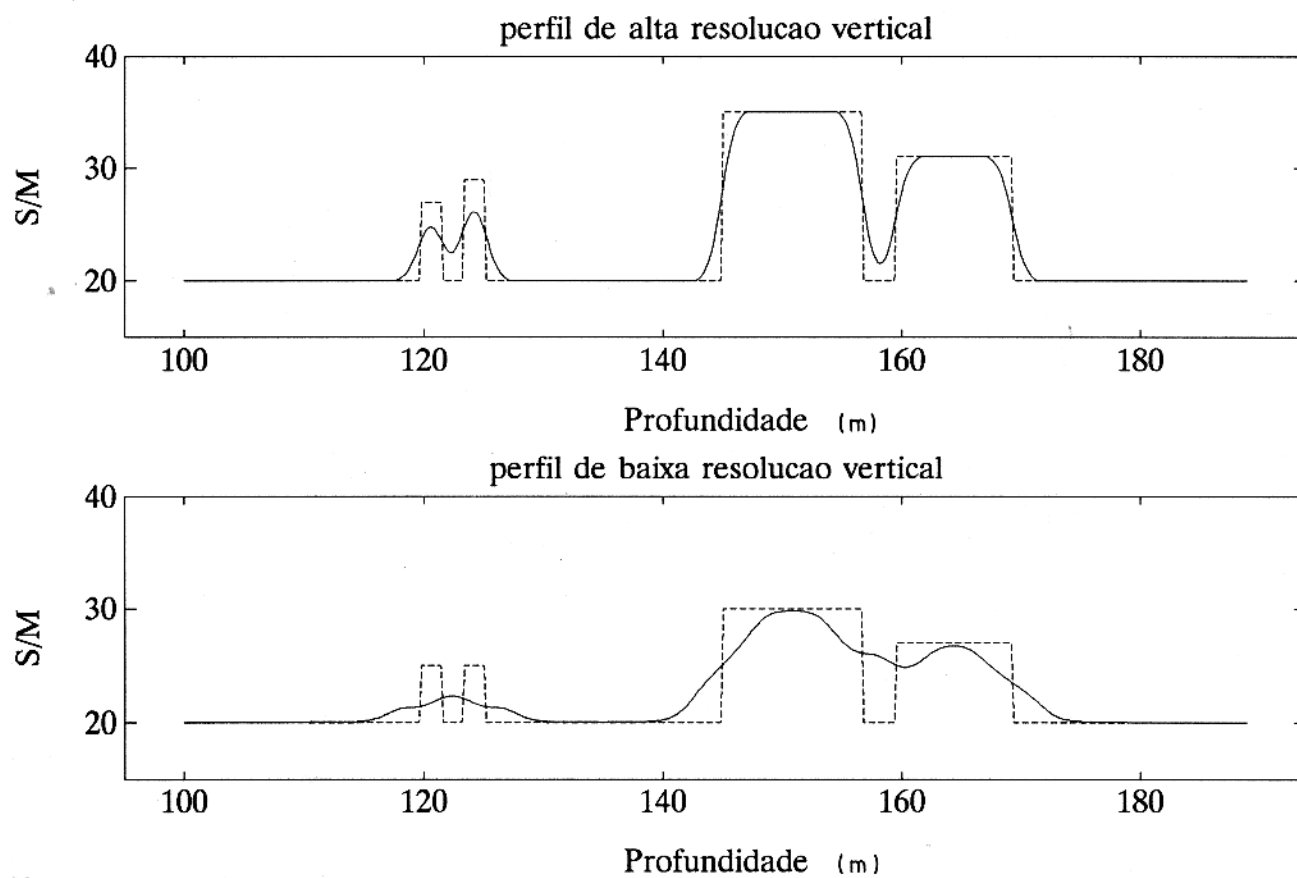


Figura 5.9 - Acima, o perfil de alta resolução (linha contínua) juntamente com a distribuição ideal de condutividade rasa (linha tracejada). Logo abaixo, o perfil de baixa resolução (linha contínua) juntamente com a distribuição de condutividades profunda (linha tracejada).

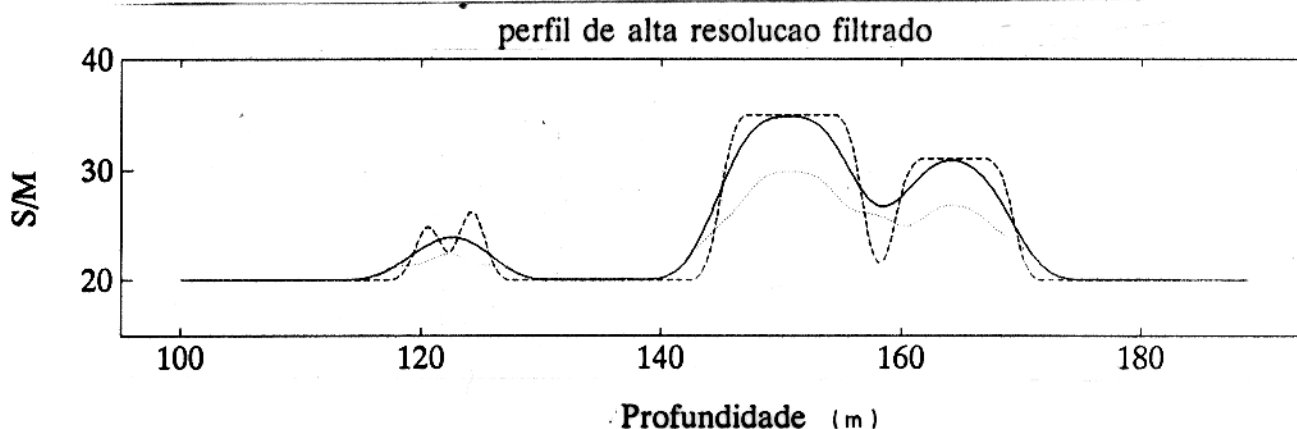


Figura 5.10 - Perfil de alta resolução filtrado(linha cheia) comparado ao perfil de alta resolução(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução(linha pontilhada).

vertical deconvolvido é mostrado na Figura 5.11. Podemos observar que o efeito de borda nas interfaces foi diminuído, e que as condutividades das camadas mais condutivas se aproximam mais dos valores ideais. Notamos também que, embora as condutividades no perfil de alta resolução sejam maiores do que as observadas no perfil de baixa resolução nas profundidades entre 120 e 126 e entre 145 e 165 metros, os valores corrigidos obtidos no perfil deconvolvido não ultrapassam os valores contidos na distribuição ideal, pois a análise de correlação entre os perfis impede que o efeito de invasão seja repassado para o perfil de baixa resolução. A informação desejada do perfil de alta resolução é do tipo posicional, i. e, a delimitação de camadas.

5.3 EXEMPLO 3

O objetivo da perfilagem de poço é obter informações claras e confiáveis das propriedades petrofísicas da formação em subsuperfície. Este objetivo nem sempre é alcançado devido a fatores operacionais e ambientais que distorcem as medidas obtidas. As causas que contribuem para a deteriorização dos dados podem ser :

- Rugosidade na parede do poço.
- Limitações do fluido de poço.

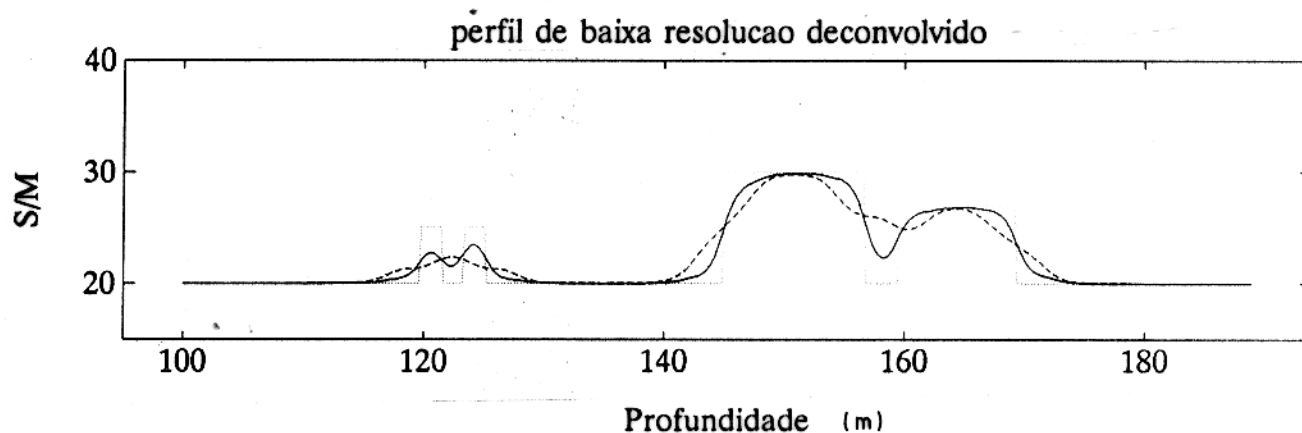


Figura 5.11 - Perfil de baixa resolução vertical deconvolvido (linha cheia) comparado ao perfil de baixa resolução convencional (linha tracejada) e a distribuição ideal de condutividades da zona virgem (linha pontilhada).

- Aderência da ferramenta.
- Anisotropias.
- Presença de gás.
- Contato dos Patins inadequado.
- Limitações da ferramenta.
- Limitações das técnicas operacionais.
- Outras.

De uma maneira geral, todos estes fatores contribuem para a deteriorização do sinal, através da introdução de informações indesejáveis, que normalmente são tratadas como *ruído*. Como exemplo, se o operador decidir diminuir a velocidade de perfilagem, no sentido de aumentar a resolução vertical dos perfis radioativos, o resultado pode ser uma série de medidas contaminadas por ruídos geológicos. No Dipmeter, a presença de ruídos nas curvas de microresistividades pode resultar numa medida de mergulho errada.

Assim, as metodologias de deconvolução não podem de maneira alguma danificar o sinal, seja através da introdução de ruídos ou da amplificação dos mesmos. Neste modelo, testaremos o comportamento da metodologia frente a um sinal contaminado por ruído aleatório. Na Figura 5.12, temos os perfis de alta e baixa resolução do exemplo 2, contaminado por ruído aleatório. O ruído aparece em todo sinal, sendo que as condutividades medidas chegam a ultrapassar os valores ideais, principalmente no perfil de alta resolução. Na Figura 5.13, temos o perfil de alta resolução filtrado. É interessante observar que o tratamento dado ao perfil de alta resolução no domínio da frequência filtrou o ruído presente no sinal original. Este efeito pode ser explicado pelo fato de que o ruído aumenta a energia do sinal através da introdução de frequências que geralmente são altas. Como o processo de filtragem no domínio da frequência visa igualar a energia do perfil de alta resolução à energia do perfil de baixa resolução, então as altas frequências responsáveis pelos ruídos são atenuadas após a aplicação do filtro, já que o papel do filtro é retirar energia do perfil de alta resolução. A seguir, temos o perfil de baixa resolução deconvolvido (Figura 5.14.). Podemos observar que a aplicação da metodologia, além de melhorar a definição das camadas, também diminuiu o nível de ruído apresentado no perfil convencional, conferindo assim uma vantagem extra a esta metodologia.

5.4 EXEMPLO 4

Quando não existe a possibilidade de se obter informações geológicas prévias acerca de uma dada região sob a qual se efetuará uma perfilagem, a possibilidade de se deparar com formações complexas pode nos obrigar a suprir esta carência através de análise mais profunda dos perfis obtidos. Isto significa que devemos estar preparados para detectar estruturas do tipo laminar, por exemplo. Assim, um conjunto de perfis de boa qualidade se faz necessário, e dentro deste contexto, um algoritmo que melhore a resolução vertical dos perfis de baixa resolução deve funcionar satisfatoriamente frente a esses tipos de formações. Na Figura 5.15, temos a distribuição ideal de condutividades para a zona de investigação rasa e a zona de investigação profunda, para uma formação do tipo laminar.

Nas profundidades entre 120 e 154 metros, temos uma série de camadas finas com espessura de dois metros cada. Os contrastes de condutividades na zona de investigação rasa são maiores do que os da zona virgem, indicando uma possível invasão. Na Figura 5.16, temos o perfil de alta resolução. O perfil também apresenta um pequeno ruído aleatório. Observando este perfil, notamos que a ferramenta não conseguiu alcançar o valor verdadeiro de condutividade da zona rasa na seção laminar, pois neste trecho, a espessura das camadas (2 metros cada) é inferior à resolução vertical da ferramenta (2.2 metros). Entretanto, a

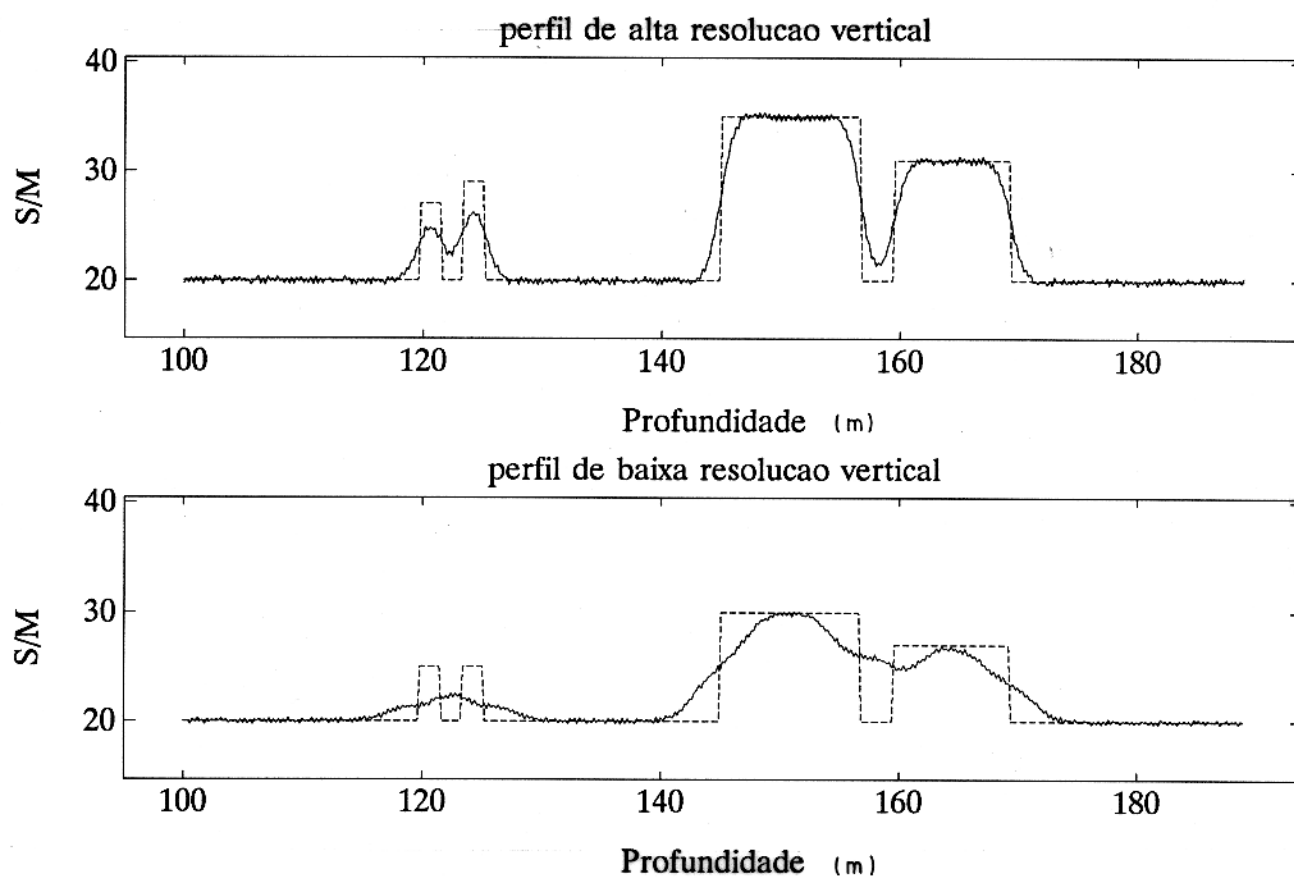


Figura 5.12 - Acima, o perfil de alta resolução vertical. Abaixo, o perfil de baixa resolução vertical. Ambos os perfis estão acrescidos de ruído aleatório.

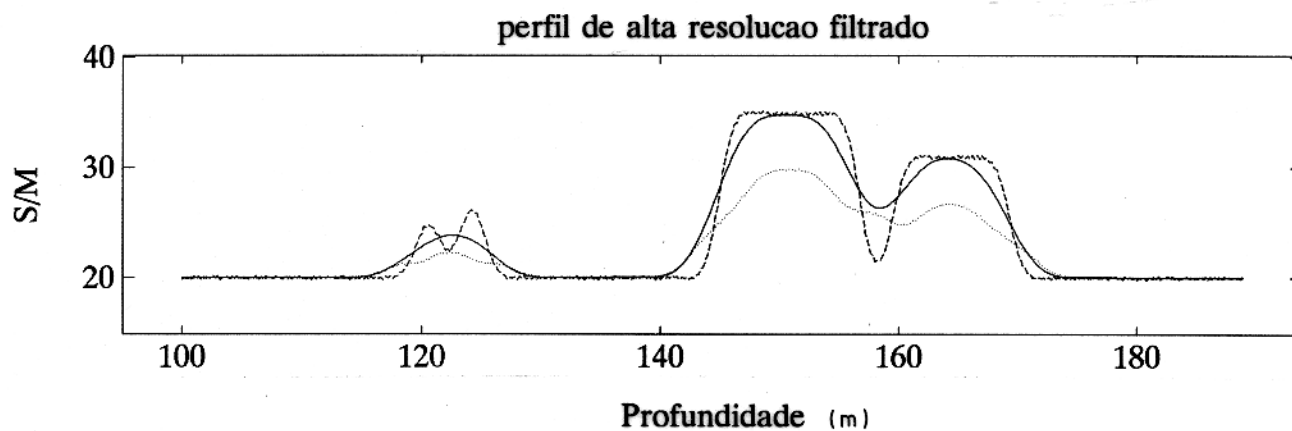


Figura 5.13 - Perfil de alta resolução filtrado(linha contínua) comparado ao perfil de alta resolução(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução(linha pontilhada). Todos os perfis estão acrescido de ruído aleatório.

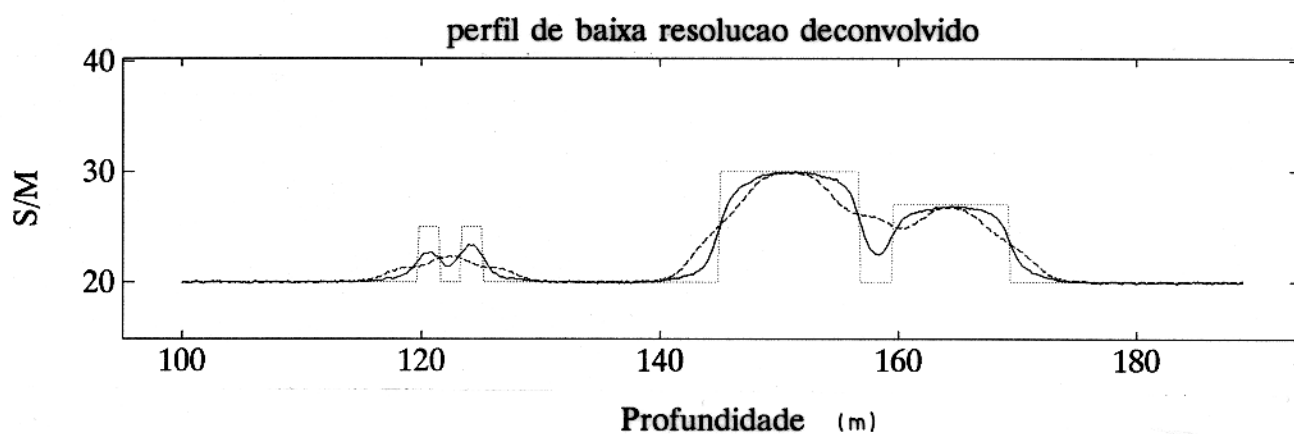


Figura 5.14 - Perfil de baixa resolução deconvolvido(linha contínua) comparado com o perfil de baixa resolução vertical convencional(linha tracejada), ambos com ruídos. A linha pontilhada indica a distribuição ideal de condutividades da zona virgem.

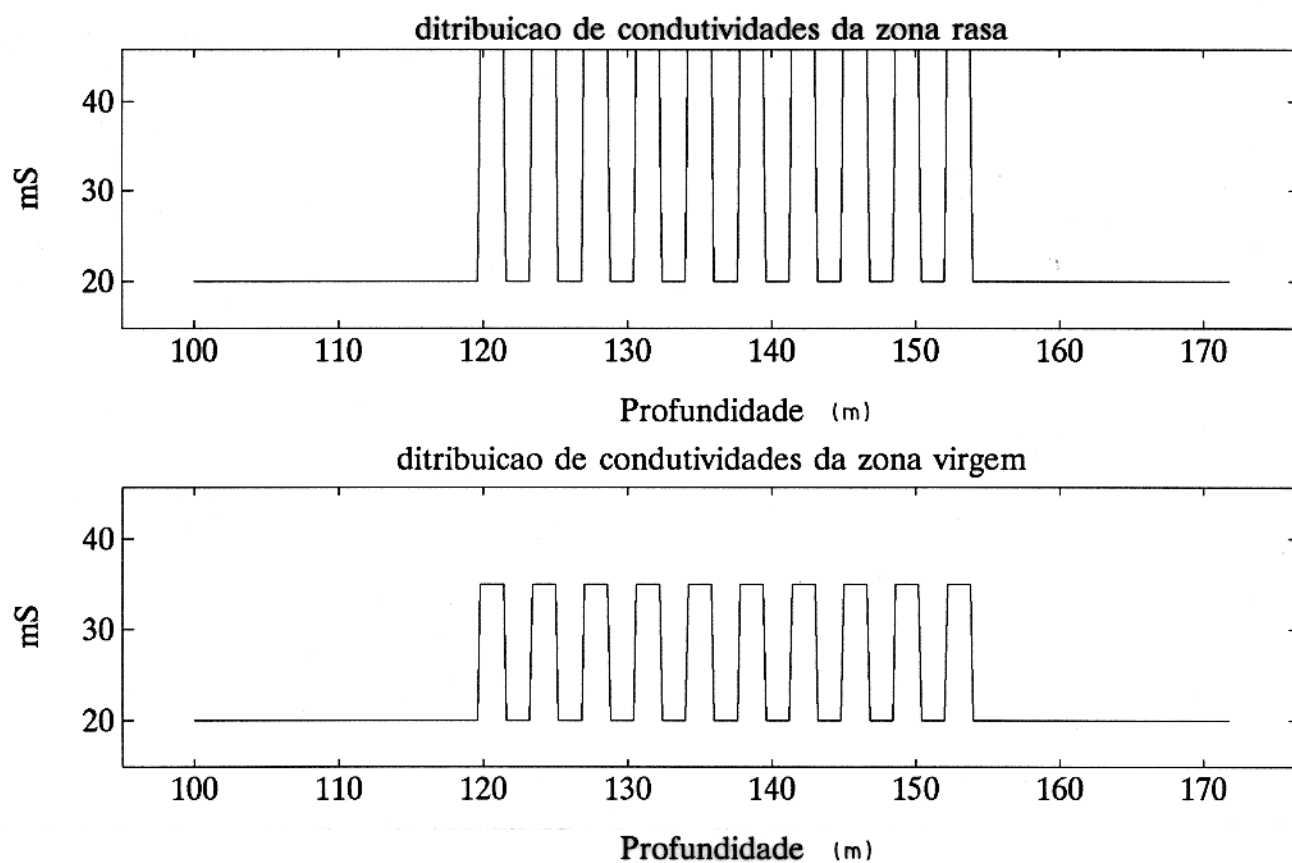


Figura 5.15 - Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona rasa, e logo abaixo a da zona de investigação profunda, para uma formação hipotética com a presença de um reservatório laminar.

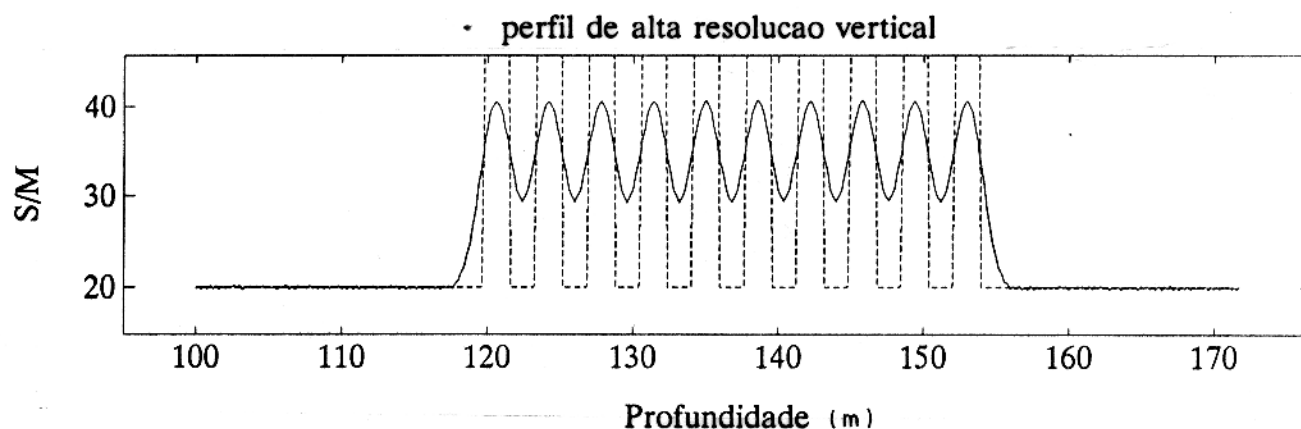


Figura 5.16 - Perfil de alta resolução(linha contínua) comparado à função distribuição(linha tracejada). Observe que o perfil apresenta um nível de ruído.

informação litológica não foi completamente perdida, pois a proximidade da espessura desta camada com a resolução vertical da ferramenta, não retirou a sensibilidade desta, de acusar os contrastes de condutividades. Isto já não acontece com a ferramenta de baixa resolução, que registrou a mesma seção como se existisse apenas uma camada de 115 a 160 metros (Figura 5.17). Após a aplicação do filtro, temos, na Figura 5.18, o perfil de alta resolução filtrado. Observa-se que a filtragem da energia do perfil de alta resolução retirou totalmente a informação litológica, fazendo com que o perfil registre apenas um contraste de condutividade. Podemos notar que o pequeno ruído presente no sinal original também desapareceu. Finalmente, na Figura 5.19, temos o perfil de baixa resolução deconvolvido, comparado com o perfil de baixa resolução convencional. Observa-se que, embora o perfil deconvolvido não consiga atingir os valores ideais da zona virgem, ele agora passa a ter a informação litológica que antes não era disponível no perfil de baixa resolução convencional.

5.5 EXEMPLO 5

Em certas situações, devemos efetuar uma escolha sobre o tipo de metodologia a ser empregada no processo de deconvolução. Cada uma das abordagens tem as suas próprias particularidades, apresentando vantagens e limitações. Na escolha de uma determinada metodologia, devemos considerar os tipos de perfis a serem usados, a qualidade das medidas

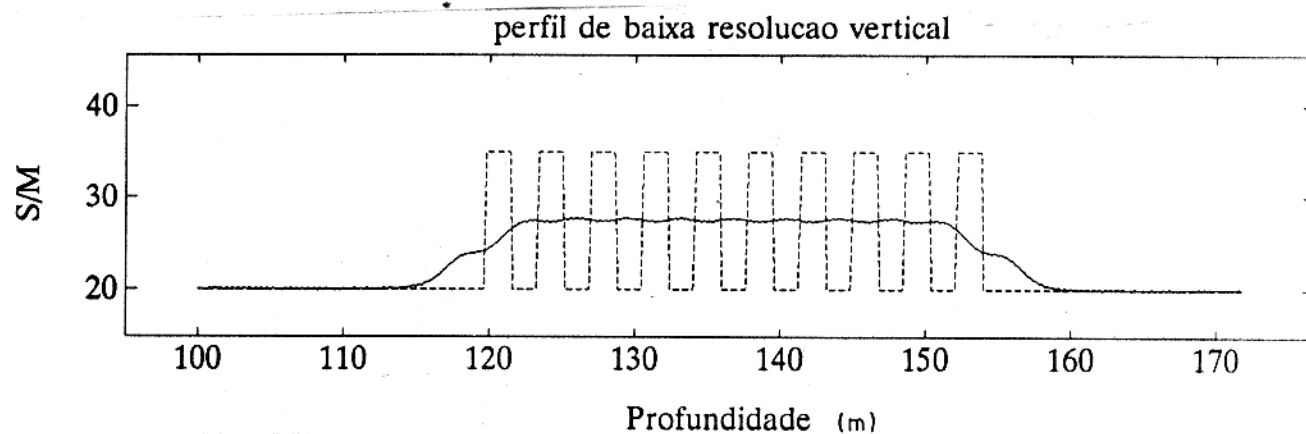


Figura 5.17 - Perfil de baixa resolução vertical (linha contínua) juntamente com com função distribuição de condutividades da zona virgem (linha tracejada), com ruídos.

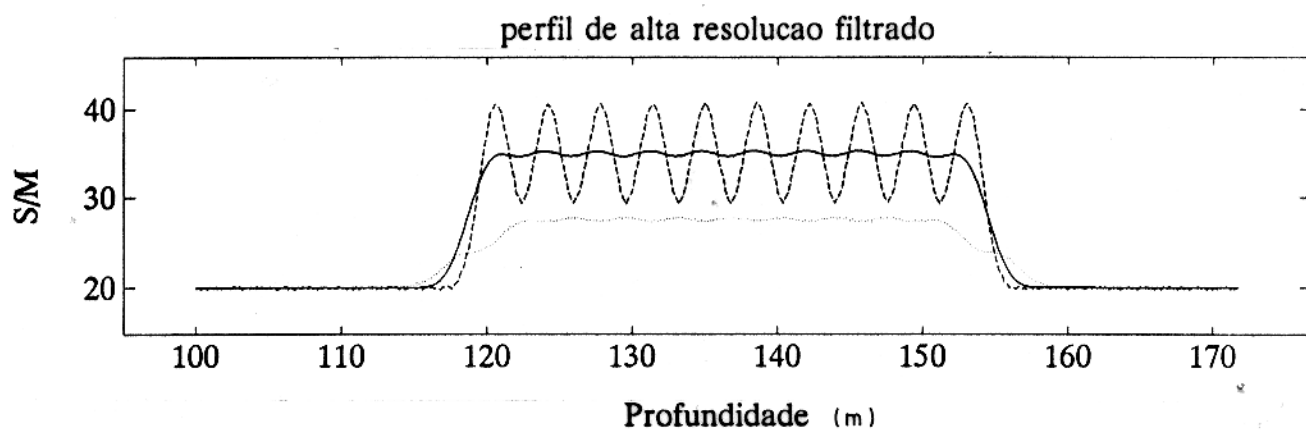


Figura 5.18 - Perfil de alta resolução vertical filtrado (linha contínua) comparado ao perfil de alta resolução (linha tracejada) e o perfil de baixa resolução (linha pontilhada).

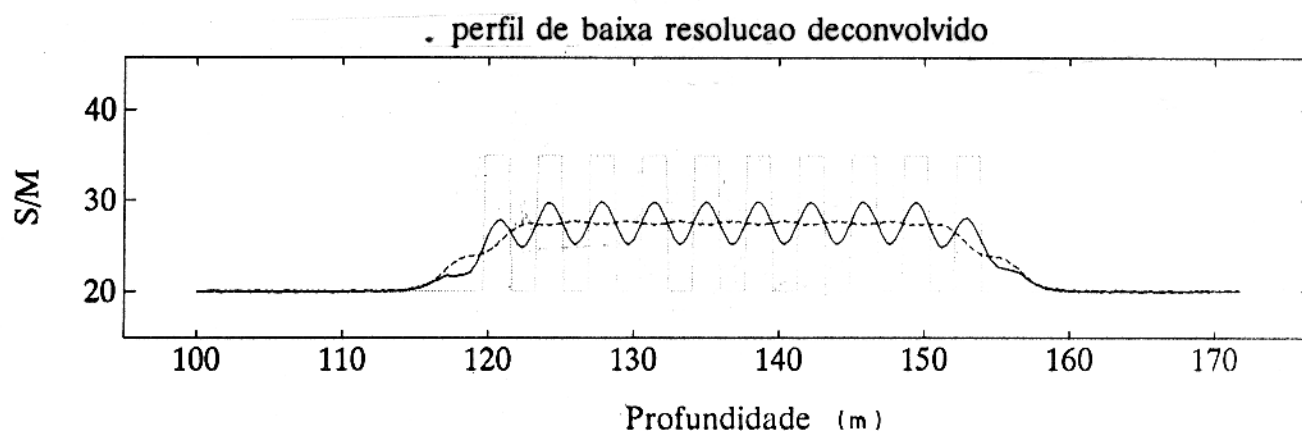


Figura 5.19 - Perfil de baixa resolução vertical deconvolvido (linha contínua) comparado ao perfil de baixa resolução convencional (linha tracejada) e a distribuição de condutividades da zona virgem (linha pontilhada).

destes perfis, o tipo de formação dentro da qual foram corridos e, sobretudo, o compromisso da melhoria da resolução vertical com a qualidade da curva deconvolvida. Pois de nada adianta termos à disposição uma curva deconvolvida, que apresenta valores irreais que não reflitam a realidade da formação.

A metodologia do ajuste de energia funciona satisfatoriamente para os perfis de resistividade e condutividade, onde os efeitos de poço não sejam extremos. No entanto, devemos ter um parâmetro para compararmos o desempenho da metodologia, a fim de se estabelecer um critério para o seu melhor emprego. Na Figura 5.20, temos o perfil de alta resolução filtrado do Exemplo 3, obtido pela metodologia do ajuste de energia, comparado com o obtido pela metodologia proposta por NELSON & MITCHELL (1991). Numa análise destes perfis, percebe-se que o perfil de alta resolução filtrado obtido por NELSON & MITCHELL (1991) assemelha-se muito ao perfil de baixa resolução. Esta característica deve-se ao fato de que o filtro obtido por esta metodologia é calculado a partir do conhecimento das funções resposta vertical das ferramentas de alta e baixa resolução. O conhecimento explícito das funções que interagem com a distribuição ideal de condutividades confere a esta metodologia, um controle quase que absoluto da linearidade do sistema. Mas em dados de campo, uma vez que não conhecemos a distribuição ideal de condutividades da formação, e além do mais, as funções resposta vertical mudam com o valor da condutividade, este controle perde o sentido e assim, o critério do ajuste de energia pode oferecer uma maneira alternativa de

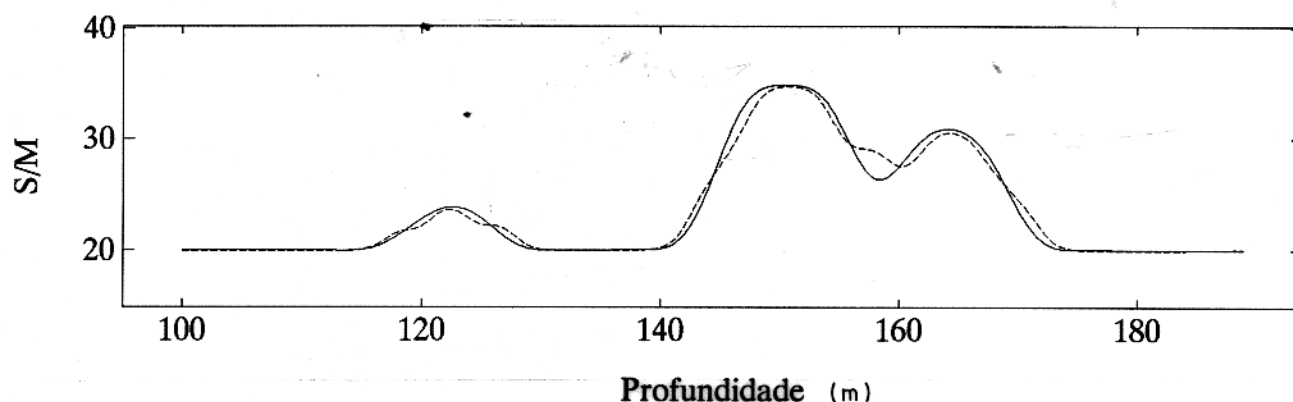


Figura 5.20 - Perfil de alta resolução filtrado pelo ajuste de energia (linha contínua) comparado com o obtido pela metodologia de NELSON & MITCHELL (1991)(linha tracejada).

estabelecer um controle mais próximo da realidade. Além disto, o cálculo dos coeficientes do filtro no domínio do espaço envolve o problema de inversão, de forma que o número de parâmetros para a definição das funções resposta vertical das ferramentas pode gerar problemas de ambiguidades. Na Figura 5.21, temos o perfil deconvolvido pelo método do ajuste de energia, comparado ao deconvolvido pelo método de NELSON & MITCHELL (1991). A função principal do perfil de alta resolução filtrado é servir de sinalizador para a passagem de informação do perfil de alta resolução para o perfil de baixa resolução. Isto significa que nos trechos de boa correlação, as medidas do perfil de baixa resolução podem ser corrigidas através da informação vinda do perfil de alta resolução, neste trecho. No entanto, se o perfil de alta resolução filtrado passar a ser idêntico ao perfil de baixa resolução, toda a informação contida no perfil de alta resolução passará a fazer parte do perfil deconvolvido. A Figura 5.21 mostra exatamente isto, e podemos reparar que o nível de ruído fez com que as medidas do perfil deconvolvido pelo método de NELSON & MITCHELL (1991) ultrapassasse os valores da distribuição ideal. Esse excessivo ganho de informação deve ser encarado com reservas, uma vez que os perfis de alta resolução tendem a incorporar, de forma acentuada, os efeitos de poço, de forma que estas informações não devem ser repassadas para o perfil de baixa resolução.

5.6 EXEMPLO 6

Até aqui, vimos a aplicação da metodologia em perfis sintéticos relativamente bem comportados, onde a distribuição de camadas obedecia um padrão pré-estabelecido, a fim de

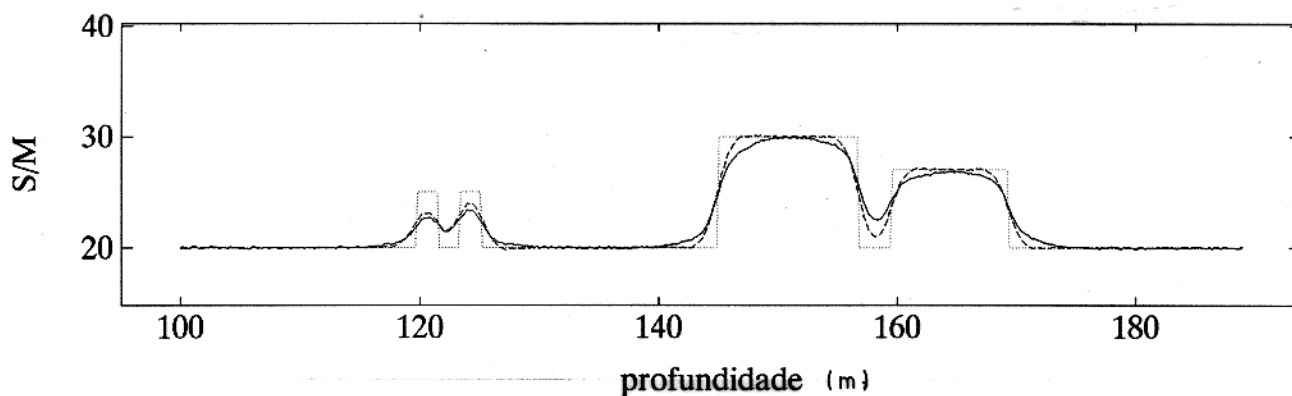


Figura 5.21 - Perfil de baixa resolução deconvolvido pelo método do ajuste de energia (linha contínua), comparado ao deconvolvido pelo método de NELSON & MITCHELL (1991) (linha tracejada).

simular algumas características normalmente observadas nos perfis de poços. Neste exemplo, a formação simulada tem uma distribuição aleatória de camadas assim como os valores de suas espessuras e condutividades também são aleatórios. Na Figura 5.22, temos o perfil de alta resolução para esta formação. A menor espessura de camada é de 3 metros e a maior é de 20 metros, de forma que a ferramenta de investigação rasa consegue obter leituras da condutividade verdadeira por toda a extensão do perfil. Na Figura 5.23, temos o perfil de investigação profunda para esta formação. Podemos notar que em algumas camadas o valor da condutividade é menor neste perfil do que no perfil de investigação rasa. Este efeito deve-se a invasão do filtrado da lama, que influencia as medidas de alta resolução. Mas na camada marcada pelo círculo, nas profundidades entre 270 e 280 metros, notamos que existe uma diferença de quase 8 S/M em relação ao perfil de alta resolução. Esta diferença não se deve ao efeito de invasão, uma vez que nesta camada, ambas as curvas assumem tendências diferentes. Esta ocorrência poderia ser atribuída à algum problema na parede do poço tal como um desmoronamento, por exemplo. Neste trecho, podemos observar claramente que não existe correlação entre os perfis de alta e baixa resolução. A Figura 5.24 mostra nitidamente esta tendência de anticorrelação entre os perfis de alta e baixa resolução vertical através do perfil de alta resolução filtrado. Uma vez que este perfil reflete o comportamento de baixa resolução da zona de investigação rasa, a tendência que esta curva assume no intervalo circundado, que é oposta a curva de baixa resolução neste mesmo intervalo, reforça a hipótese da existência de problemas na parede do poço nesta região. Além disto, as correções são calculadas em

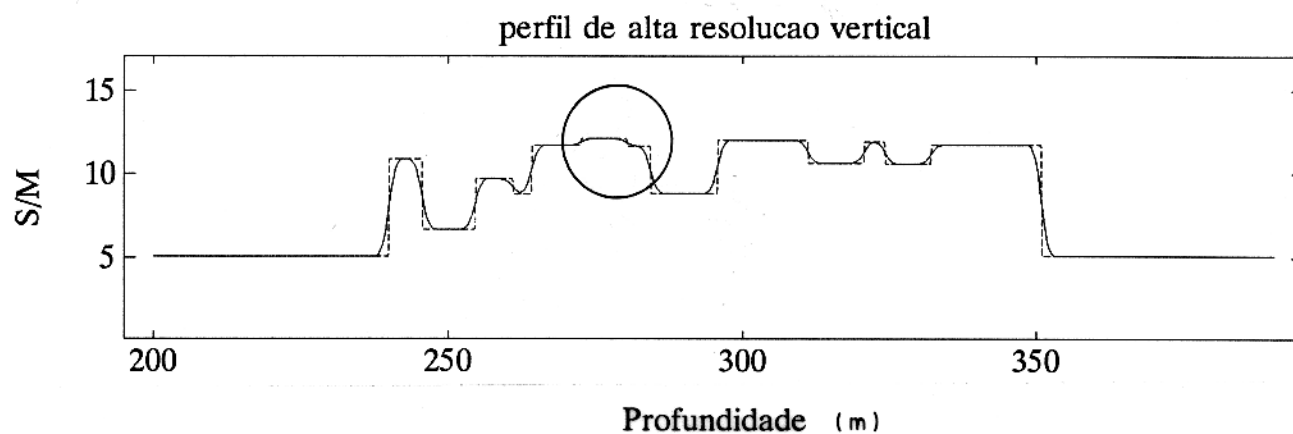


Figura 5.22 - Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona rasa (linha tracejada) para uma formação com distribuição de camadas aleatória, e o perfil de alta resolução vertical (linha cheia).

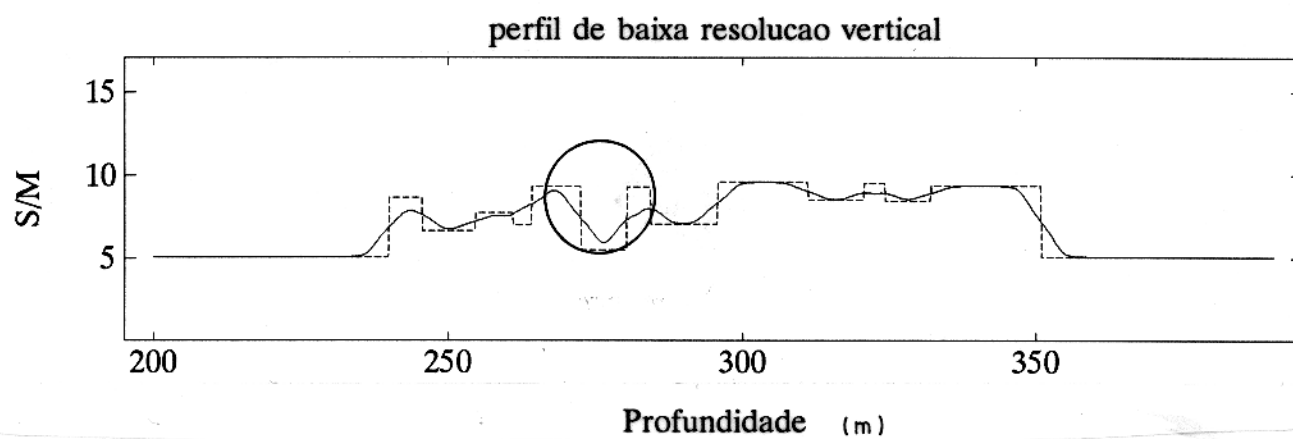


Figura 5.23 - Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona profunda para uma formação com distribuição de camadas aleatória (linha tracejada) e o perfil de baixa resolução vertical (linha cheia).

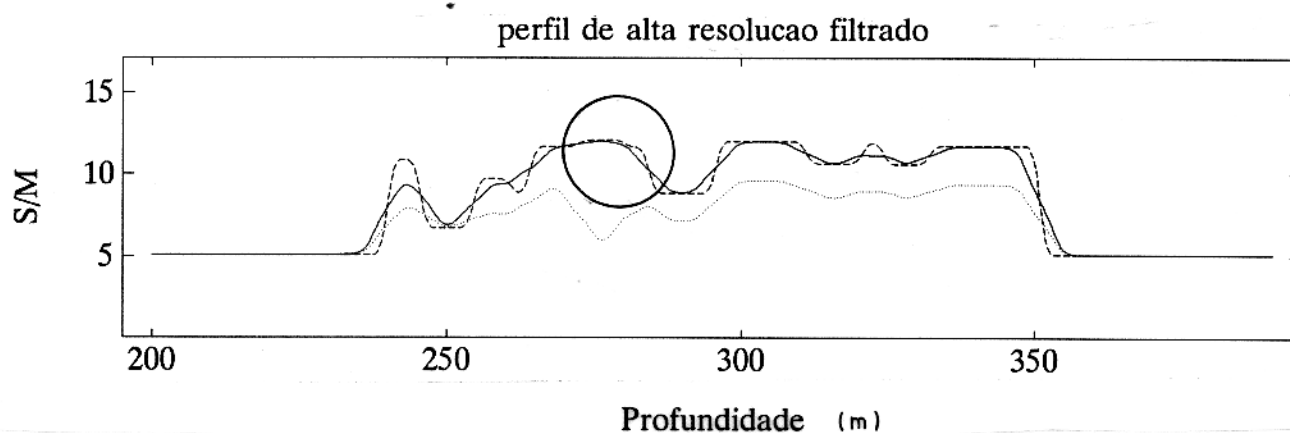


Figura 5.24 - Perfil de alta resolução filtrado(linha cheia) juntamente com perfil de alta resolução(linha tracejada) e o perfil de baixa resolução(linha pontilhada).

cada ponto, a partir de intervalos de boa correlação entre os perfis. Uma vez que o algoritmo usado para realizar esta busca não foi capaz de achar um intervalo de boa correlação, que satisfizesse o requisito de linearidade entre os perfis, o trecho não correlacionável permanece praticamente inalterado. Na Figura 5.25, temos o perfil de baixa resolução deconvolvido. Podemos observar que a metodologia funcionou satisfatoriamente bem para todo o perfil, com excessão do trecho circunscrito. Neste trecho, a curva original não se modificou. Isto é uma característica do tratamento estatístico aplicada à correção do perfil de baixa resolução, onde o objetivo principal é procurar o melhor intervalo de correlação entre os perfis para cada ponto considerado. Uma vez que neste trecho a correlação é praticamente inexistente, os coeficientes de correlação obtidos para cada ponto deste intervalo é muito pequeno. Como o coeficiente de correlação serve de ponderador para a correção a posteriore, um valor muito pequeno para este coeficiente acarretará num valor também muito pequeno para a correção. Assim, a ponderação da medida corrigida, feita em tres níveis, fará com que os pontos do intervalo circunscrito sejam associados a um coeficiente de correlação $\rho = 0$. Desta forma é importante que os perfis de alta e baixa resolução sejam correlacionáveis.

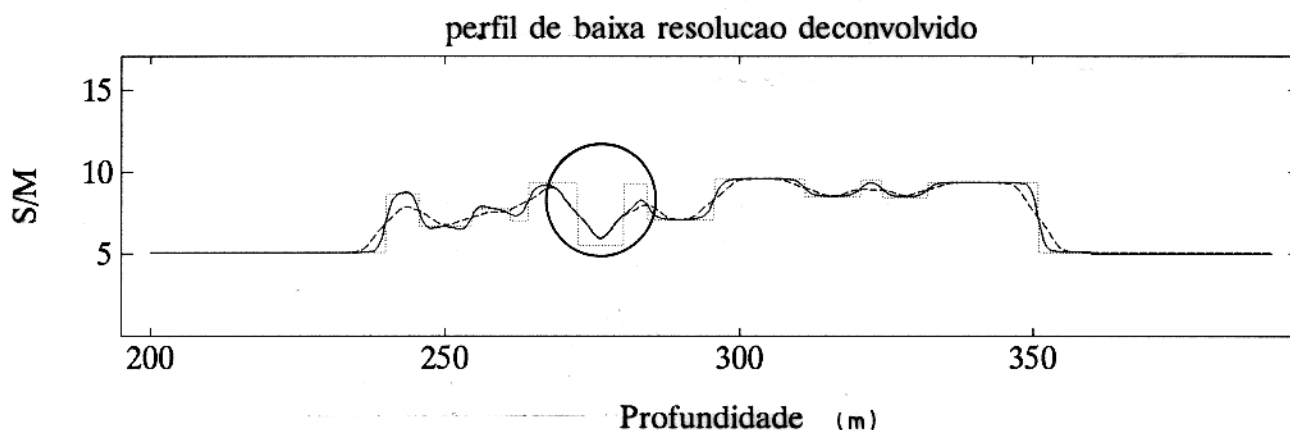


Figura 5.25 - Perfil de baixa resolução vertical deconvolvido (linha cheia) comparado ao perfil de baixa resolução convencional (linha tracejada) e a distribuição ideal de condutividades da zona de investigação profunda (linha pontilhada).

5.7 EXEMPLO 7

Em certas situações, não nos é possível dispormos de um conjunto de perfis de alta e baixa resolução, que meçam a mesma propriedade petrofísica, a fim de processar a deconvolução sobre o perfil de baixa resolução. Desta forma, é necessário proceder numa análise em cima dos perfis disponíveis, a fim de encontrar um perfil de alta resolução que seja correlacionável com o perfil de baixa. Um problema que pode eventualmente surgir, se optarmos por esta saída, é a diferença de ordem de grandeza entre as medidas registradas pela ferramenta. Uma vez que propriedades petrofísicas diferentes, não necessariamente possuem a mesma ordem de grandeza, pode acontecer que durante a aplicação da metodologia aos perfis disponíveis, nos deparemos com problemas de compatibilidade de escalas. Na Figura 5.26 temos o perfil de baixa resolução que mede condutividades entre 10 e 40 S/M. Na Figura 5.27 temos o perfil de alta resolução vertical, que registra um propriedade petrofísica fictícia, com uma variação entre 1000 e 4000 unidades fictícias (U.F.). Ambas as distribuições de camadas, espessuras e valores medidos são de naturezas aleatórias e é interessante observar que além dos perfis estarem fora de escala, também temos a presença de uma camada espelhada nas profundidades entre 580 e 602 metros. Supondo que as condições de poço sejam boas por todo o intervalo registrado, então, o efeito de espelhamento observado nas profundidades entre 580 e 602 metros não deve ser atribuído aos problema comuns de poço, e sim a uma

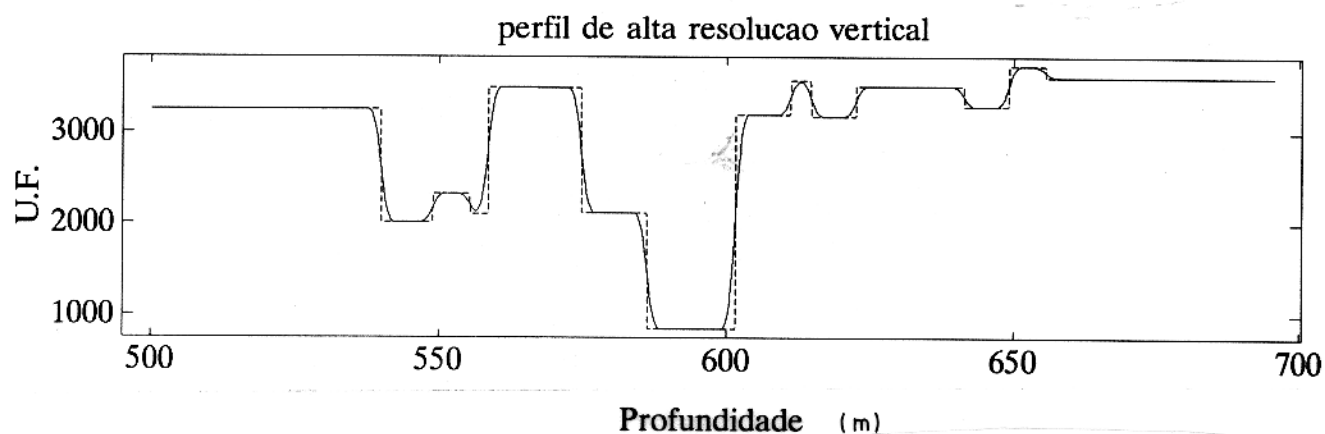


Figura 5.26 - Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona de investigação rasa (linha tracejada) para uma formação com distribuição de camadas aleatória, e o perfil de baixa resolução vertical (linha cheia).

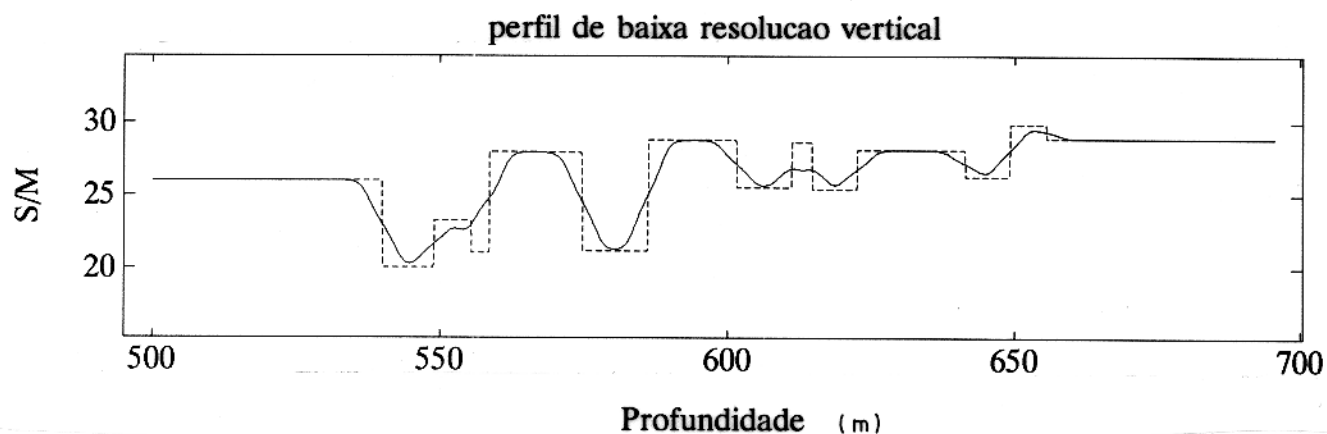


Figura 5.27 - Acima, temos a distribuição ideal de condutividades da zona de investigação profunda (linha tracejada) para uma formação com distribuição de camadas aleatória, e o perfil de alta resolução vertical (linha cheia).

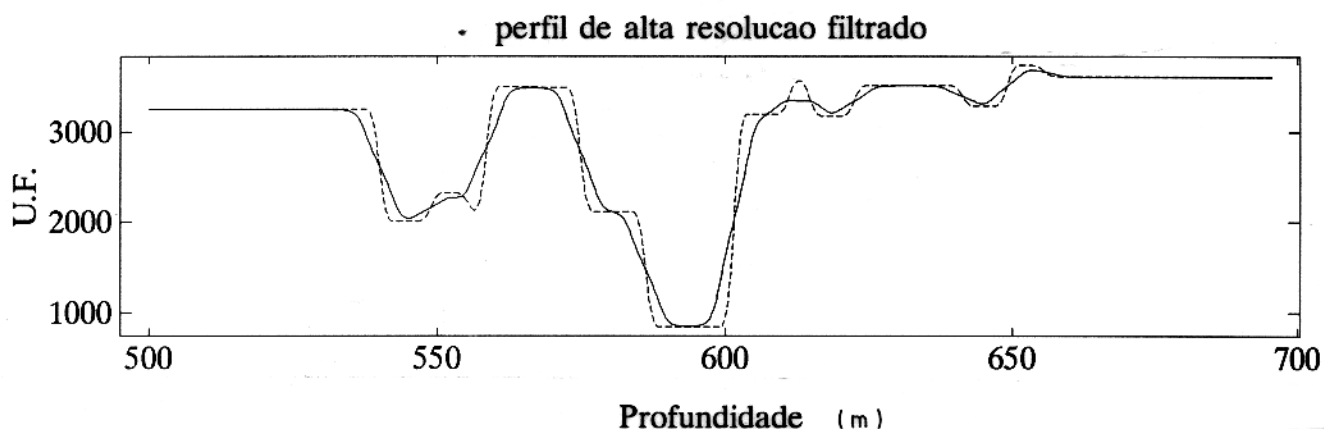


Figura 5.28 - Perfil de alta resolução filtrado(linha cheia) juntamente com perfil de alta resolução(linha tracejada).

determinada litologia, cuja a composição mineralógica por exemplo, produza nesta ferramenta fictícia, uma deflexão contrária a da observada pela ferramenta de baixa resolução vertical. Na Figura 5.28, temos o perfil de alta resolução filtrado juntamente com o perfil de alta resolução. Finalmente, temos na Figura 5.29 o perfil de baixa resolução deconvolvido, comparado ao perfil de baixa resolução convencional. Podemos observar que a metodologia funcionou muito bem para todo o perfil, inclusive no trecho espelhado. No exemplo anterior, a metodologia não havia funcionado no trecho espelhado devido ao fato de que o algoritmo utilizado não ter conseguido achar um intervalo de boa correlação para os pontos contidos no trecho espelhado. Mas para este exemplo, a faixa de comprimento para a busca dos intervalos ótimos foi estendida, e assim, o algoritmo conseguiu obter intervalos de boa correlação e efetuar as correções dentro do trecho espelhado. O aumento da faixa de busca se deve ao fato de estarmos manipulando perfis que medem propriedades petrofísicas distintas e ao fato de que cada ferramenta possui uma resolução vertical diferente, daí a necessidade de se modificar o intervalo de busca para cada caso.

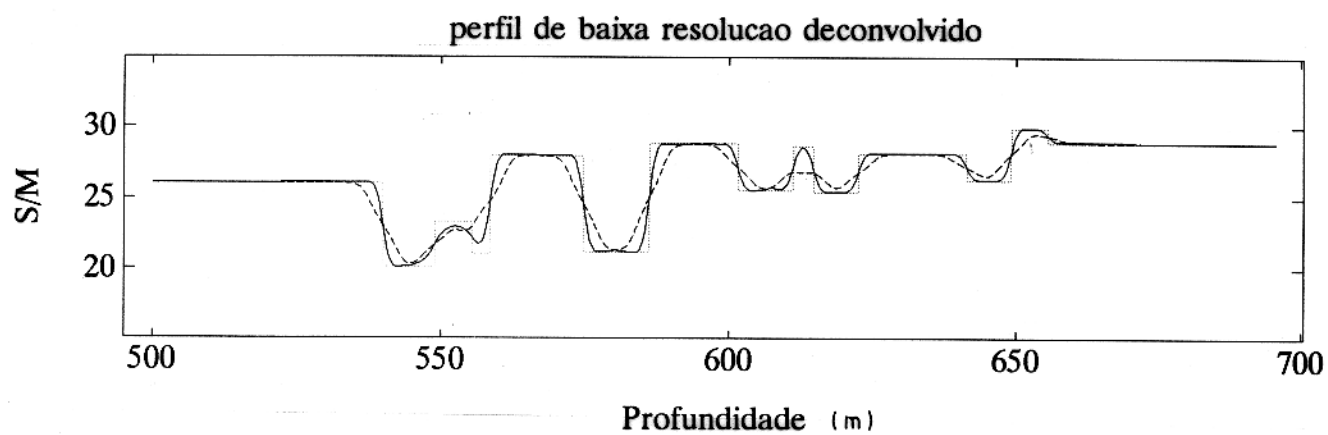


Figura 5.29 - Perfil de baixa resolução vertical deconvolvido(linha cheia) comparado ao perfil de baixa resolução convencional(linha tracejada) e a distribuição ideal de condutividades da zona de investigação profunda(linha pontilhada).

6 - APLICAÇÕES EM DADOS REAIS

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A aplicação dos processos deconvolutivos envolve a execução de uma série de procedimentos, e esta metodologia não foge a esta regra. Tais procedimentos visam facilitar e otimizar a aplicação do algoritmo deconvolutivo, evitando o emprego errado ou desnecessário do mesmo.

Como o objetivo final é melhorar a resolução vertical dos perfis de baixa resolução, assim como caracterizar a presença de litologias laminares, começaremos por descrever uma série de etapas que facilitarão a execução da metodologia do ajuste de energia, assim como a uma posterior análise de camadas finas.

A. IDENTIFICAÇÃO DE LITOLOGIAS LAMINARES :

Identificar a presença de camadas finas, nada mais é do que identificar nos perfis de poços, uma série de características associadas a este tipo de litologia. Dentre muitas, podemos destacar:

- a. Presença de variações agudas nos perfis **SPe GR**. Espaçamentos em torno de 2.5 cm e 5.0 cm já é um bom indicativo.
- b. Resistividades altas, mais do que o normal nos folhelhos, com variações.
- c. R_{wa} no mínimo o dobro de R_{wamin} .
- d. O perfil SFL é cheio de picos, indicando camadas finas com resistividades maiores do que a ferramenta ILD pode indicar.
- e. ϕ_D espelha ϕ_N , aproximando-se em camadas finas e separando-se em folhelhos.
- f. Separações no perfil MICROLOG indicam uma linha permeável em uma seção laminar.
- g. Os perfis EPT, FMS e DIPMETER mostram um alto grau de atividade, respondendo nas camadas finas.

- h. Perfis de testemunhos são inconsistentes.

A presença de mais de três destas características pode ser um forte indicativo de que a formação, sob a qual estamos considerando, apresenta litologias do tipo laminar.

B. SELEÇÃO DE PERFIS :

Uma vez identificados os possíveis sinais da presença de camadas finas, devemos escolher um conjunto de perfis dentre os disponíveis, que serão usados para uma análise mais aprofundada. Obviamente que esta seleção passa pela escolha de perfis alta e baixa resolução. É sempre bom lembrar que se for preciso deconvolver alguns perfis de baixa resolução, é necessário considerar a possibilidade de correlação entre os perfis. Uma escolha natural seria um perfil do tipo esférico ou microesférico focalizado, para se deconvolver os perfis de indução média e profunda, por exemplo.

C. SELEÇÃO DE ZONAS DE INTERESSE :

Na maioria das vezes não precisamos do perfil em toda a sua extensão. Assim, uma vez escolhido o conjunto de perfis a serem utilizados, é necessário selecionar zonas de interesse. Como exemplo, se zona de interesse num determinado poço recai entre as profundidades de 600 e 645 metros, devemos selecionar um trecho dos perfis SFL, ILD e ILD que poderá variar de 598 a 647. É importante sempre selecionarmos uma seção maior do que o intervalo de interesse, para que possamos assegurar o melhor desempenho possível da metodologia dentro da zona em que iremos trabalhar.

D. DECONVOLUÇÃO DAS ZONAS DE INTERESSE :

Neste passo, aplicamos o processo de deconvolução nas zonas de interesse demarcadas no perfil de baixa resolução vertical selecionado, obedecendo o critério exposto no procedimento C.

E. ANÁLISE DO PERFIL DECONVOLVIDO

Finalmente, devemos proceder a uma análise do perfil de baixa resolução deconvolvido,

comparando-o com o perfil de baixa resolução convencional, para avaliar o quanto o processo melhorou a qualidade da curva de baixa resolução, no sentido de se identificar camadas finas. Devemos, também, comparar o perfil deconvolvido com o perfil de alta resolução, a fim de avaliar se as indicações de camadas finas no perfil de alta resolução estão presentes no perfil deconvolvido.

6.2 HISTÓRICO DA BACIA POTIGUAR

O conjunto de perfis utilizados para a aplicação desta metodologia foram obtidos em poços no Rio Grande do Norte, na Bacia Potiguar. Esta bacia possui cerca de 38.000 Km^2 , dos quais 16.000 Km^2 estão imersos no Oceano Atlântico. Temos nela, a ocorrência de depósitos fluviais, deltáicos e marinhos, que são propícios à formação de camadas delgadas e reservatórios laminares. Como a localização dos poços, assim como os seus respectivos nomes, são informações confidenciais da PETROBRÁS, referenciaremos os poços por letras do tipo a, b, c e assim por diante.

6.3 EXEMPLO 1

Na Figura 6.1 temos a seção de testemunho geológico do poço c nas profundidades entre 680 e 705 metros. O testemunho se refere a uma seção de reservatório deste poço, como indica a coluna 2 do desenho. Na Figura 6.2.a, temos os perfis Caliper, SP e GR para o poço c, entre as profundidades de 650 e 710 metros. Na Figura 6.2.b, os perfis ID, IM e SFL do mesmo poço, na mesma seção. Podemos observar que o perfil de GR apresenta uma alta atividade entre as profundidades de 670 e 680 metros. Já o perfil SFL apresenta uma alta atividade neste intervalo, sendo que em certos pontos os valores de resistividades da curva SFL ultrapassam os da curva ILD para estes mesmos pontos. Nas profundidades entre 682 e 683.5 metros, a seção de testemunho mostra uma camada fina de folhelho entre duas de arenito, que pode ser observada no perfil no GR, mas que não aparece no perfil ID. A resolução vertical do ILD é de apenas 2 metros, impossibilitando-o a registrar um contraste de resistividade referente a esta camada. Já o perfil SFL, que tem uma resolução vertical de 0.25 metros, registra com perfeição esta camada (Figura 6.2.b). Com uma resolução vertical de 1 metro, o perfil ILM também consegue obter uma leitura desta camada, embora com uma sensibilidade menor do que o SFL. Assim, Podemos usar os perfis SFL e ILM para deconvolver o perfil ILD. Ecolhemos, então, um intervalo entre 660 e 688 metros e procedemos no ajuste de energia do perfil SFL. O resultado pode ser visto na Figura 6.3. Podemos observar que o perfil SFLF (Esférico focalizado filtrado), passa a ter agora bem menos sensibilidade do que

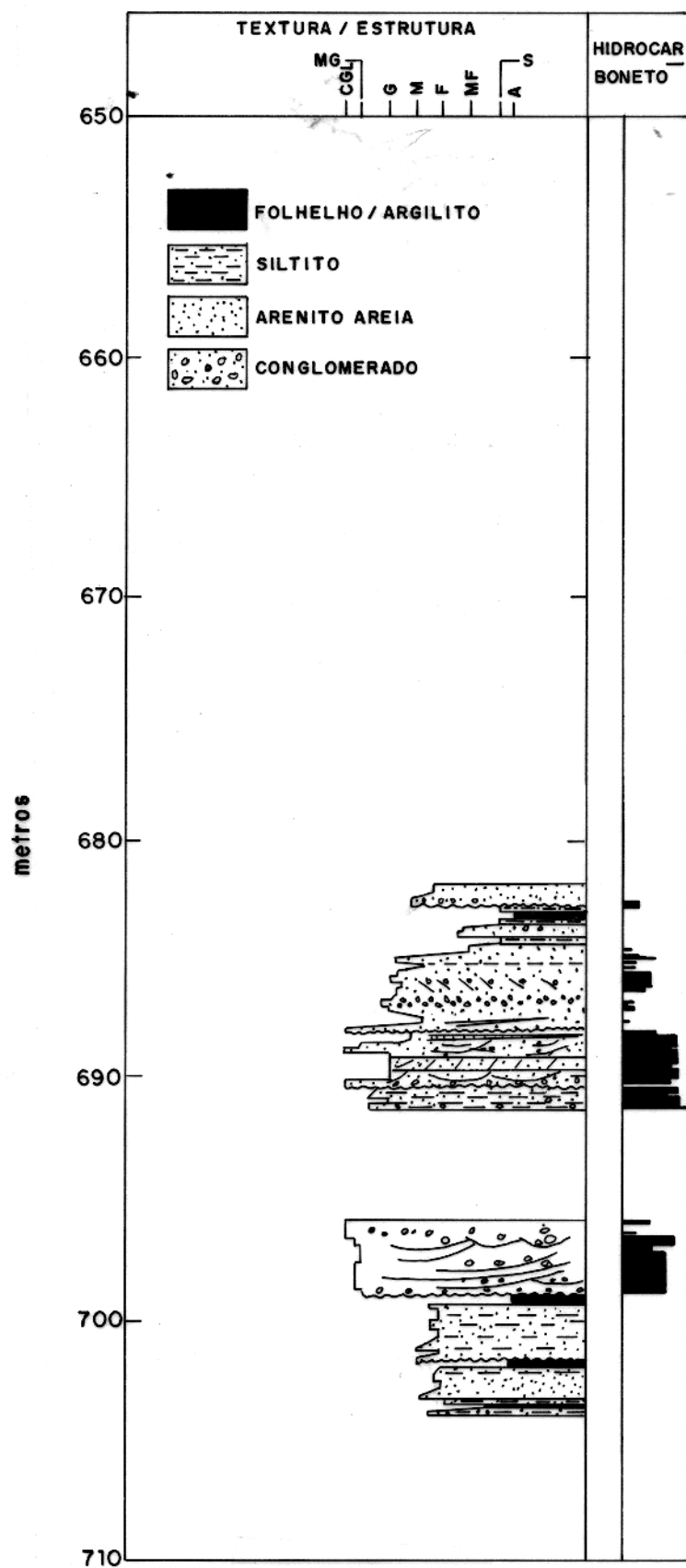


Figura 6.1 - Testemunho geológico do poço c referente a uma seção de reservatório.

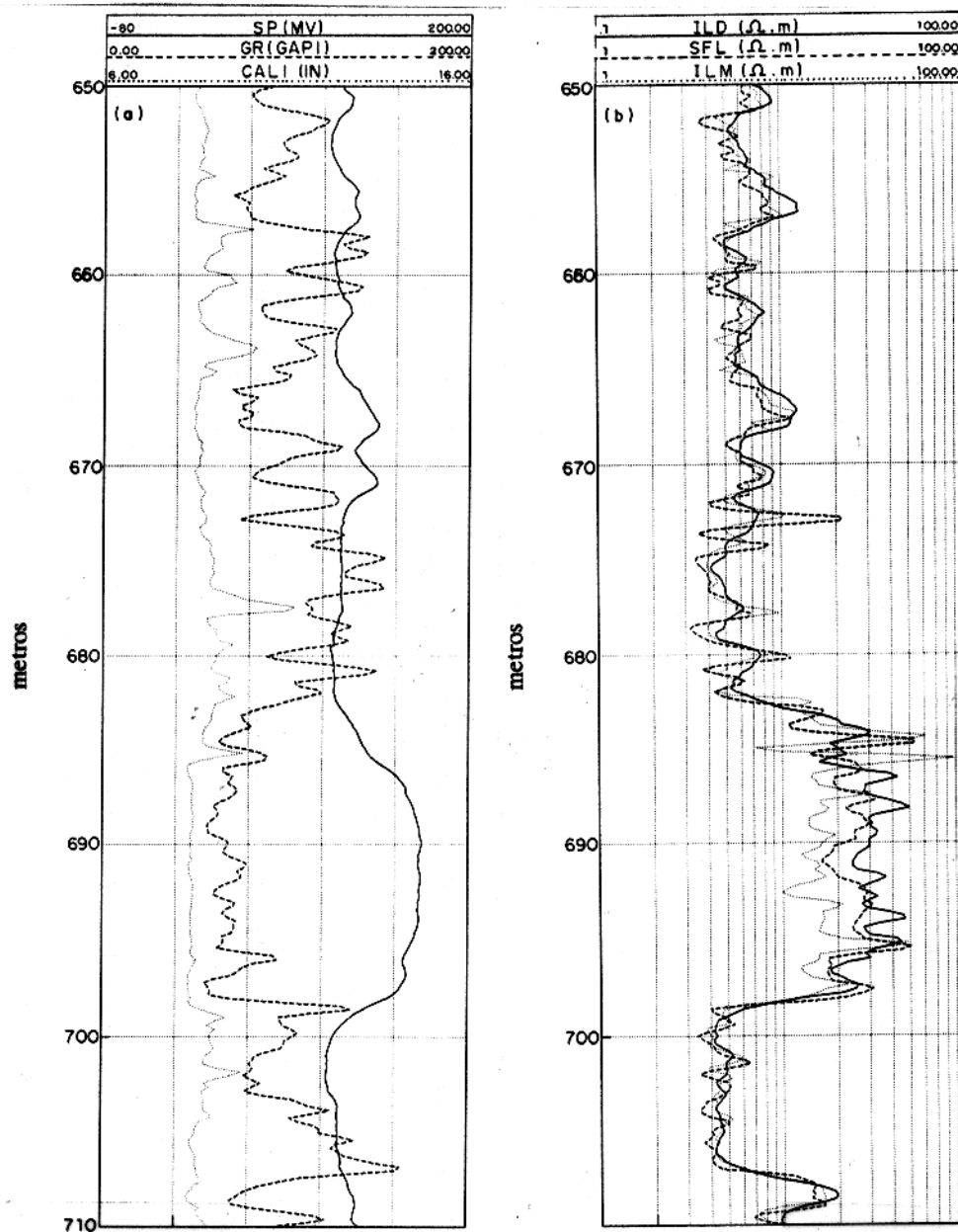


Figura 6.2 - Em (a), temos os perfis SP (Potencial Espontâneo), o GR (Raios Gama) e o Caliper, para uma dada seção do poço c. Em (b), temos os perfis de indução profunda ILD, o indução média ILM e o esférico focalizado para mesma seção.

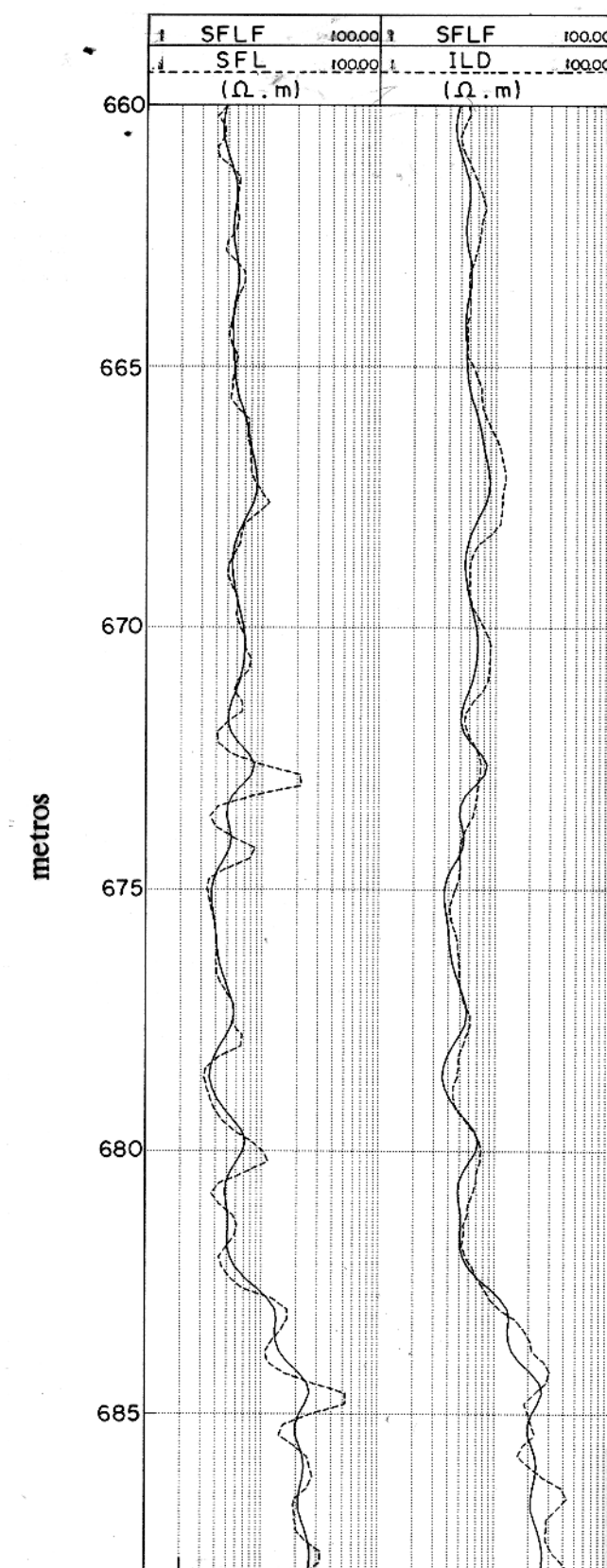


Figura 6.3 - Perfil SFLF comparado ao perfil SFL e ao perfil ILD. Ambos os perfis referem-se ao poço c.

SFL normal. Numa comparação do SFLF com o ILD já nos é possível perceber que existe uma boa correlação entre ambos os perfis. Nas profundidades entre 679 e 684, ambos os perfis tem boa correlação. Assim, é possível retirar informação do SFL neste intervalo e corrigir o perfil ILD, como pode ser observado na Figura 6.4.b. Observando agora o perfil GR (Figura 6.4.a), podemos notar que a deflexão devido a presença da camada fina de folhelho, aparece no ILD no meio entre duas camadas mais resistivas (profundidades entre 680 e 684 metros). Repare que embora haja correlação em outros trechos, o ILD não foi corrigido. Este efeito deve-se a ponderação em tres níveis feita sobre as medidas deconvolidas. As resistividades registradas em ambos os perfis para este trecho são quase iguais, i. e, o algoritmo só corrige o perfil de baixa resolução onde o perfil de alta resolução apresentar uma sensibilidade maior, além de obviamente ambos apresentarem boa correlação.

6.4 EXEMPLO 2

Na Figura 6.5 (a), temos os perfis SP e CALIPER e o GR nos intervalos entre 670 e 740 metros. Entre 680 e 710, podemos notar uma separação acentuada entre o GR e o SP. Como o CALIPER apresenta-se estável neste intervalo, o distanciamento entre os perfis GR e o SP pode ser um bom indicador de uma zona permo-porosa. Neste caso, como a lama é salina, a invasão nesta região tende a diminuir as medidas de resistividade dos perfis resistivos, principalmente nos perfis ILM e SFL (Figura 6.5 (b)). Temos ai, uma possível presença de uma formação arenito, enquanto que no intervalo entre 766 a 780 pode representar o aparecimento de um folhelho. Além disto, esta região está saturada por hidrocarbonetos (Figura 6.1), fazendo com que os valores de resistividade sejam altos. O efeito de invasão prejudica claramente o perfil ILM nas profundidades entre 670 e 684, mostrando que neste intervalo, a deconvolução aplicada ao perfil ILD não deverá alterar significativamente a curva original.

A Figura 6.6 mostra o perfil ILM comparado ao perfil ILMF assim como o perfil ILD comparado ao perfil ILMF. Observando os perfis, notamos que a correlação entre ILMF e ILM, entre as profundidades de 683 e 692 metros, é pobre. Assim, a deconvolução do perfil ILD neste intervalo quase não altera a curva original, como pode ser observado na Figura 6.7. Já nos intervalos entre 670 e 684 metros, a correlação é boa e o perfil ILD deconvolidado (ILDD) passa a ter a informação litológica do ILM. Aqui cabe uma comparação acerca dos resultados obtidos pela deconvolução do exemplo 1, feita com o perfil SFL. Na Figura 6.8, temos o perfil ILD deconvolidado pelo perfil ILM, comparado ao perfil ILD deconvolidado pelo perfil SFL. Fica claro que as correções feitas pelo perfil SFL são melhores que as realizadas pelo ILM, pois a resolução vertical do SFL é maior que a resolução do ILM. Além disto, Os

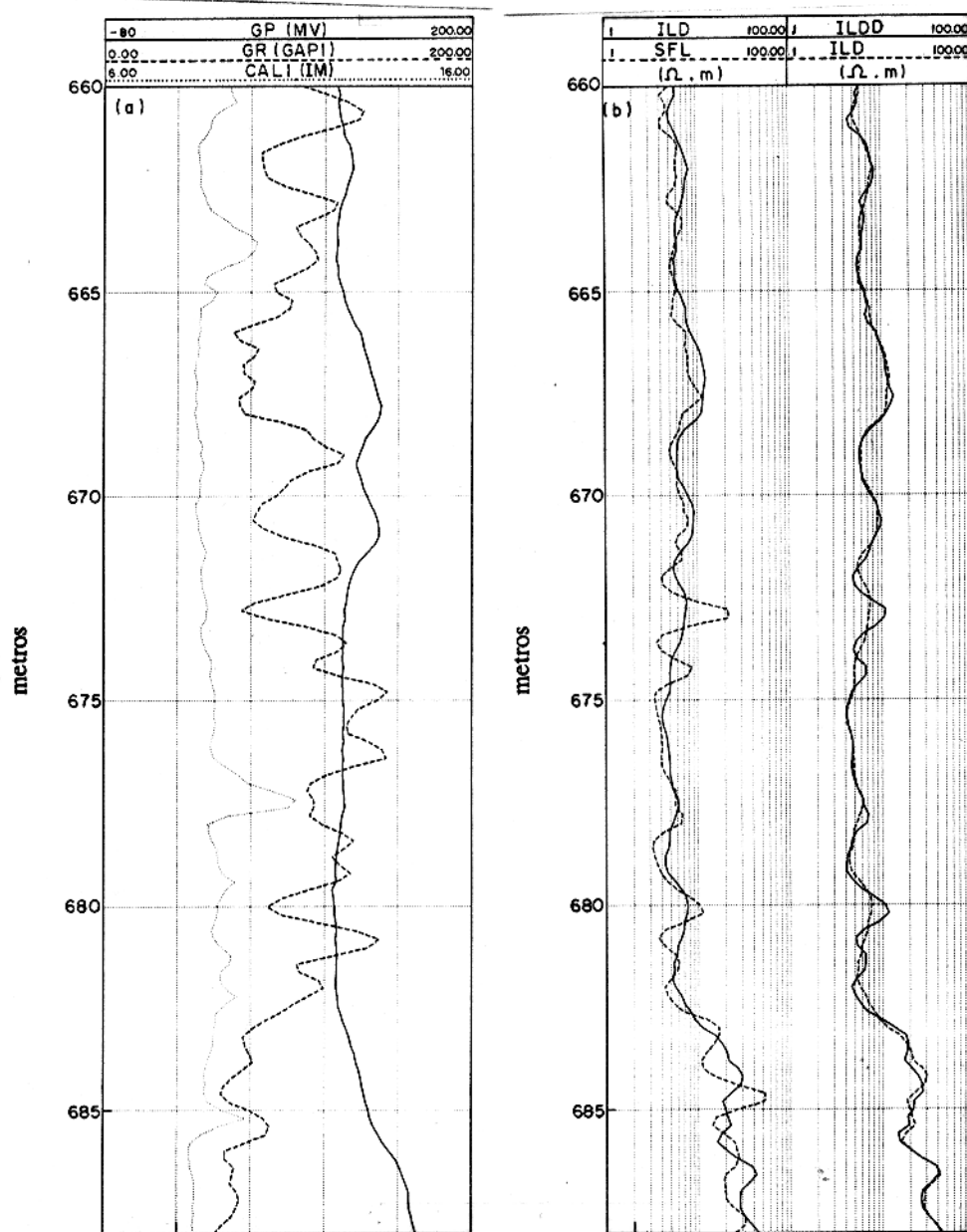


Figura 6.4 - Em a, temos os perfis SP, Caliper e GR do trecho selecionado. Em b temos o ILD comparado ao SFL e o perfil deconvolvido ILDD comparado ao perfil convencional ILD para este mesmo trecho.

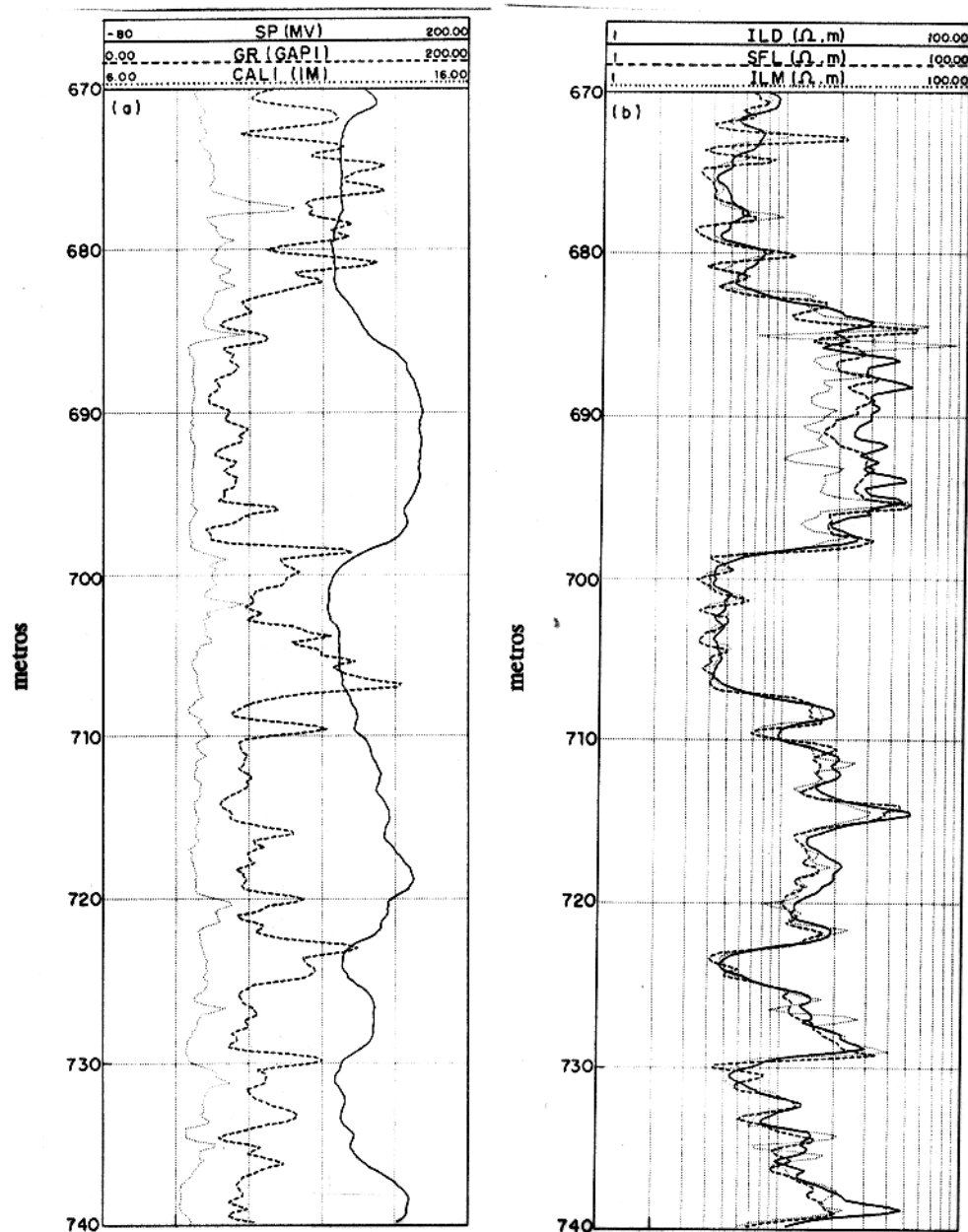


Figura 6.5 - Em (a), temos o SP, CALIPER e GR para uma dada seção do poço c. Em (b), os perfis ILD, ILM e SFL.

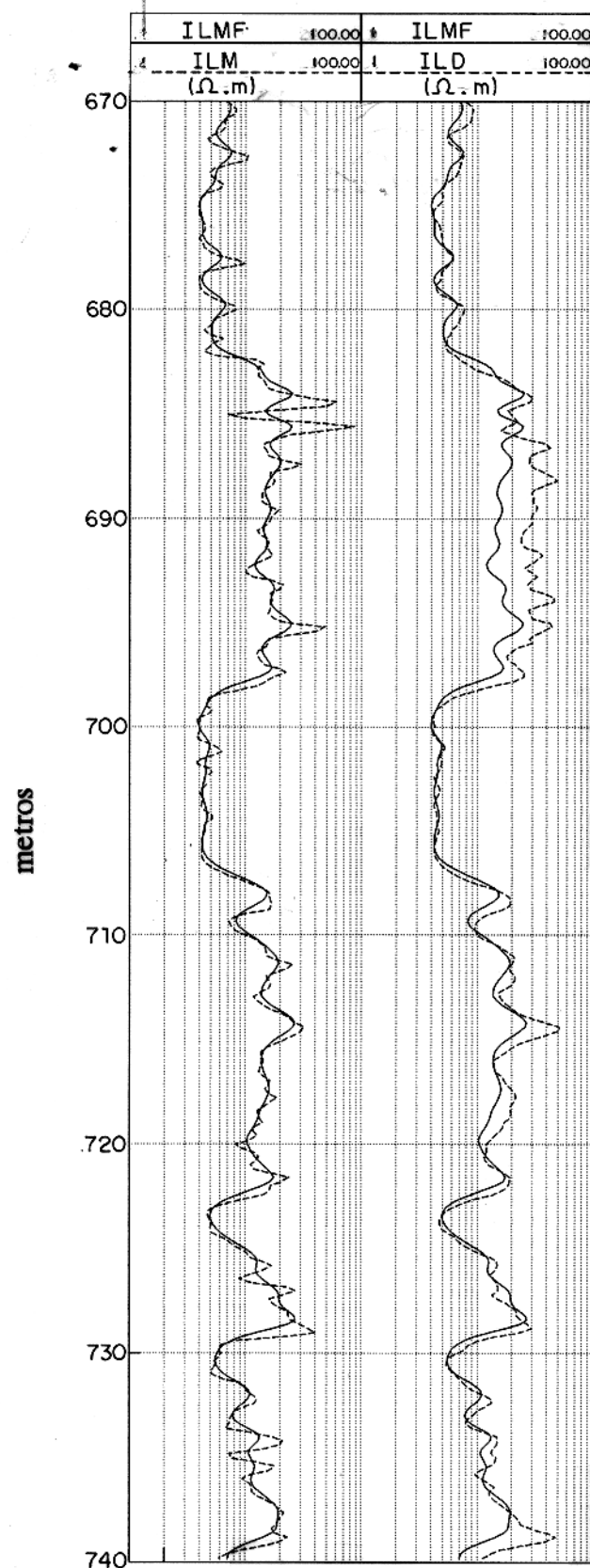


Figura 6.6 - Perfil ILM comparado ao perfil ILMF e o perfil ILMF comparado ao perfil ILD.

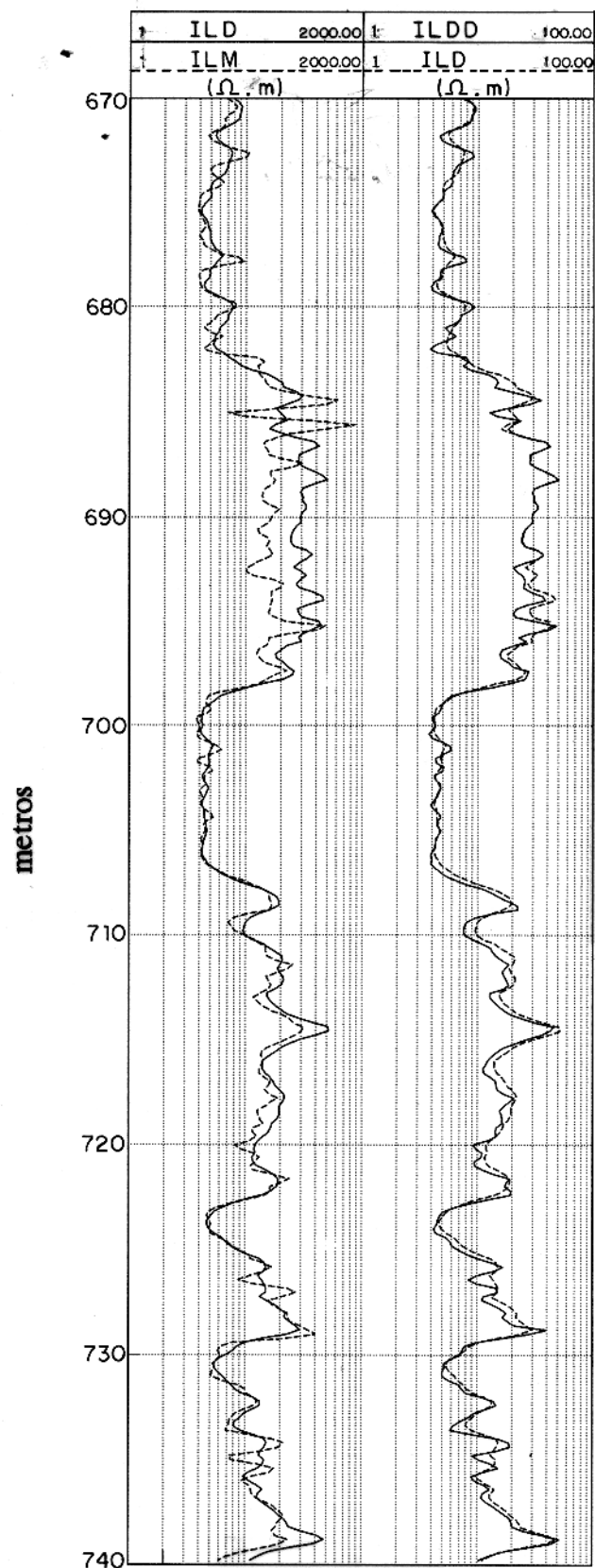


Figura 6.7 - ILM comparado ao ILD juntamente com o ILDD comparado ao ILD.

perfis de indução estão mais sujeitos a ruídos e aos efeitos de poço devido à sua configuração de bobinas. Isto poderia explicar a deflexão nos intervalos entre 683 e 687 metros.

6.5 EXEMPLO 3

Nos exemplos anteriores, tínhamos os testemunhos de sondagem como referência, desta forma, podíamos detectar com um certo grau de precisão, o tipo de litologia presente na formação, e até mesmo fazer certas considerações acerca da presença de camadas finas. Para este poço (poço e), não dispomos de testemunho, assim, as inferências acerca da presença de litologia laminar terão que ser feitas a partir dos perfis disponíveis. Na Figura 6.9 (a), temos os perfis SP, GR e CALIPER do poço e, entre as profundidades 500 600 metros. Novamente notamos que o perfil GR mostra-se bastante ativo, registrando picos alternados. Nas profundidades entre 530 e 535, observamos também que o GR apresenta valores excessivos para as formações do tipo folhelho. Nas profundidades entre 505 e 510 metros, notamos um afastamento entre o GR, que diminui, e o SP, que aumenta. Esta característica pode ser um indicativo de uma zona permo-porosa. Na Figura 6.9 (b), temos os perfis SFL, PHASOR-ILD (marca da SCHLUMBERGER) e o PHASOR-ILM (marca da SCHLUMBERGER). O perfil SFL apresenta uma alta atividade, sendo que em alguns pontos os valores registrados pelo SFL são maiores do que os da curva PHASOR-ILD. Notamos também que a possível zona permo-porosa entre as profundidades entre 505 e 510 metros possui uma baixa resistividade, o que pode significar que esta zona pode estar saturada por água. Além disto, notamos que no meio desta zona, o SFL dá um pico que ultrapassa a curva PHASOR-ILD. Tal variação não é registrada pelo PHASOR-ILD, sendo que no PHASOR-ILM, ela aparece como uma pequena deflexão. Estas variações são um bom indicativo da presença de camadas finas. Na Figura 6.10, temos os perfis SFL filtrados (SFLF) pelo ajuste de energia ao PHASOR-ID e ao PHASOR-ILM. Na primeira trilha, temos os perfis SFLF comparados ao SFL original. Na segunda trilha, temos SFLF ajustado ao PHID e, finalmente, na terceira trilha, temos o SFLF ajustado ao PHIM. Como era de se esperar, ambos os perfis SFLF passaram a apresentar uma resolução vertical menor do que o SFL original. Além disto, nota-se que o perfil SFLF ajustado ao PHASOR-ILM apresenta uma sensibilidade maior do que o SFLF ajustado ao PHASOR-ILD, visto que o PHID apresenta uma resolução vertical menor do que o PHIM. Na Figura 6.11, temos o resultado da deconvolução dos perfis PHASOR-ILD e do PHASOR-ILM pelo ajuste de energia do SFL. Podemos observar na trilha 2, que o perfil PHASOR-ILD deconvolvido passa agora a registrar o contraste de resistividades nas profundidades entre 505 e 510 metros, que antes só era possível observar no SFL (trilha 1). Já na trilha 3, nota-se que o perfil PHASOR-ILM apresenta uma leitura mais consistente, realçando mais os contrastes

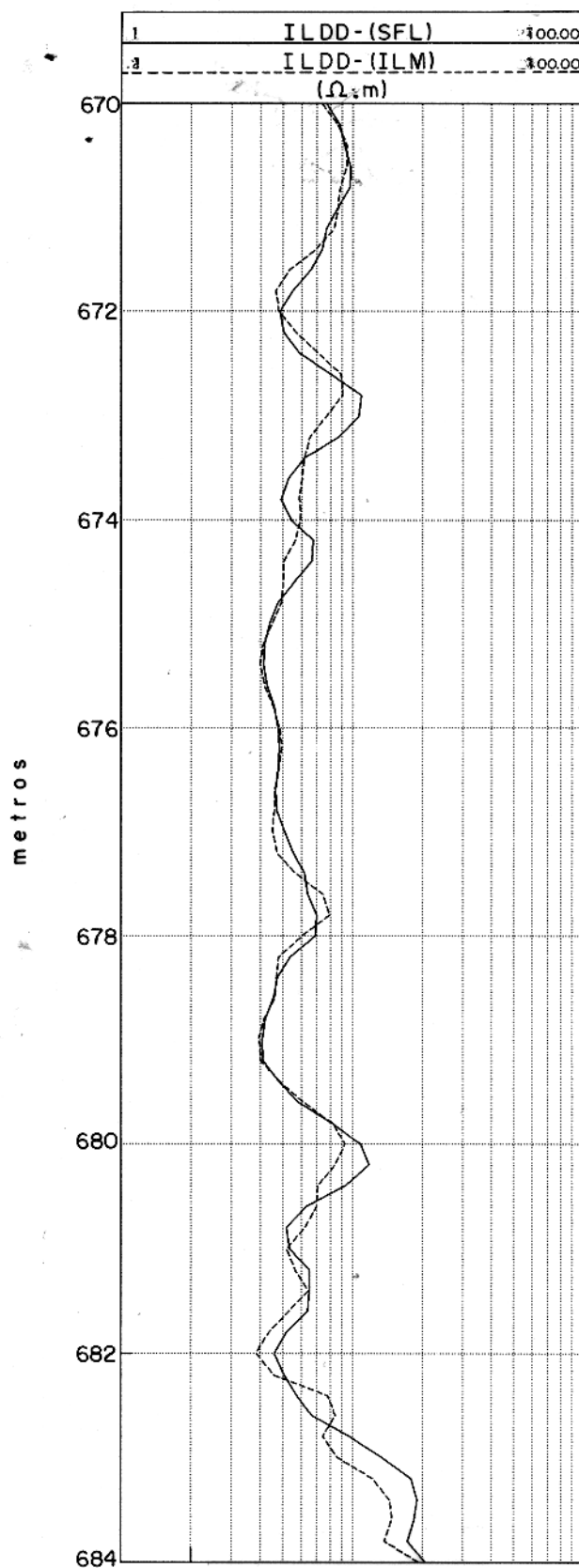


Figura 6.8 - Resultado da deconvolução do perfil ILD feita pelo perfil ILM e pelo perfil SFL.

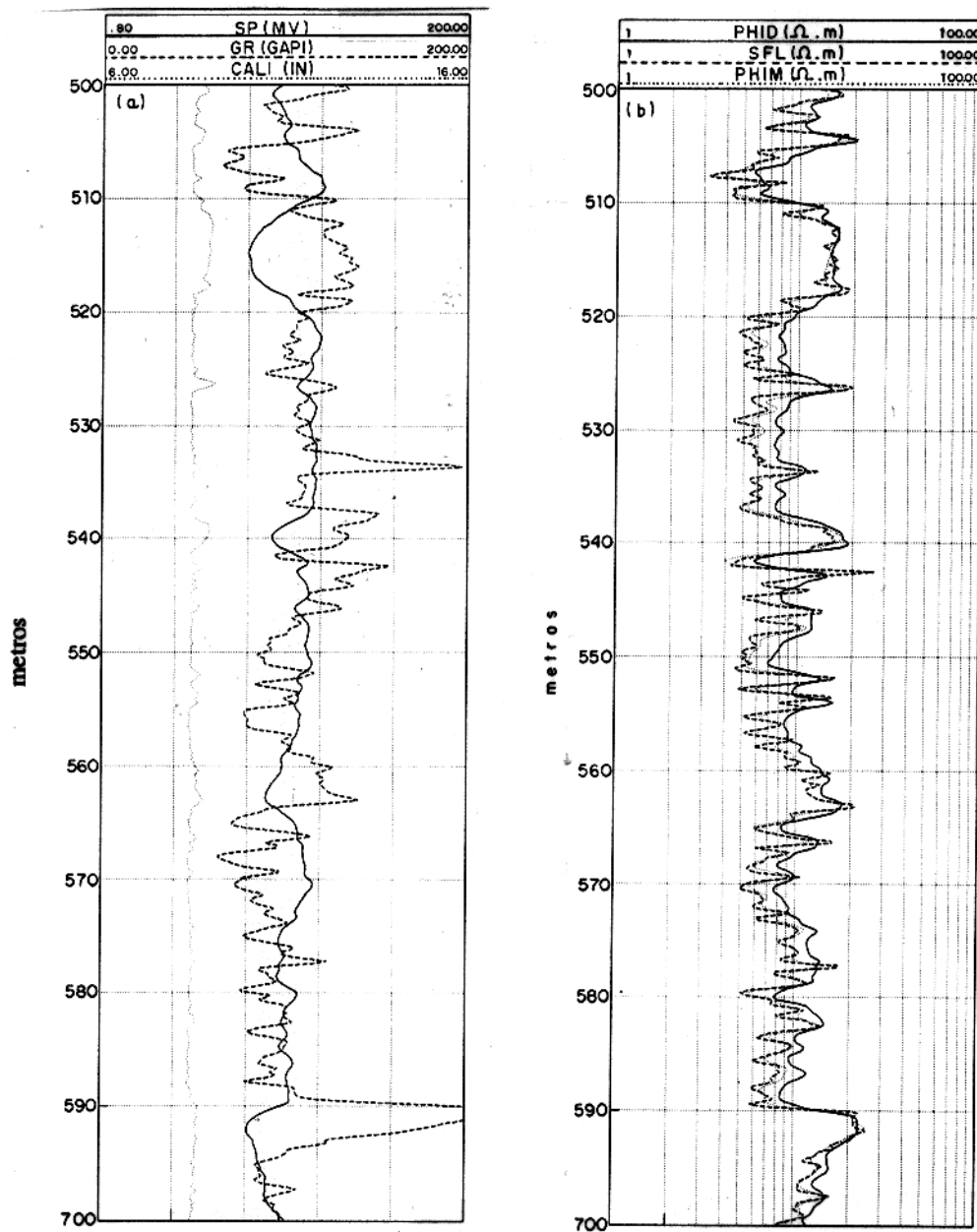


Figura 6.9 - Em (a), temos os perfis SP, GR e CALIPER. Em (b), temos o SFL, o PHASOR-ILD e o PHASOR-ILM. Todos os perfis referem-se ao poço e.

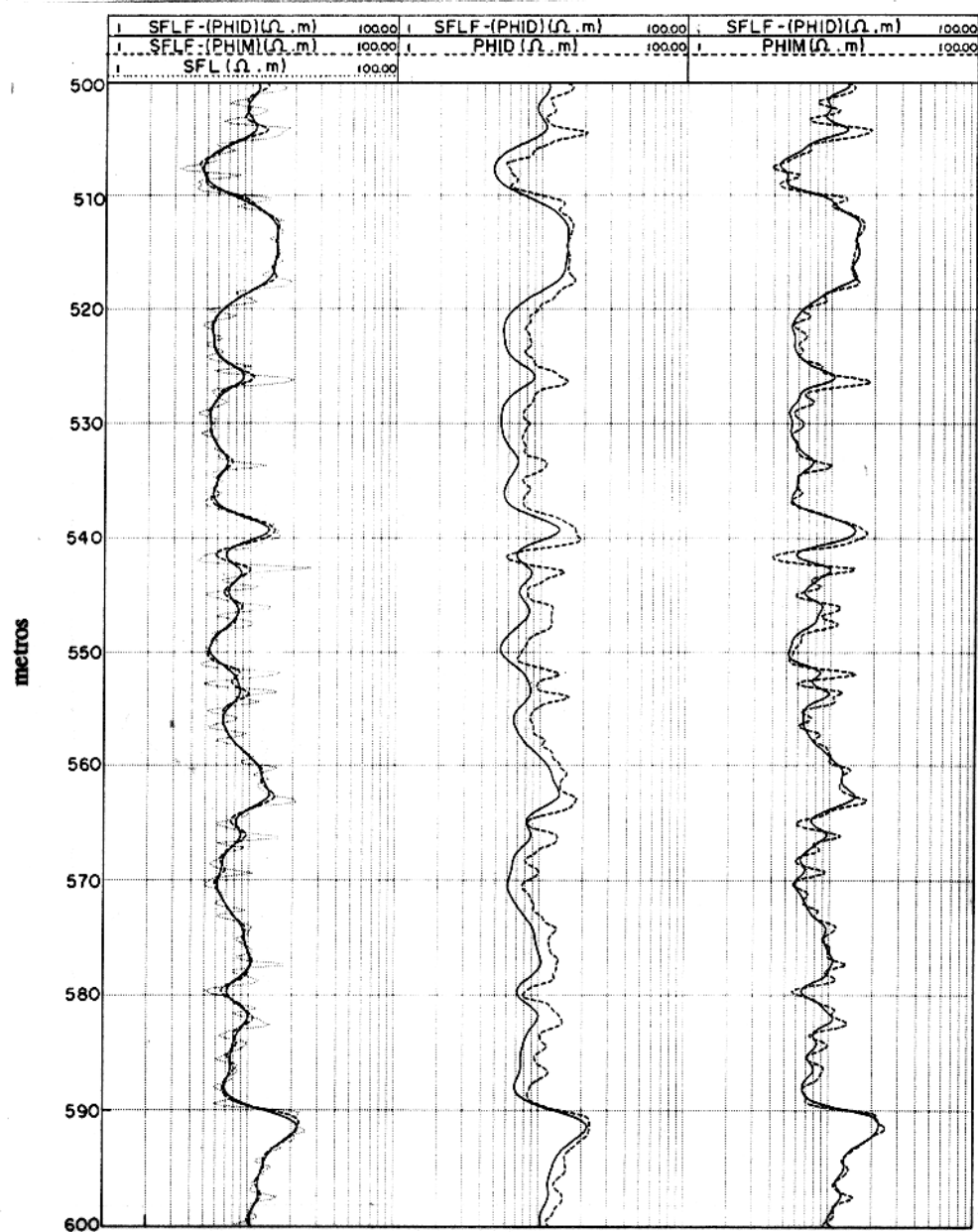


Figura 6.10 - Na trilha 1 perfis SFLF para um ajuste ao PHASOR-ILD e para um ajuste ao PHASOR-ILM. Na trilha 2 temos o perfil SFLF comparado ao perfil PHASOR-ILD. Na trilha 3 temos o perfil SFLF compadado ao perfil PHASOR-ILM.

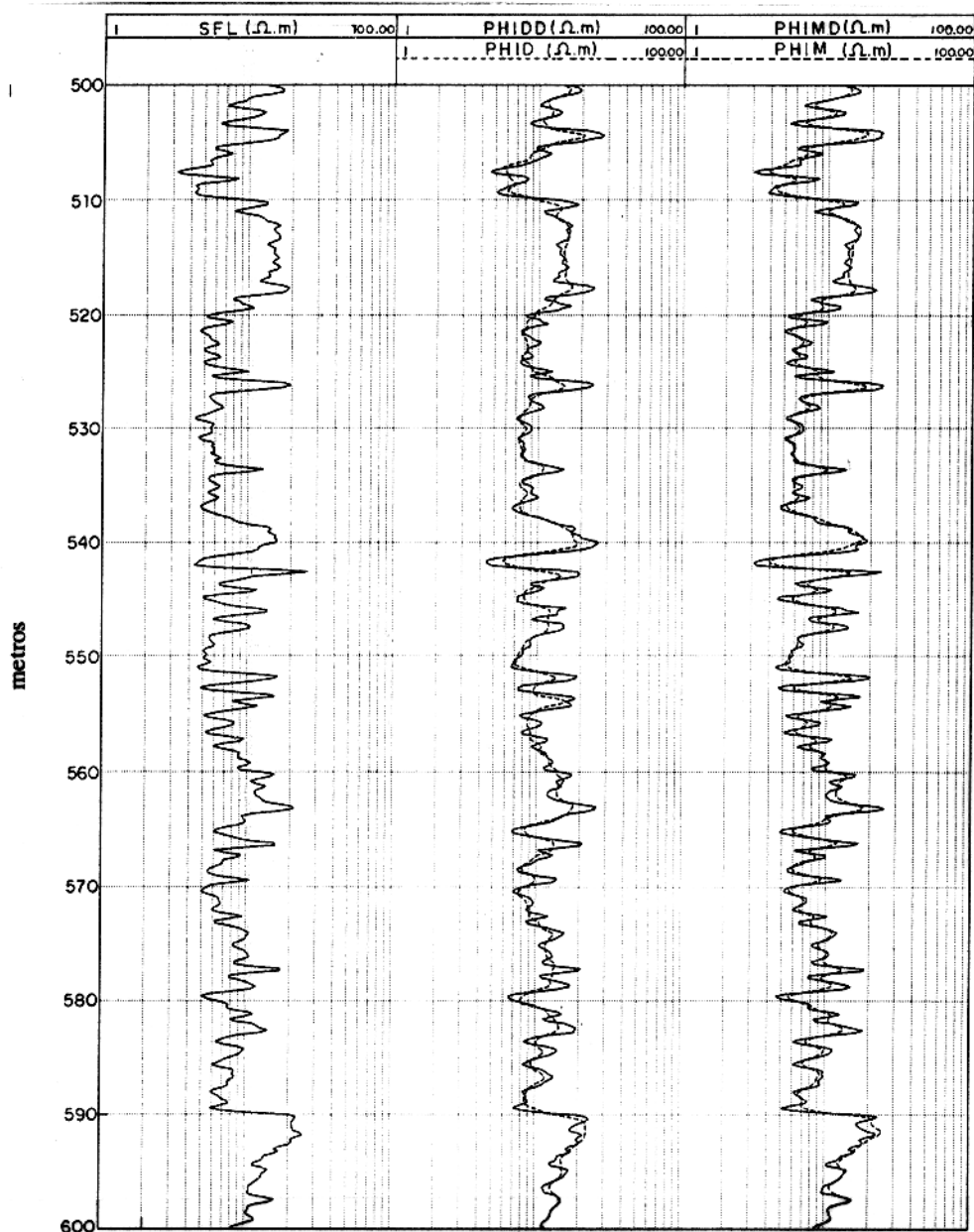


Figura 6.11 - Na trilha 1, temos o perfil SFL. Na trilha 2 temos o perfil PHASOR-ILD deconvolvido comparado ao PHASOR-ILD convencional. Na trilha 3 temos o o perfil PHASOR-ILM deconvolvido comparado ao perfil PHASOR-ILM convencional.

de resistividade.

6.6 EXEMPLO 4

Até aqui os exemplos de aplicação da metodologia limitou-se aos perfis de indução eletromagnética. Como já foi estabelecido anteriormente, o ajuste de energia não precisa estar restrito a perfis que meçam a mesma propriedade petrofísica, uma vez que o que importa é a correlação entre as curvas analisadas.

Um problema adicional que pode surgir quando utilizamos duas curvas que medem propriedades petrofísicas diferentes é a diferença na ordem de grandeza das medidas, i.e., a escala. Como exemplo, se usarmos o perfil SFL para deconvolver o RHOB, poderemos encontrar uma diferença de escala que pode chegar a ordem de 10^3 , pois o SFL obtém leituras que variam de 0.2 a 2000 *ohm.m*, enquanto que no RHOB as medidas giram entre 2 e 3 *g/c³*. Este problema é solucionado durante o procedimento de ajuste do perfil de alta resolução no domínio da frequência através de um ajuste simples de escala. Tal ajuste não afeta o espectro de energia do perfil de alta resolução, uma vez que esta energia está associada a função resposta vertical da ferramenta.

Neste exemplo, consideraremos o perfil de raios gama GR. A resolução vertical do GR é aproximadamente a mesma da extensão do cristal detector; normalmente gira em torno de 30.28cm. Normalmente o GR é usado para a identificação de litologias, mas devido a sua baixa resolução vertical, esta tarefa pode ficar bastante comprometida frente a formações do tipo laminares. Já o perfil MSFL possui uma resolução vertical de 15cm. Assim, aplicaremos a metodologiadado ajuste de energia sobre o perfil GR utilizando o perfil MSFL.

Na Figura 6.12, observamos o perfil MSFL e o perfil MSFL filtrado. Podemos notar que o MSFL deste trecho apresenta-se com uma alta atividade, o que pode ser um bom indicativo da presença de litologia alternada do tipo arenito/folhelho, com camadas finas. Na Figura 6.13 temos o perfil GR convencional e o GR deconvolvido(GRD). No perfil GRD, fica evidente a presença de camadas finas de folhelho e arenito, que pode ser observadas nas profundidades entre 564 e 570 metros.

6.7 EXEMPLO 5

A ferramenta SFL possui uma resolução vertical de 0.25 metros. Com esta resolução, podemos obter a resistividade da zona invadida assim como obter leituras em camadas finas.

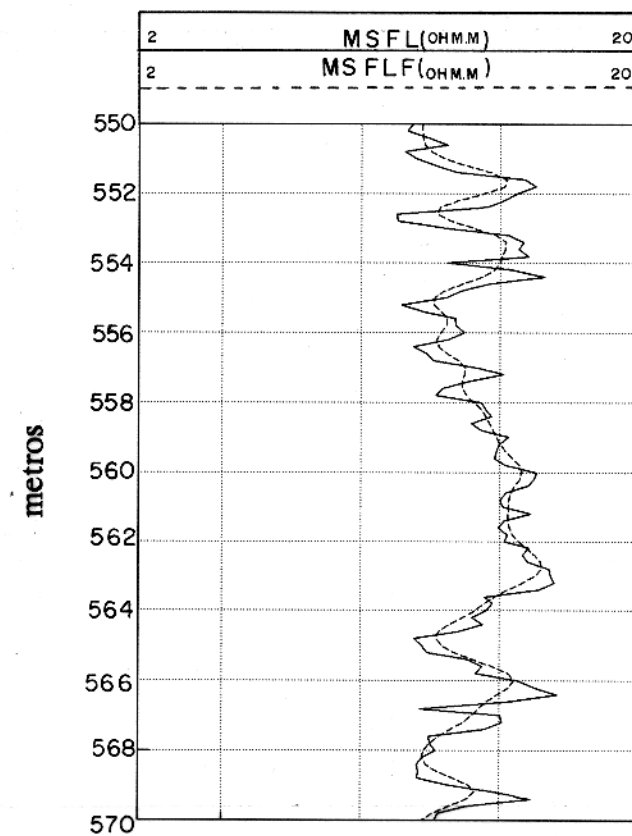


Figura 6.12 - Perfil MSFL juntamente com o MSFLF(MSFL filtrado).

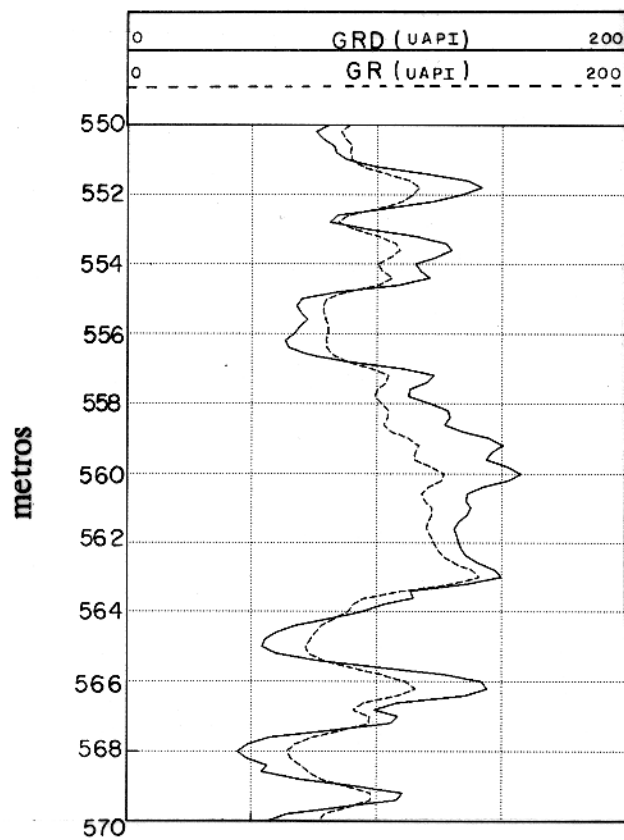


Figura 6.13 - Perfil GR convencional comparado ao perfil GR deconvolvido (GRD).

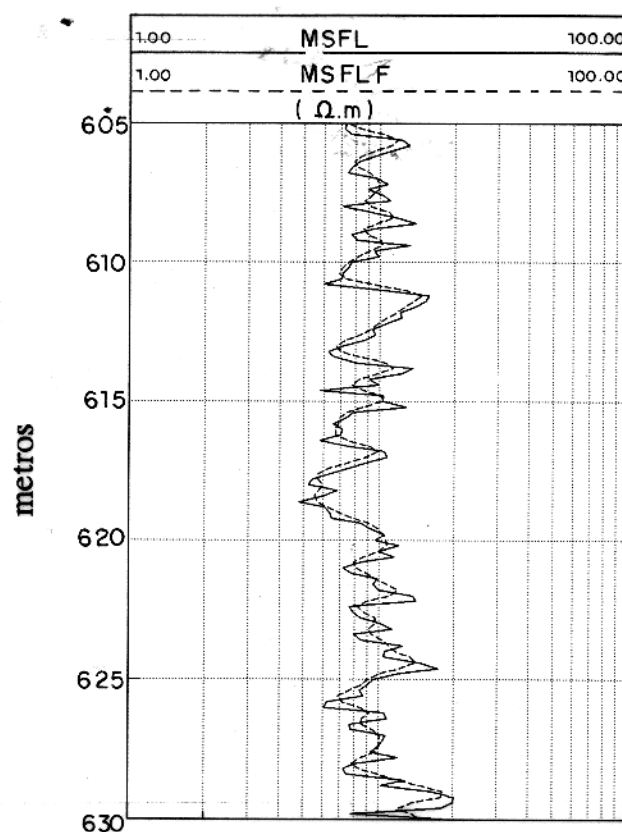


Figura 6.14 - Perfil MSFL juntamente com o MSFLF(MSFL filtrado).

Como esta ferramenta é menos influenciada pelas camadas adjacentes do que o indução média (ILM) e menos sensível aos efeitos de poço, se conseguirmos um perfil SFL com uma resolução vertical melhorada, teremos condições de obter leituras mais confiáveis em formações com camadas finas, possibilitando uma análise mais precisa da permeabilidade assim como uma precisão maior no cálculo da resistividade da zona invadida. Neste exemplo, usaremos o perfil MSFL, que tem uma resolução vertical de 0.15 metros para deconvolver o perfil SFL.

Na Figura 6.14, temos o perfil MSFL filtrado (MSFLF) comparado ao perfil MSFL. Neste trecho de perfil, O MSFL mostra uma alta atividade, alternando contrastes de resistividades de até 200 ohm, o que pode ser um forte indicativo da presença de litologia laminar. Na Figura 6.15, temos o perfil SFL deconvolvido (SFLD) juntamente com o perfil SFL convencional. Podemos observar que nas profundidades entre 605 e 610 metros, o perfil SFLD apresenta uma melhor definição do que o SFL convencional. Neste sub-intervalo, fica claro o efeito da deconvolução sobre o SFL, num intervalo de boa correlação.

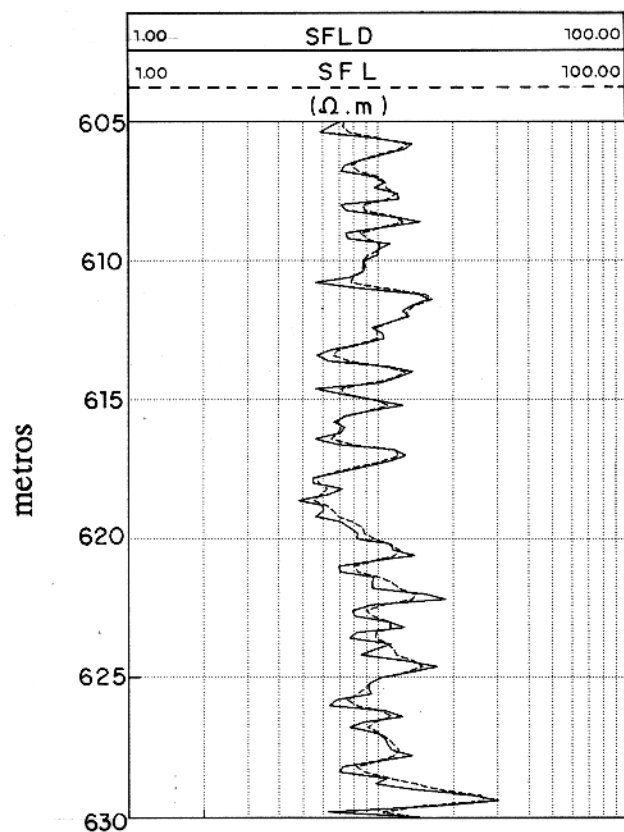


Figura 6.15 - Perfil SFL convencional comparado ao perfil SFL deconvolvido(SFLD).

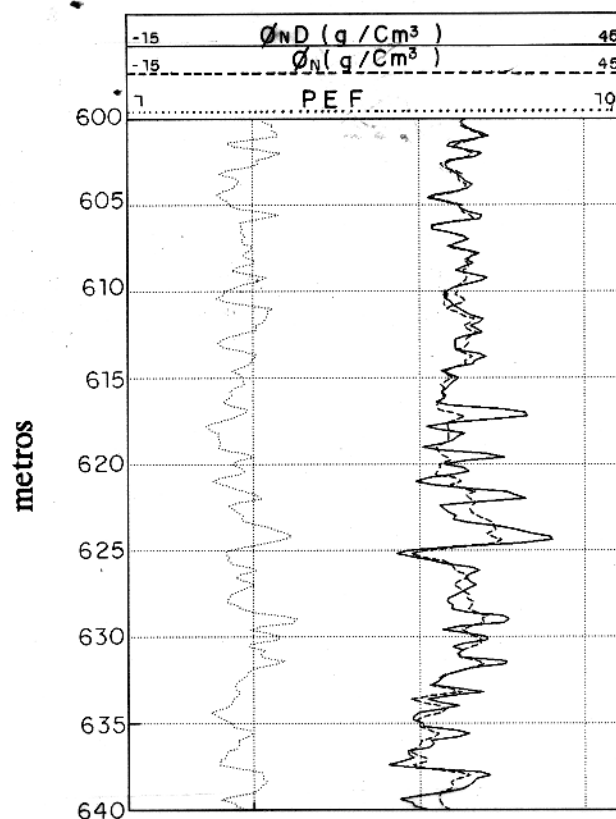


Figura 6.16 - Perfil ϕ_N convencional comparado ao ϕ_N deconvolvido $\phi_N D$ e o perfil Pe para o poço f .

6.8 EXEMPLO 6

Neste exemplo, temos o neutrão(CNL) com o perfil ϕ_N deconvolvido através do perfil de índice de absorção fotoelétrico Pe . O Pe possui uma resolução vertical de 5.1 centímetros, enquanto que o ϕ_n possui uma resolução vertical de 50.4 centímetros. O neutrão é importante para o cálculo da porosidade e volume de argila, sendo que podemos usá-lo também em camadas finas, se conseguirmos um aumento em sua resolução vertical. Na Figura 6.16, temos os perfis ϕ_N , o ϕ_N deconvolvido($\phi_N D$) e o Pe para o poço f . Podemos observar nestes perfis, que entre as profundidades entre 616 e 627 metros, o perfil $\phi_N D$ aparece com uma definição mais clara das camadas do que no perfil ϕ_N . Já nos trechos entre 605 e 608 metros, a curva parece praticamente inalterada. Neste trecho, praticamente não existe correlação entre os perfis.

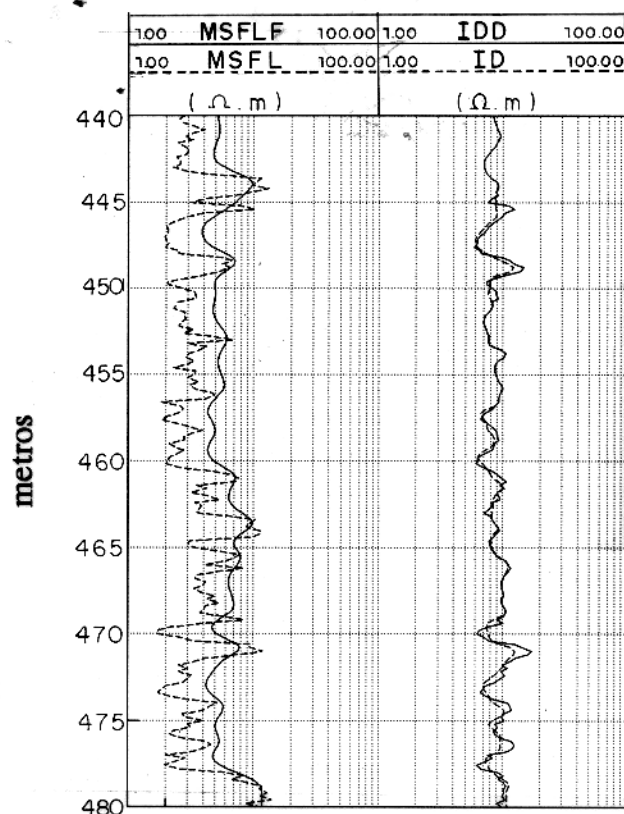


Figura 6.17 - Perfil de indução ILDD juntamente com o indução deconvolvido ILDD e o perfil MSFL.

6.9 EXEMPLO 7

Nos exemplos 1 e 2, apresentamos o perfil ILDD deconvolvido pelos perfis SFL e ILM. Agora, mostraremos um exemplo de perfil ILDD deconvolvido pelo perfil MSFL. O perfil de microresistividade possui uma resolução de 0.15 metros, sendo desta forma, útil para delineamento de camadas finas. Entretanto, o MSFL é um perfil muito sensível aos efeitos de poço, e assim, devemos ter o cuidado de não repassar estas informações para os perfis de baixa resolução.

Na Figura 6.17, temos o perfil MSFL juntamente com o indução convencional ILDD e o deconvolvido ILDD. Nota-se que o perfil MSFL mostra-se bem ativo, o que pode ser indicador de camadas finas. Nas profundidades entre 448 e 455 metros, podemos observar claramente uma melhora na resolução vertical no perfil ILDD, que passou a mostrar de maneira mais clara algumas feições só observadas no MSFL. Em outros trechos do perfil, o ganho de resolução

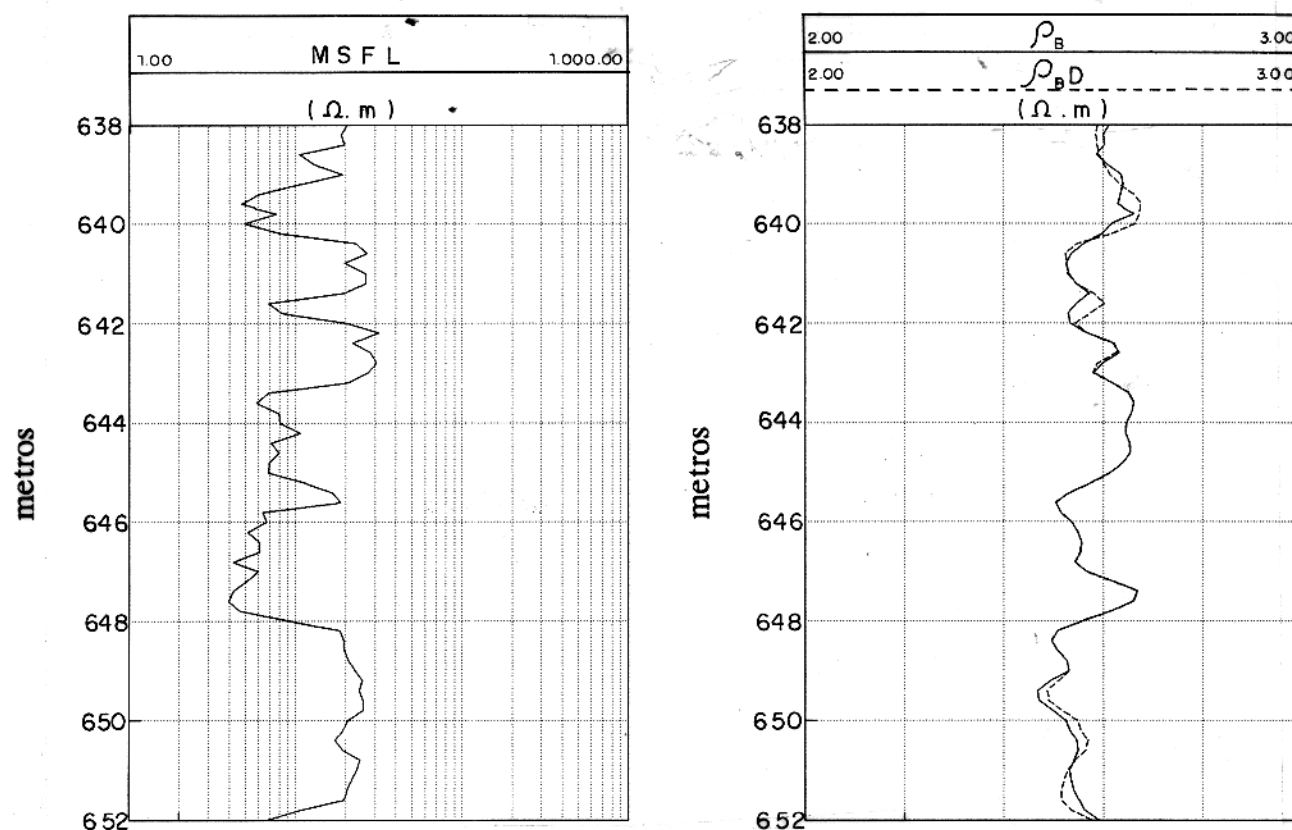


Figura 6.18 - Em (a), temos o perfil MSFL referente ao poço f; em (b) temos os perfis de densidades ρ_b convencional e o deconvolvido $\rho_b D$.

foi pequeno devido a falta de correlação entre os dois perfis.

6.10 EXEMPLO 8

Neste exemplo, utilizaremos o perfil MSFL para deconvolver o perfil de densidade, o ρ_b . Na Figura 6.18, temos os perfis MSFL, o densidade ρ_b convencional e o ρ_b deconvolvido $\rho_b D$ referente ao poço f nas profundidades de 638 a 652 metros. Numa análise rápida nos perfis mostrados, já dá para perceber que não existe correlação entre o MSFL e o ρ_b . Com isto, podemos observar que o perfil $\rho_b D$ praticamente é igual ao ρ_b . Neste caso, o algoritmo de correção não foi capaz de obter intervalos de boa correlação entre os perfis e assim, as correções efetuadas quase não modificaram o perfil original. Este exemplo demonstra claramente que quando a metodologia não consegue obter um ganho de resolução, ela pelo menos não danifica o sinal original.

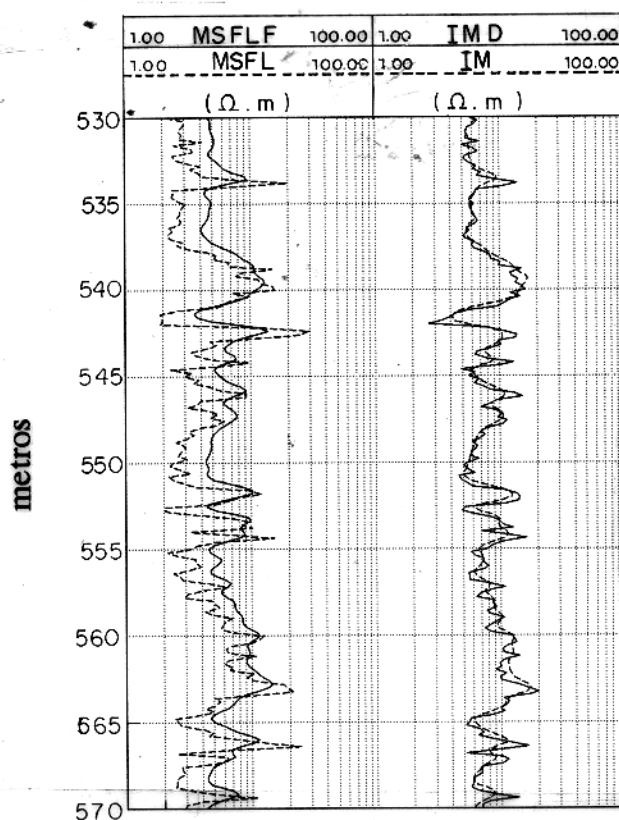


Figura 6.19 - Perfil de indução ILM juntamente com o indução deconvolvido ILMD e o perfil MSFL e o MSFL filtrado(MSFLF).

6.11 EXEMPLO 9

No exemplo 7, utilizamos o perfil SFL para melhorar a resolução vertical do perfil de indução média ILM. Agora, utilizaremos o MSFL para melhorar a resolução vertical do ILM. Na Figura 6.19, temos os perfis MSFL o MSFL filtrado (MSFLF) juntamente com os perfis ILM convencional e o ILM deconvolvido (ILMD). Os perfis são referentes ao poço f nas profundidades entre 530 e 570 metros. Podemos observar que o ILM tem uma boa correlação com o MSFL. Assim, o algoritmo é capaz de realizar as correções, melhorando a resolução vertical do ILM. Nas profundidades entre 540 e 548 metros, nota-se que o MSFL registra vários picos que podem ser um indício de camadas finas. Nesta mesma faixa de profundidades, o ILMD consegue registrar estas variações de maneira mais precisa do que o ILM, evidenciando desta forma, o aumento de resolução vertical.

7 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na aplicação em dados sintéticos e em dados reais nos leva a concluir que o método funciona de maneira satisfatória nos perfis de resistividades. **A abordagem do ajuste de energia pode substituir satisfatoriamente o uso das funções respostas verticais das ferramentas na composição do filtro que iguala a resolução vertical do perfil de alta resolução com a do perfil de baixa resolução.** Por outro lado, o uso da regressão linear para o ajuste de correlação, e o uso do coeficiente de correlação como ponderador do fator de correção, evitam distorções na curva deconvolvida, evitando desta forma, as superestimativas e possíveis correções em intervalos indesejáveis. Nota-se que o efeito compressional observado na maioria dos filtros deconvolutivos (inverso) também ocorre na abordagem do ajuste de energia, sendo que este efeito é de suma importância a fim de se reduzir os indesejáveis efeitos de bordas, provenientes da baixa resolução vertical das ferramentas de investigação profunda.

A aplicação da metodologia nos dados sintéticos, mostrou que ela funciona satisfatoriamente em várias situações que estão sempre presentes nas formações reais. No exemplo 2, caracterizamos o efeito de invasão do filtrado da lama. Quando o diâmetro de invasão não for muito acentuado, a metodologia funciona satisfatoriamente. No exemplo 3, foi mostrado o problema da invasão juntamente com o problema dos ruídos. Novamente a metodologia funcionou, mostrando até mesmo uma atenuação do nível de ruídos. No exemplo 4, a metodologia foi testada em uma situação onde se verificou a presença das chamadas litologias laminares. Neste caso, o ajuste de energia melhorou o contraste de condutividades entre as camadas finas. Esta melhora é de fundamental importância numa interpretação qualitativa. No exemplo 5, comparamos o desempenho desta metodologia, comparando-a com a metodologia proposta por NELSON & MITCHELL (1991). Neste caso, chega-se a conclusão que o critério do ajuste de energia constitui-se numa boa base para o controle da linearidade de um sistema ferramenta-formação. Porém, quando é possível obter com segurança as respostas verticais das ferramentas, a metodologia empregada por NELSON & MITCHELL (1991) deve ser implementada, como é caso dos perfis SÔNICOS. No exemplo 6, foi mostrado um exemplo onde a metodologia evita corrigir o perfil de baixa resolução no trecho onde existem problemas de poço. Neste caso, o perfil de baixa resolução original não foi danificado, sendo que o tamanho do intervalo de busca foi fundamental para evitar correções espúrias. No exemplo 7, a metodologia foi testada com perfis em escalas muito diferentes, simulando medidas de

propriedades petrofísicas diferentes. Foi assumido que o poço estava em perfeitas condições. Neste caso, a metodologia funcionou corretamente, inclusive no trecho espelhado, demonstrando que a mudança do intervalo de busca dependerá fundamentalmente dos tipos de perfis a serem usados assim como da resolução vertical de ambos. Para este exemplo, a mudança do intervalo de busca foi benéfica, resultando em correções coerente com a distribuição ideal das propriedades petrofísicas da zona de alta resolução.

Nos dados de campo, a abordagem do ajuste de energia teve um desempenho favorável, obtendo correções coerentes com a geologia da formação perfilada. No exemplo 1, o uso do perfil SFL para a deconvolução do perfil ILD foi uma boa escolha. O resultado, comparado com o perfil convencional e com a descrição de testemunho, provou que o acréscimo de informação estava perfeitamente coerente com a descrição de testemunho do trecho de reservatório. Nos trechos de baixa correlação, o perfil ILD não teve correções acentuadas, provando, desta forma, que o coeficiente de correlação usado como fator de ponderação das medidas corrigidas é bastante razoável. No exemplo 2, o perfil ILD foi deconvolvido usando-se o perfil ILM. O resultado também foi satisfatório, embora inferior ao do exemplo 1. O menor desempenho do perfil ILM deve-se principalmente ao fato da sua resolução vertical ser menor que a resolução vertical do SFL. No exemplo 3, o perfil SFL foi utilizado para melhorar a resolução vertical dos perfis PHASOR-ILD e PHASOR-ILM. O melhor desempenho foi conseguido com o perfil PHASOR-ILD, pois tendo este uma resolução vertical acentuadamente inferior ao SFL, os contraste produzidos pelas correções foram mais nítidos. No exemplo 4, foi usado 2 perfis com propriedades petrofísicas diferentes. Foi usado Um perfil de microresistividade(MSFL) para melhorar a resolução vertical do perfil de raios gama(GR). O perfil GR demonstrou ser correlacionavel com o MSFL. Assim, o perfil GR deconvolvido apresentar uma sensível melhora em relação ao GR convencional. Neste caso, a diferença na ordem de grandeza das medidas entre os dois perfis não foi um problema. Aqui convém mencionar que no processo de correção dos perfis de indução, foi assumido que o erro na leitura da ferramenta era proporcional a medida obtida. Para o caso das ferramentas radiativas, esta afirmativa não é verdadeira, pois o erro obtido pode ser assumido como constante. Mas como foi usado um perfil elétrico para deconvolver o GR, assumimos um erro proporcional à medida. Mesmo assim, a metodologia funcionou, pois os possíveis erros introduzidos pela hipótese da proporcionalidade dos resíduos nas leituras foram filtrados na análise de correlação. No exemplo 5, utilizamos o perfil MSFL para deconvolver o perfil SFL. A correlação entre estes perfis é visível, e os resultados obtidos no perfil SFL deconvolvido demonstram isto. No exemplo 6, utilizamos o perfil de absorção fotoelétrica para deconvolver o neutrão. Novamente temos o caso da utilização de dois perfis que medem propriedades diferentes.

Embora a metodologia tenha funcionado neste caso, devemos salientar que a hipótese da proporcionalidade dos erros das medidas deve ser encarada com reservas, uma vez que ambos os perfis são obtidos por ferramentas nucleares. Além disto, o perfil de absorção fotoelétrica é muito problemático, pois suas medidas estão sujeitas a erros de natureza estatísticas, o que pode dificultar a análise de correlação. Além do mais, como as ferramentas nucleares de densidade e neutrão são calibradas no calcário, sua utilização em outras litologias causam erros que devem ser corrigidos antes da manipulação destes perfis. No exemplo 7, utilizamos o MSFL para melhorar a resolução vertical do ILD. Os resultados obtidos provam que os critérios estatísticos para avaliar a correlação entre os perfis evitam a transferência dos efeitos de poço para o ILD, que são visíveis no perfil MSFL. No mais, nos trechos onde não há correlação entre os perfis, o algoritmo não altera o perfil original. No exemplo 8, foi usado o perfil MSFL para deconvolver o densidade(ρ_B). Como era de se esperar, a ausência de correlação entre os perfis fez com que o algoritmo praticamente não alterasse o perfil original. Convém também salientar que o ρ_b é um perfil sujeito a muitos erros, pois a ferramenta de densidade é calibrada para uma formação do tipo calcário, e se ela for usada em outros tipos de formações, o perfil resultante deve ser corrigido. No exemplo 9, utilizamos o MSFL para deconvolver o ILM. Ambos os perfis se correlacionam bem, e o resultado é um perfil ILM com uma resolução vertical melhorada. Por outro lado, o perfil ILM, por ter uma profundidade de investigação menor do que a do ILD, também está sujeito aos efeitos de poço, assim, deve-se tomar o cuidado para que o algoritmo não amplifique estes efeitos.

A metodologia funciona razoavelmente bem para os perfis de resistividade e condutividade, mas devemos salientar que efeitos de poço acentuados podem fazer com que a metodologia não funcione. Tais efeitos aparecem nos perfis de alta resolução como se fossem camadas finas, e eventualmente estes eventos podem ser repassados ao perfil de baixa resolução durante a aplicação do algoritmo, principalmente se estes efeitos aparecerem no interior de um intervalo de boa correlação. Na maioria dos casos, estes efeitos afetam sensivelmente o coeficiente de correlação diminuindo-o, fazendo com que o perfil deconvolvido não incorpore de maneira global estes efeitos. Desta forma, o perfil de baixa resolução deconvolvido mantém as suas características originais e os eventos não correlacionáveis não terão nenhum efeito sobre a curva deconvolvida. Também é preciso dizer que eventos que não tenham nenhum significado físico mas que sejam correlacionáveis podem aparecer nos perfis de alta e baixa resolução, fazendo com que o perfil deconvolvido passe também a incorporá-los. Este tipo de efeito ocorre principalmente quando utilizamos os perfis radioativos, pois estes perfis estão sujeitos a erros estatísticos. A escolha dos intervalos ótimo é de fundamental importância para um bom desempenho da metodologia. Um intervalo muito grande pode gerar uma correção pobre, devido ao número muito grande de amostras. Um número muito grande de amostra

pode causar uma maior dispersão das medidas, fazendo com que o coeficiente de correlação diminua. Já um intervalo muito pequeno pode danificar o perfil deconvolvido devido a obtenção de falsas estimativas. Finalmente, deve-se evitar cortes muito brandos ou excessivos de energia, pois o perfil filtrado resultante poderá não refletir a resolução vertical do perfil de baixa resolução. O resultado de corte de energia excessivo ou muito brando pode gerar correções não confiáveis.

Um outro ponto importante que deve ser destacado é a taxa de amostragem dos perfis. Normalmente os perfis entregues pelas companhias de perfilagem são apresentados a uma taxa de amostragem de 15cm. Desta forma, perfis que tenham resolução vertical abaixo deste valor acabam por perder definição se forem amostrados a um valor mais baixo que sua resolução vertical. Assim, é necessário que os perfis de baixa resolução sejam reamostrados com a mesma taxa que os perfis de alta. Uma vez que as correções do perfil de baixa resolução são realizadas sobre intervalos fixos, onde o número de amostras destes intervalos é de fundamental importância para a análise de correlação, o ganho de resolução acaba por ficar restrito a taxa em que os perfis estão amostrados. Neste trabalho, os dados fornecidos pela Petrobrás foram amostrados a uma taxa de 0.20cm, de forma que este valor é um fator limitante para ganho de resolução. Este talvez tenha sido um dos motivos dos resultados pobres obtidos com a deconvolução usando o MSFL, uma vez que este perfil tem uma resolução vertical de 0.15cm. Uma possível solução para isto seria usar rotinas do tipo "SPLINE" para reamostrar os perfis, mas estas rotinas têm a inconveniência de amplificar os ruídos.

A aplicabilidade deste método pode ser estendida a qualquer conjunto de perfis, desde que haja correlação entre eles, e que ambos estejam perfeitamente casados em profundidade. Porém, devemos salientar que a correlação entre os perfis é uma condição satisfatória mas não suficiente, uma vez que ferramentas sujeitas a erros estatísticos podem gerar perfis correlacionáveis, mas que não refletem a realidade da formação. Também nesta metodologia, o processo de regressão e filtragem evita a necessidade de seleção prévia de parâmetros, assim como de calibrações anteriores dos perfis. Desta forma, pode-se usar perfis que medem propriedades petrofísicas diferentes. Mas devemos ter, neste caso, um cuidado especial, pois o uso de perfis com propriedades petrofísicas diferentes implicará em diferenças de escalas entre as medidas. Por outro lado, devemos ter em mente, que certas ferramentas são calibradas para certos tipos de formações, e uma vez que ela seja usada numa formação diferente, é preciso que sejam feitas correções no perfil resultante. Como exemplo, podemos citar a ferramenta CNL que é calibrada no calcário. Uma outra consideração importante é a hipótese do erro das medidas. Neste trabalho, foi assumido que os erros nas medidas obtidas pela ferramenta é proporcional ao valor da medida obtida. Esta hipótese revelou-se satisfatória para os perfis de resistividades/condutividades. Tal hipótese dá origem a uma correção multiplicativa tal

como observada na equação (4.43). Porém, tal critério não se revelou satisfatório para os perfis radioativos, uma vez que os erros propagados por estas ferramentas são praticamente constantes. Uma maneira alternativa seria obter uma outra equação para correção, partindo do pré-suposto que os erros propagados pelas duas ferramentas são constantes, a fim de chegar a uma correção do tipo aditiva, por exemplo. A hipótese do perfeito ajuste em profundidade dos perfis é assumida, baseada na eficiência comprovada dos "softwares" empregados na digitalização e confecção dos perfis. Mesmo assim, tais "softwares" estão sujeitos a erros, que de uma forma ou de outra, acabam por influenciar os resultados finais da deconvolução.

Porém, a maior vantagem da metodologia do ajuste de energia está no fato dela dispensar o uso das funções resposta vertical das ferramentas no processo de deconvolução. Isto faz com que o método possa ser aplicado em qualquer perfil, sem levar em consideração o tipo de formação em que ele foi corrido. O processo de filtragem do perfil de alta resolução não elimina os problemas de poço, inerentes a esta ferramenta, tais como ruídos e invasão, mas como esta técnica usa uma análise de regressão e o coeficiente de correlação para obter os valores de correção, tais erros são minimizados e não chegam a afetar os resultados finais. Além disto, a estabilidade do filtro obtido, a flexibilidade de sua utilização e a simplicidade do algoritmo são fatores que viabilizam a aplicabilidade desta técnica. Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante reconsiderar os perfis radioativos, encontrando outras formas ou equações para a correção destes perfis. Também seria útil utilizar os perfis elétricos deconvolvidos pela metodologia do ajuste de energia para o cálculo de parâmetros de reservatórios, tais como saturação de água/óleo, porosidade, permeabilidade, cálculo de reservas, dentre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, D. F. 1984. Laminated sand analysis. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 24. New Orleans, 1984. **Transactions**. New Orleans. Paper XX.
- ALLEN, D.; ANDERSON, B.; BARBER, T. D.; FLAUM, C.; HEMINGWAY, J.; LINGNERIS, S. 1988. Advances in High-Resolution Logging. **The Technical Review**, 36(2): 4-14.
- ANDERSON, B. & BARBER, T. D. 1988. Strange Induction Logs-A Catalog of Environmental Effects. **The Log Analyst**, 29(4): 229-243.
- ANDERSON, B. & CHEW, W. C. 1985. SFL Interpretation using High Speed Synthetic Computer Generated Logs. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 26. Dallas, 1985. **Transactions**. Dallas. Paper K.
- ANDERSON, B. & GIANZERO, S. 1983. Induction Sonde in Stratified Media. **The Log Analyst**, 24(1): 25-31.
- ANDERSON, B.; BARBER, T. D.; SCHEFER, R. 1988. Induction logging: Evolution of a Technique. **The Technical Review**, 35(1): 35-41.
- ANDRADE, A. J. 1992. **Deconvolução de perfis de poço**. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 80p. Tese(Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1992.
- ANDRADE, A. J. & LÜTHI, S. M. 1992. Deconvolution of wireline logs using Point-Spread Functions obtained from high-resolution logs. In: VENEZUELAN GEOPHYSICAL CONGRESS, 6. Caracas, 1992. **Transactions**. Caracas. Petrofísica II.
- ASQUITH, G. 1982. **Basic Well Log for Geologists**. Tulsa, AAPG Press. 216 p.
- BARBER, T. D. 1985. Introduction to the Phasor Dual Induction Tool. **Journal of Petroleum Technology**, SPE, September: 1969-1706.
- BARBER, T. D. 1988. Induction vertical resolution enhancement: physics and limitation. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 29. San Antonio, 1988. **Transactions**. San Antonio. Paper O.

- BRIGHAM, E. O. 1974. **The Fast Fourier Transform**. London, Prentice-Hall International. 251p.
- CHAUDHARY, S. & VSHIST, N. 1992. Formation Evaluation of a Finely Laminated Reservoir. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 33. , Dallas, 1992. **Transactions**. Dallas. Paper AA.
- CLUFF, R. M.; BYRNES, A. P.; KOLVOORD, R. W.; CLUFF, S. G.; INDEN, R. F. 1992. Thin-Bedded Peritidal Reservoirs of the Silurian Upper Interlake Group, Nesson Anticline Area, Williston Basin, North Dakota. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 33. , Dallas, 1992. **Transactions**. Dallas. Paper Z.
- COSMO, C.; SPALBURG, M.; LOOYESTIJN, W. 1991. Fast Deconvolution of Laterologs by Direct Inverse Filtering. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 32. , Midland, 1991. **Transactions**. Midland. Paper R.
- DOLL, H. G 1949. Introduction to induction logging and application to logging of wells drilled with oil base mud. **Journal of Petroleum Technology**, 1(6): 148-162.
- DYOS, C. J 1987. Inversion of induction log data by the method of maximum entropy. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 28. London, 1987. **Transactions**. London. Paper T.
- ELLIS, D. V. 1987. **Well Logging for Scientist**. 2. ed. New York, Elsevier. 521 p.
- FLAUM, C.; GALFORD, J.; HASTINGS, A. 1987. Enhancement Vertical Resolution Processing of Dual Detector GammaGamma Density Logs. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 28. London, 1987. **Transactions**. London. Paper M.
- FREEDMAN, R. & MINERBO, G. N. 1989. Maximum entropy inversion of induction log data. IN: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE EXHIBITION OF THE SPE, 64. , 1989. **Proceedings** [s.1.].
- GALFORD, J. E.; FLAUM, C.; GILCHRIST, W. A.; SORAN, P., D.; GARDNER, J., S. 1986. Enhanced resolution processing of compensated neutron logs. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE EXHIBITION OF THE SPE , 61. , 1986. **Proceedings** [s.1.].
- GIANZERO, S. C. & ANDERSON, B. 1982. A new look at Skin Effect. **The Log Analyst**, 23(1): 20-34.

- JACOBSON, L.A.; WYATT, Jr., D.F.; GADEKEN, L.L.; MERCHANT, G.A. Resolution Enhancement of Nuclear Measurements through Deconvolution. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 31. , Lafayette, 1990. **Transactions** . Lafayette. Paper TT.
- LANGFORD, R. P. & GRIGSBY, J. D. 1992. Use of the Enhanced Density and Micro-resistivity Logs in Interpreting Diagenetic Facies In Tertiary Gulf Coast Sandstones. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 33. ,Dallas. 1992. **Transactions**. Dallas. Paper BB.
- LEME, R. A., 1967 **Curso de Estatística; Elementos**. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico. p. 250-251.
- LOOYESTIJN, W. J. 1982. Deconvolution of Petrophysical Logs: Applications and Limitations. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM , 23. , Corpus Christi, 1982. **Transactions**. Corpus Christi. Paper W.
- LYLE, W. & WILLIAMS, D. 1986. Deconvolution of Well Log Data, an Innovations Approach. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM , 27. , Houston, 1986. **Transactions**. Houston. Paper O.
- MACCUEN, R. H., 1985. **Statistical methods for engineers**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall. p. 188-189.
- MATHIS, G. L. & GEARHART, D. 1988. Characterization of Vertical Resolution for PE and Density Logging. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDROCARBONETOS, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, SBGE. Paper 2.
- MEDAGLIA J. A. & SUGIO, A. H. 1991. Utilização de Perfis Radioativos Com Alta Resolução Vertical na Bacia Do Espírito Santo. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE OPERAÇÕES GEOLÓGICAS, 3., Cabo Frio, 1991. **Anais**: Cabo Frio, STOG. v.1, p.259-271.
- MINETTE, D. C. 1990. Thin Bed Resolution Enhancement: Potential and Pitfalls. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 31. , Lafayette, 1990. **Transactions**. Lafayette. Paper GG.
- MORAN, J. H. & KUNS, K. S. 1962. Basic Theory of Induction Logging and Application to Study of Two-coil Sondes, **Geophysics**, 27(6): 829-858.
- NELSON, R. J., & MITCHELL, W. K. 1991. Improved vertical resolution of well logs by resolution matching. **The Log Analyst**, July,: 339-349.

- NERY, G. G. 1990. **Introdução à Geofísica Aplicada**. Notas de aula. Belém, UFPA. 232p. (no prelo).
- NOSAL, E. A. 1983. Statistical Determination of Geophysical Well Log Response Functions. **Geophysics**, 48(11): 1525-1535.
- PETROBRÁS. 1991. **Deconvolução de perfis, estudo do estado-da-arte**. Rio de Janeiro. 82p.
- PETROBRÁS. 1992. **Ferramentas de Perfilagem Convencionais Para Avaliação de Formações**. Aracaju. 196p.
- PRESS, W.; FLANNERY, B; TEUKOLSKY, S.; VETTERLING, W. 1987. **Numerical Recipes**. 2.ed. Cambridge Univ Press. 720 p.
- RUHOVETS, N., 1992. A Log Analysis Technique for Evaluating Laminated Complex Carbonate and Sandstone Reservoirs. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 33. , Dallas, 1992. **Transactions**. Dallas. Paper DD.
- SCHLUMBERGER. 1985. **Avaliação de Formações no Brasil**. Rio de Janeiro. 277p.
- SCHLUMBERGER. 1989a. **Phasor Induction Tool**. Houston. 38p.
- SCHLUMBERGER. 1989b. **Principios/Aplicaciones de la Interpretación de Registros**. Bahia De San Hipolito. 198p.
- SCHLUMBERGER. 1991. **Alta Resolução, Perfis e Processamentos (Publicações)**. Belém.
- SERRA, O. 1984. **Fundamentals of Well Log Interpretation - The acquisition of Logging Data**. Amsterdam, Elsevier. 423 p.
- SERRA, O. & ANDREANI, M. 1991. **Thin Beds**. Houston. 82p.
- SHEN, L. C. 1988. Effects of Skin-effect Correction and Three-point Deconvolution on Induction Logs. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 29. , San Antonio. **Transactions**. San Antonio. Paper M.
- SMITH, M. P. 1990. Enhanced Vertical Resolution Processing of dual-spaced Neutron and Density tools using standard shop calibration and borehole compensation procedures. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 31. , Lafayette, 1990. **Transactions**. Lafayette. Paper SS.

- SPIEGEL, M. R. 1977. **Probabilidade e Estatística**. Rio de Janeiro, McGraw-Hill. 518p.
- STREETER, R. W. & ALLEN, R. L. 1992. Improving Thin Bed Responses of The Deep Induction With Differential Processing. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 33. , Dallas, 1992. **Transactions**. Dallas. Paper AA.
- SUAU, J.; ALBERTELLI, L.; CIGNI, M.; GRAGNAMI, U. 1984; Interpretation of Very Thin Gas Sands in Italy. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 25. , New Orleans, 1984. **Transactions**. New Orleans. Paper A.
- THADANI, S. G. & MERCHANT, G. A. 1982. Deconvolution With Propagated Geometric Factors. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE EXHIBITION OF THE SPE, 64. , 1982. **Proceedings** [s.l.].
- WEAVER, H. J. 1990. **Theory of Discrete and Continuos Fourier Analysis**. New York, J. Wiley & Sons. 307p.
- ZANINI, T. & CORSINO, A. R. 1991. Resultados de Experimentos Operacionais Para Melhorar A Resolução Vertical Dos Perfis Radioativos. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE OPERAÇÕES GEOLÓGICAS, 3., Cabo Frio, 1991. **Anais**. Cabo Frio, STOG. v.1, p.245-258.
- ZORSKY, T. 1987. Analysis of Deconvolution Efficiency for some Well Logs. In: SPWLA ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 28. , London, 1987. **Transactions**. London. Paper WW.

APÊNDICE A

Demonstração da equivalência $C(w)C^*(w) = |C(w)|^2$

Seja $C(w) = C_r(w) + jC_i(w)$ uma função complexa, onde $C_r(w)$ e $C_i(w)$ são as suas partes real e imaginária e $C^*(w) = C_r(w) - jC_i(w)$ o seu complexo conjugado. Temos que

$$\begin{aligned} C(w)C^*(w) &= (C_r(w) + jC_i(w))(C_r(w) - jC_i(w)) \\ C(w)C^*(w) &= C_r(w)^2 - jC_r(w)C_i(w) + jC_r(w)C_i(w) + C_i(w)^2 \end{aligned}$$

$$C(w)C^*(w) = C_r(w)^2 + C_i(w)^2. \quad (\text{A.1})$$

Por outro lado,

$$|C(w)| = \sqrt{C_r(w)^2 + C_i(w)^2}. \quad (\text{A.2})$$

Por (A.1) e (A.2) concluimos que

$$|C(w)|^2 = C_r(w)^2 + C_i(w)^2 = C(w)C^*(w).$$