

DECONVOLUÇÃO DE PERFIS DE POÇO

por

ANDRÉ JOSÉ NEVES ANDRADE

Engenheiro Civil (Universidade Federal de Viçosa (MG) - 1986)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

em

GEOFÍSICA

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

Geofísica

da

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Banca Examinadora :

Dr. Stefan M. Luthi (Orientador)

Stefan M. Luthi

Dr. Gervásio P. Cavalcante

Gervásio Cavalcante

Dr. Douglas P. O'Brien

Douglas P. O'Brien

Data da Homologação : 20/10/1992

AGRADECIMENTOS

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

Ao orientador, Dr. Stefan M. Luthi pela dedicação e aos demais membros da banca examinadora pelas contribuições dadas.

A PETROBRÁS pela liberação e fornecimento dos dados de perfil utilizados neste trabalho.

A UFFa e ao corpo docente e funcionários do Núcleo de Pesquisas em Geofísica de Petróleo.

Aos colegas pelo companheirismo e ajuda durante este período.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

TABELAS

Tabela 1.1	Resolução Vertical de Algumas Ferramentas de Perfilagem.	11
------------	--	----

FIGURAS

Figura 1.1	Determinação da resolução vertical intrínseca da ferramenta.	9
Figura 1.2	Ferramenta de indução eletromagnética com duas bobinas (Doll, 1949).	13
Figura 1.3	Função resposta vertical para a ferramenta indução eletromagnética de duas bobinas (Doll, 1949) (linha sólida). Função resposta vertical ideal (linha tracejada).	14
Figura 1.4	Função resposta vertical para a ferramenta indução eletromagnética convencional, para alguns valores de condutividade (Gianzero & Anderson, 1972).	16
Figura 1.5	Representação esquemática de um sistema linear e estacionário.	17
Figura 1.6	Exemplo de uma função arbitrária, mostrando o processo de convolução no domínio da profundidade.	19
Figura 2.1	Exemplos de pares de transformadas de Fourier.	25
Figura 2.2	A janela cosseno-retangular (A) e seu espectro na frequência espacial (B).	28
Figura 3.1	Resposta vertical da ferramenta (Doll, 1949).	35
Figura 3.2	Função contínua por partes, representando a variação de um parâmetro petrofísico com a profundidade.	35
Figura 3.3	Modelo teórico ou Perfil sintético	36
Figura 3.4	Função resposta de uma ferramenta de baixa resolução vertical.	38
Figura 3.5	Perfil ideal.	38
Figura 3.6	Modelo sintético ou Perfil degradado.	39
Figura 3.7	Perfil degradado, mostrando o intervalo de controle do tipo <i>escada</i>	41
Figura 3.8	Intervalo de controle do tipo <i>escada</i> (linha sólida) e o respectivo perfil ideal associado (linha tracejada).	42

Figura 3.9	Intervalo de controle do tipo <i>caixa</i> (A) e sua respectiva transformada de Fourier (B).	47
Figura 3.10	Função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (linha sólida) e função resposta vertical original (linha tracejada). . .	48
Figura 3.11	Perfil deconvoluido (linha sólida). Perfil original (linha tracejada). Perfil ideal (linha pontilhada).	51
Figura 3.12	Perfil de alta resolução vertical (linha sólida). Perfil ideal (linha tracejada).	54
Figura 3.13	Perfil baixa resolução vertical (linha sólida). Perfil ideal (linha tracejada).	54
Figura 3.14	Perfil baixa resolução vertical deconvoluido (linha sólida). Perfil de baixa resolução vertical original (linha tracejada). Perfil ideal (linha pontilhada).	55
Figura 3.15	Funções resposta vertical. Função de alta resolução vertical (A). Função de baixa resolução vertical (B). Perfil degradado (C).	56
Figura 3.16	Perfil deconvoluido (linha sólida). Perfil sintético (linha tracejada). Perfil ideal (linha pontilhada).	57
Figura 3.17	Perfil de alta resolução vertical ruidoso (A). Perfil de baixa resolução vertical ruidoso (B)	59
Figura 3.18	Perfil deconvoluido (linha sólida). Perfil sintético (linha tracejada). Perfil ideal (linha pontilhada).	60
Figura 3.19	Perfil sintético de investigação rasa (A). Perfil sintético de investigação profunda (B).	62
Figura 3.20	Perfil deconvoluido.	63
Figura 4.1	Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de indução eletromagnética original (linha tracejada). Perfil de indução eletromagnética com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).	66
Figura 4.2	Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de densidade original (linha tracejada). Perfil de densidade com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).	67
Figura 4.3	Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de densidade original (linha tracejada). Perfil de densidade com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).	68

Figura 4.4	Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de indução eletromagnética original (linha tracejada). Perfil de indução eletromagnética com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).	70
Figura 4.5	Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de raios gama natural original (linha tracejada). Perfil de raio gama natural com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).	71
Figura 4.6	Perfil de indução eletromagnética original (linha tracejada). Perfil deconvoluido a partir de um perfil ideal associado ao intervalo de controle (linha sólida) (A). Perfil de indução eletromagnética original (linha tracejada). Perfil deconvoluido a partir de um trecho de perfil de alta resolução vertical associado ao intervalo de controle (linha sólida) (B).	73
Figura 4.7	Intervalo de controle, perfil de resistividade (linha sólida), perfil de micro-resistividade (linha tracejada) (A). Perfil de resistividade deconvoluido (linha sólida), perfil original (linha tracejada) (B).	74
Figura 4.8	Perfil de indução eletromagnética deconvoluido (linha sólida), perfil original (linha tracejada) (A). Perfil de micro-resistividade (B).	75

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ii
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 - INTRODUÇÃO	3
1.1 PREÂMBULO	3
1.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	7
1.2.1 Camadas Delgadas	7
1.2.2 Resolução Vertical	9
1.2.3 Função Resposta Vertical da Ferramenta	10
1.2.4 O Fator Geométrico	12
1.2.5 A Operação de Convolução	15
2 - A DECONVOLUÇÃO DE PERFIS DE POÇO	20
2.1 O MODELO CONVOLUCIONAL	20
2.2 A DECONVOLUÇÃO NO DOMÍNIO DA PROFUNDIDADE	21
2.3 A DECONVOLUÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL	23
2.3.1 A Transformada de Fourier	24
2.3.2 A Janela	26
2.3.3 O Teorema da Convolução	29
2.3.4 A Operação	30
3 - METODOLOGIA	33
3.1 O MODELO TEÓRICO	33
3.2 A OBTENÇÃO <i>A PRIORI</i> DA FUNÇÃO RESPOSTA VERTICAL	36
3.3 A FUNÇÃO RESPOSTA VERTICAL SOB AS CONDIÇÕES ATUAIS DO POÇO	37
3.3.1 A Degradação	37
3.3.2 O Intervalo de Controle	39

3.3.3	O Perfil Ideal no Interior do Intervalo de Controle	40
3.3.4	O Método	43
3.4	A INTERPRETAÇÃO	46
3.5	A DECONVOLUÇÃO	49
3.5.1	O Filtro Inverso	49
3.5.2	O Método	50
	A Deconvolução a partir de um Perfil Ideal no Intervalo de Controle .	50
	A Deconvolução a partir de um Perfil de Alta Resolução Vertical . . .	51
3.6	APLICAÇÕES	55
3.6.1	A Sensibilidade ao Ruído	55
3.6.2	O Filtro de Mediana	58
3.6.3	A Invasão do Filtrado da Lama	60
4 -	APLICAÇÃO AOS PERFIS PETROFÍSICOS	64
4.1	O CAMPO DE PILAR	64
4.2	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	64
4.2.1	Exemplo 1	64
4.2.2	Exemplo 2	65
4.2.3	Exemplo 3	65
4.2.4	Exemplo 4	65
4.2.5	Exemplo 5	69
4.2.6	Exemplo 6	69
4.2.7	Exemplo 7	72
4.2.8	Exemplo 8	72
5 -	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

DECONVOLUÇÃO DE PERFIS DE POÇO (TESE DE MESTRADO : Out./92)

ANDRÉ JOSÉ NEVES ANDRADE
Orientador : Dr. Stefan M. Luthi

Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPa
Caixa Postal 309 – Belém, Pará, Brasil

RESUMO

A maioria dos perfis de poço utilizados nas avaliações petrofísicas de reservatórios possuem uma resolução vertical na ordem de um metro. Isto cria um problema quando as espessuras típicas das camadas são inferiores a um metro, uma vez que não há correção das leituras. Os perfis de alta resolução vertical como da ferramenta de propagação eletromagnética (EPT, *Schlumberger*), o dipmeter (SHDT, *Schlumberger*) ou das ferramentas de varredura acústica ou elétrica possuem uma resolução vertical da ordem de centímetros, mas apresentam uma limitada aplicação para as avaliações petrofísicas.

Nós apresentamos um método para a deconvolução de um perfil de baixa resolução vertical que utiliza informações de um perfil de alta resolução vertical para identificar uma nítida interface entre camadas que apresentam valores da propriedade petrofísica contrastante, mas localmente constante em ambos os lados. A partir desse *intervalo de controle*, nós determinamos a *função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço* com base no teorema da convolução. Utilizamos várias interfaces de modo a obter valores mais representativos da resposta da ferramenta. O perfil de baixa resolução é então deconvolvido utilizando a transformada discreta de Fourier (FFT) sobre todo o intervalo de interesse.

É importante destacar que a invasão do filtrado da lama e a presença do bolo de lama não produzem efeitos danosos sobre o método, que foi aplicado a perfis sintéticos e a dados de campo, onde a aplicação de filtros com um correto ajuste de profundidade, bem como a própria escolha do intervalo de controle, antes da deconvolução, são de extrema importância para o sucesso do método.

DECONVOLUTION OF WIRELINE LOGS

(MASTER THESIS : Oct./92)

ANDRÉ JOSÉ NEVES ANDRADE
Adviser : Dr. Stefan M. Luthi

Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPa
Caixa Postal 309 – Belém, Pará, Brasil

ABSTRACT

Most wireline logs used for the petrophysical evaluation of reservoirs have a vertical resolution in the order of one meter. This poses a problem when the typical layer thickness is less than one meter, since no correct reading will be obtained. High-resolution logs like the electromagnetic propagation tool (EPT, *Schlumberger*) the dipmeters (SHDT, *Schlumberger*) or acoustic and electrical imaging devices have a resolution well below one meter, sometimes as high as one centimeter, but their application to petrophysical reservoir evaluation is limited.

We present an approach which uses information from high-resolution logs to deconvolve low-resolution logs. From the high-resolution log we first identify a sharp bed boundary, on both sides of which the petrophysical properties assume a locally constant but different value (an interface, for instance). From this *control interval* we determine the *tool response function under actual borehole conditions* of the low-resolution log using the basic convolution theorem. It can be obtained at various sharp bed boundaries in order to obtain a more representative tool response. The low-resolution log is then deconvolved using Fast Fourier Transforms (FFT) over the entire interval of interest.

Neither the invasion of mud filtrate or the presence of the mud cake affect this method adversely. We apply it to a number of synthetic and field data sets. Noise filtering prior to deconvolution is found to be important, as is correct depth shifting and a proper choice of the control interval.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 PREÂMBULO

Uma fotografia aérea da superfície terrestre e um perfil petrofísico de poço guardam em comum uma importante característica: ambos são uma representação da natureza, que apresentam uma degradação do objeto visado devido a ação dos instrumentos de registro, que comumente produzem uma adulteração da realidade, onde cada observação registrada é o resultado de uma média móvel ponderada do objetivo e sua vizinhança.

Quando estudamos uma fotografia aérea através das lentes de um par estereoscópico para efeito de, por exemplo, traçado geométrico de uma estrada, estamos a frente de um problema, em princípio, de interpretação da topografia de uma determinada região vista através das lentes de uma câmera montada em um avião. Sabemos que a câmera não é capaz de reproduzir a topografia com total fidelidade, introduzindo distorções devido, basicamente, a abertura angular da lente, a variações atmosféricas e a alterações da altura de vôo da aeronave. Quando a precisão do trabalho é pequena ou a topografia da região é bastante conhecida, podemos admitir, sem restrições, o conjunto de fotografias como a melhor representação gráfica da área em estudo. No caso contrário, medições diretas através de teodolitos em algumas pequenas áreas previamente escolhidas ou disponíveis de levantamentos topográficos anteriores, são imprescindíveis para a confiabilidade e controle de qualidade da fotointerpretação.

No caso dos perfis petrofísicos, ditos convencionais, nos quais a medida realizada pode ser diretamente relacionada à um determinado parâmetro petrofísico da formação como a resistividade, a porosidade ou a saturação de fluídos. É grave o efeito da adulteração introduzida pelo aparato de medições sobre as observações registradas, se refletindo, não apenas sobre o valor real do parâmetro medido a uma certa profundidade, bem como sobre a sua variação ao longo das camadas, em subsuperfície, atravessadas pelo poço ou na definição dos limites litológicos em profundidade. Este fenômeno é característico dos perfis petrofísicos devido à baixa resolução vertical da ferramenta, se tornando uma preocupação constante para os profissionais de perfilagem, que normalmente se deparam com o seguinte dilema: para evitar a influência dos efeitos da presença do poço, como a invasão do filtrado da lama, a formação do reboco e de outros fatores que alteram as principais características naturais da

formação nas proximidades das paredes do poço, a medição deve ser realizada o mais distante possível, ou seja, as observações devem ser efetuadas na assim chamada, *zona virgem*, onde as características naturais da formação se conservam inalteradas. Entretanto, o registro nessa zona requer um espaçamento fonte—detetor em torno da mesma ordem de grandeza que a profundidade radial de investigação. Isto, implica que a resolução vertical da ferramenta, em princípio, será da mesma ordem de grandeza. Assim, um registro preciso de um determinado parâmetro da formação no interior da zona virgem em uma camada de espessura inferior ao espaçamento fonte—detetor é *a priori* impossível.

A procura de um controle da qualidade das informações do perfil, que possibilite a melhoria de sua interpretação, através da utilização de medidas diretas ou *in situ*, seja por meio de testemunhos ou de amostras laterais da rocha, tal que sejam minimizados os problemas da baixa resolução vertical é bastante comprometida, devido à diferenças na escala de observação entre os perfis petrofísicos e as medições diretas, não se conseguindo identificar as mesmas observações, em profundidade, nos dois eventos. Desse modo, grande parcela do conhecimento disponível de subsuperfície é obtida totalmente de forma indireta, através dos dados de perfil, sem nenhum tipo de controle *in loco* da qualidade da interpretação, o que justifica o interesse da indústria do petróleo para com o desenvolvimento de processos e técnicas, que produzam um aumento da resolução vertical dos perfis convencionais tal que possibilitem a avaliação de formação de reservatórios mais complexos, normalmente caracterizados pela presença de laminações de camadas delgadas, que são em princípio transparentes aos perfis convencionais.

Um grande esforço tem sido realizado nos últimos anos no sentido da eliminação e/ou atenuação dos efeitos da degradação dos dados de perfil produzidos pelo aparato de medições, através do desenvolvimento tecnológico das ferramentas e na produção de algoritmos mais eficientes para o tratamento dos dados de perfil. O avanço tecnológico pode ser exemplificado com a introdução de artefatos mecânicos e eletrônicos, tais como os arranjos multi—sensores, que são ferramentas dispondo da possibilidade de associação de vários pares de eletrodos ou bobinas diferentes, que para o caso das ferramentas elétricas de resistividade (DLL, *Schlumberger*), produzem o efeito de uma melhor focalização, ou seja, forçam com que as correntes penetrem na formação com um mínimo de espalhamento. Para o caso das ferramentas de indução eletromagnética (6FF40, PHASOR, *Schlumberger*), a introdução de arranjos multi—sensores promove a redução do efeito das camadas adjacentes sobre as medidas (Doll, 1949). Para as ferramentas nucleares (LDT, *Schlumberger*), a preocupação é compensar o efeito da dispersão dos raios gama pelo reboco da lama, formado junto às paredes do poço (Flaum, 1987). A preponderância da influência do espaçamento fonte—detetor sobre a resolução vertical das ferramentas de perfilagem, levou ao desenvolvimento e introdução das

ferramentas contendo micro-arranjos, com os mesmos princípios de focalização dos arranjos convencionais, mas com reduzido espaçamento fonte-detector, são montados sobre braços articulados que são pressionados contra as paredes do poço, os quais são capazes de produzir registros finamente espaçados ou ditos de alta resolução vertical, tais como o dipmeter (SHDT, *Schlumberger*) ou a ferramenta de propagação eletromagnética (EPT, *Schlumberger*), que por possuírem resolução vertical da ordem de centímetros, produzem informação de alta qualidade sobre a localização em profundidade dos contatos litológicos. No entanto, não apresentam muitas aplicações para a determinação dos parâmetros característicos da avaliação de formação, tais como: a porosidade, saturação de fluídos, etc. Uma vez que suas medidas não se relacionam diretamente com esses parâmetros, estas ferramentas são normalmente utilizadas apenas de uma maneira qualitativa.

Na abordagem do problema através do processamento numérico dos perfis, tratados sob a ótica de sinais digitais, tem-se o assim chamado *processamento Alpha* (Flaum, 1987), que foi desenvolvido inicialmente para as ferramentas nucleares, onde utilizou-se as informações provindas de dois sensores com diferentes espaçamentos em relação à fonte radioativa, mas que realizam medidas da mesma grandeza física, buscando com isto promover um incremento da resolução vertical do arranjo de investigação profunda com a introdução de informações de alta resolução do arranjo de investigação rasa. Nesta abordagem também se inclui os assim chamados, *processos de deconvolução*, denominação geral, sob a qual foram introduzidas, nos últimos anos, várias metodologias, visando produzir um incremento da resolução vertical dos perfis convencionais.

Apresentaremos a seguir uma metodologia, que aborda o processo de deconvolução sob um novo ponto de vista com a introdução do conceito da *função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço*, obtida a partir da associação das informações de um perfil de alta resolução vertical com as informações do perfil de baixa resolução vertical, ao qual se aplicará o processo de deconvolução. Esta metodologia é de caráter geral, não se restringindo especificamente a nenhum determinado par de perfis em particular, solucionando convenientemente o problema das leituras realizadas na zona invadida, característica dos perfis de alta resolução vertical.

A determinação da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço é realizada a partir da escolha de um *intervalo de controle* apropriado, nas mesmas profundidades, no par de perfis de alta e baixa resolução vertical. Possibilitando a obtenção da deconvolução do perfil de baixa resolução vertical, no domínio da frequência espacial, através da análise de Fourier, com as seguintes vantagens:

- Possibilidade de utilização de informação de alta resolução vertical de grandeza física

diferente da mensuração pelo perfil de baixa resolução vertical.

- Não há a necessidade de calibração prévia das ferramentas que executam as medidas de alta resolução em relação as de baixa resolução vertical.
- Efeitos bidimensionais característicos do ambiente do poço como a invasão do filtrado da lama ou a presença do bolo de lama são desprezíveis em quanto ao processo de incremento da resolução vertical do perfil de investigação profunda.

1.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Sob esse título apresentamos uma visão um pouco mais detalhada de diversos termos de uso comum na terminologia dos processos de deconvolução aplicados aos perfis de poço.

1.2.1 Camadas Delgadas

O termo camada delgada (*thin bed*) pode ser conceituado como uma sequência de camadas formadas por arenitos limpos, folhelhos e arenitos argilosos intercalados, a maioria das quais possuem uma espessura, tal que as ferramentas usuais de perfilagem, empregadas na avaliação de formação, são incapazes de registrar a real variação de um determinado parâmetro petrofísico, por cada uma delas individualmente (Allen, 1984).

Reservatórios constituídos por camadas delgadas, ocorrem por várias partes do mundo, por exemplo, nas costas do Texas e da Louisiana e Meio Oeste americano ou no nordeste da Itália. No Brasil, em áreas como a bacia de Campos, o campo do Rio Preto (bacia do Espírito Santo) e o campo de Pilar (bacia Sergipe—Alagoas).

A presença de formações constituídas por camadas finas é comum em ambientes deposicionais do tipo:

- Turbidíticos marinhos e lacustrinos.
- Depósitos deltaicos (barras distais).
- Varvitos do tipo glaciolacustrino.
- Depósitos fluviais.

As formações com camadas finas também podem se caracterizar por uma intercalação de zonas porosas e não porosas (cimentadas), como é o caso de algumas formações carbonáticas e arenitos eólicos.

O reconhecimento da presença de camadas delgadas na interpretação de perfis exige do interprete uma vasta experiência local, tal que seja capaz de reconhecer as sutis indicações da sua ocorrência fornecidas pelos perfis. De uma maneira muito generalizada, podem ser citadas as seguintes indicações da presença de camadas delgadas (Allen, 1984):

- Ocorrência de camadas tipo arenito—argiloso, indicadas por variações rápidas nos perfis de raios gama e potencial espontâneo diferentes das apresentadas frente a camadas espessas de folhelhos.

- Ocorrência de resistividades mais altas que frente aos folhelhos adjacentes. Em alguns casos, zonas laminadas podem apresentar resistividades inferiores a $1,0\Omega - m$.
- Curvas dos perfis de densidade simétrica à do neutrão, apresentando variações rápidas, diferentes das apresentadas frente a camadas espessas de folhelhos. Como indicação, curvas próximas indicam arenitos limpos e curvas separadas, folhelhos, intercalados.
- Curvas das ferramentas de alta resolução vertical como o dipmeter ou da ferramenta de propagação eletromagnética apresentando rápidas variações. Diferenciadas das apresentadas frente à reconhecidas camadas espessas, indicando alto grau de atividade.
- Separação das curvas de resistividade rasa e profunda maior que a apresentada frente aos folhelhos adjacentes. Indicativo de zona permo-porosa pela ocorrência de invasão do filtrado da lama.

Zonas laminadas, ou seja, formadas por camadas delgadas também podem ser identificadas exclusivamente pelas ferramentas, ditas, de alta resolução vertical como a ferramenta de varredura elétrica (FMS, *Schlumberger*) ou dipmeter stratigráfico (SHDT, *Schlumberger*). Por exemplo, a ferramenta de varredura elétrica possui resolução vertical da ordem de $1,0\text{ cm}$, quando pressionada corretamente contra as paredes do poço.

Uma avaliação pioneira de camadas delgadas foi realizada no nordeste da Itália, onde grandes campos de gás são formados por sequências de arenitos limpos e folhelhos com espessuras variando de $2,5$ a $5,0\text{ cm}$ (Suau, 1984). O método proposto tomava a segunda derivada da curva do perfil de propagação eletromagnética para determinar os limites entre os lóbulos côncavo e convéxo. Cada lóbulo foi considerado como a resposta a uma camada delgada de arenito ou folhelho. Camadas de poucos centímetros de espessura foram distinguidas desse modo. As limitações do método são a necessidade de perfis finamente amostrados (1 cm) e a consideração de que a formação é constituída somente por arenitos limpos e folhelhos.

Uma técnica bastante conhecida para a interpretação de camadas delgadas é a chamada análise de arenitos laminados (*laminated sand analysis*), proposta por Allen em 1984. Esta técnica produz um aumento da resolução vertical utilizando informações de quatro perfis diferentes, com intensiva interpretação computacional das propriedades petrofísicas de camadas de até $5,0\text{ cm}$. Esta técnica foi inicialmente proposta utilizando a ferramenta de propagação eletromagnética como delimitador de camadas, posteriormente foi adaptada aos dados do dipmeter. A análise de arenitos laminados opera muito bem em formações jovens, nas quais a variável litológica, volume de argila (V_{SH}), pode ser eficientemente avaliada. Para o caso de formações antigas, não são possíveis boas correções, pois as variações no volume de

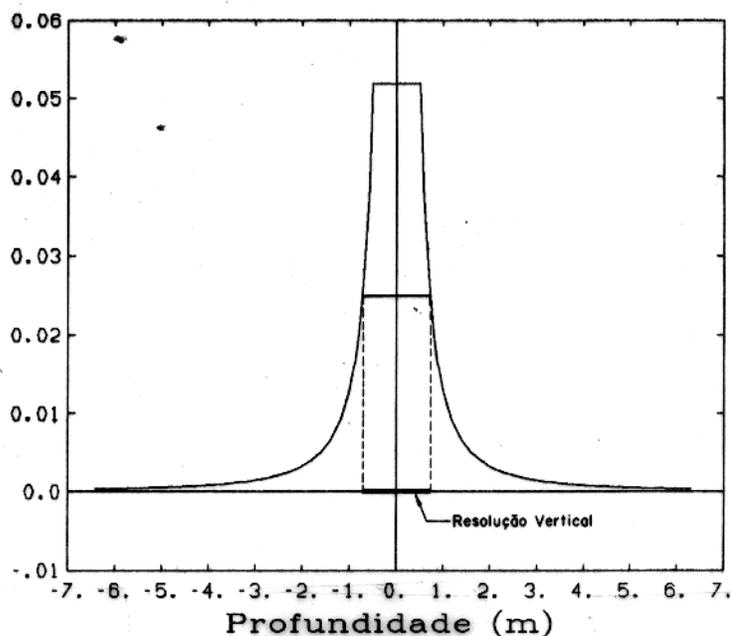


Figura 1.1 - Determinação da resolução vertical intrínseca da ferramenta.

argila são menos importantes que as variações na porosidade, no expoente de cimentação e na saturação de água irreduzível.

1.2.2 Resolução Vertical

A resolução vertical de uma ferramenta de perfilagem pode ser conceituada como a menor espessura de uma camada, na qual o registro correto de um parâmetro da formação pode ser realizado na zona virgem. Sob um ponto de vista matemático a resolução vertical pode ser definida como a distância, no eixo da profundidade, tomada entre pontos simétricos em relação à metade do valor máximo da função resposta vertical da ferramenta (Figura 1.1). Por ambos os conceitos, esse valor é chamado de *resolução vertical intrínseca*.

O conceito de resolução vertical intrínseca difere bastante do conceito de sensibilidade da ferramenta, que pode ser conceituada como a menor camada, caracterizada pela sua litologia, porosidade e saturação de fluidos, que pode ser individualizada de sua vizinhança. A sensibilidade da ferramenta é uma função da resolução vertical intrínseca e da razão sinal-ruído, tal que, normalmente excede a resolução vertical intrínseca, contudo é a resolução vertical intrínseca o fator limitante para a interpretação quantitativa dos perfis. Por exemplo a ferramenta Formation MicroScanner (FMS, *Schlumberger*) pode detectar feições da ordem de microns, mas é capaz de representar corretamente feições de espessura superior a 4 cm.

(Brown, 1987).

A resolução vertical intrínseca é parcialmente determinada pela geometria da ferramenta, por exemplo a distância entre a fonte e o detetor nas ferramentas nucleares ou o espaçamento entre as bobinas transmissora e receptora para a ferramenta de indução focalizada. Normalmente o menor espaçamento fonte-detetor implica em uma melhor resolução vertical e em uma menor profundidade de investigação radial (Looyestijn, 1982).

A resolução vertical vista no perfil é função da resolução vertical intrínseca da ferramenta, do intervalo de amostragem e da velocidade da ferramenta no interior do poço. As ferramentas de perfilagem operam continuamente, mas os dados são registrados a intervalos regularmente espaçados de profundidade, normalmente de 15 cm. Ou seja, as ferramentas não registram medidas pontuais, mas sim uma média das observações realizadas no interior do intervalo da amostragem. Para o caso em que o intervalo de amostragem é menor ou igual à metade do espaçamento fonte-detetor a resolução vertical do perfil será igual à resolução vertical intrínseca da ferramenta. Em certos casos a resolução vertical do perfil pode ser superior à resolução vertical intrínseca da ferramenta se reduzirmos o intervalo de amostragem ou a velocidade de perfilagem. A maior frequência discernida pelo perfil é dada pela frequência de Nyquist (f_N) ou

$$f_N = \frac{1}{2 \Delta z}$$

onde, Δz é o intervalo de amostragem.

A taxa de amostragem, ou seja o inverso do intervalo de amostragem, identifica o número de informações colhidas por unidade de comprimento perfilado, expressa em ciclos por unidade de comprimento, é outro fator limitante da resolução vertical do perfil. Para as ferramentas convencionais a taxa de amostragem é assumida como $\frac{1}{15}$ ciclos por centímetro e depende basicamente da velocidade de perfilagem (Mathis & Gearhart, 1988).

1.2.3 Função Resposta Vertical da Ferramenta

Em geral, é assumido, que uma ferramenta de perfilagem investiga um determinado volume de rocha e que a medida registrada a cada ponto, pode ser considerada como uma média ponderada no interior desse volume entre o parâmetro da formação, considerado constante em cada um dos elementos infinitesimais de volume e uma função peso. Esta função peso é chamada de função resposta vertical da ferramenta.

Tabela 1.1 - Resolução Vertical de Algumas Ferramentas de Perfilagem.

Ferramenta	Resolução Vertical intrínseca (cm)	Intervalo de Amostragem (cm)	Resolução Vertical do Perfil (cm)
FMS	0.5	0.3	0.5
SHDT	1.0	0.3	1.0
HDT	1.3	0.5	1.3
EPT	5.0	5.0	5.0
MSFL	5.0	15.0	10.0
PHASOR	150.0	15.0	150.0
SFL	76.0	15.0	76.0
LLD	61.0	15.0	61.0
SP	-	15.0	150.0
LDT	38.0	15.0	46.0
CNL	38.0	15.0	46.0
GR	31.0	15.0	46.0
BHC	61.0	15.0	61

Mod. de Allen *et. al.*, (1988)

A função resposta vertical da ferramenta, $h(z)$ é uma função unidimensional da profundidade, descrita pela variável z . Adotando o sistema de coordenadas cilíndricas temos

$$h(z) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} h(\rho, \theta, z) dr d\theta \quad (1.1)$$

Teoricamente, a função resposta vertical deve satisfazer as condições de Dirichlet, ou seja a inequação abaixo deve ser satisfeita.

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(z) dz < \infty \quad (1.2)$$

Segundo a ótica do tratamento de sinais, a função resposta vertical da ferramenta deve satisfazer necessariamente a relação

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(z) dz = 1 \quad (1.3)$$

No caso real, adotamos sempre a forma discretizada para a função resposta vertical da ferramenta, que deve ser normalizada, tal que seu somatório pelo número total de amostras seja igual a unidade

$$\sum_{n=1}^N h_n = 1 \quad (1.4)$$

Onde a função resposta vertical da ferramenta $h(z)$ é representada pela sequência espacial h_n , e n é a discretização da coordenada contínua z .

1.2.4 O Fator Geométrico

Um exemplo clássico, onde a função resposta vertical da ferramenta foi determinada a partir da solução do problema físico envolvido na obtenção dos valores do perfil foi desenvolvido por Henri-Georges Doll em 1949, denominado de teoria do fator geométrico, através da solução do problema eletromagnético (lei de Biot-Savart), que descreve o princípio de funcionamento da ferramenta de indução eletromagnética com duas bobinas. A obtenção da função resposta vertical para uma ferramenta constituída por um arranjo de várias bobinas é simplesmente a soma das funções resposta obtidas para cada associação (par) possível de bobinas.

A ferramenta de indução proposta por Doll, é constituída por um par de bobinas, uma transmissora e outra, receptora. Separadas de uma distância L e montadas sobre um madril isolante (Figura 1.2).

Em uma formação homogênea, isotrópica e infinita, adotando o sistema cilíndrico de coordenadas, o fator geométrico infinitesimal é descrito pela expressão

$$g_D(r, z) = \frac{Lr^3}{2r_T^3 r_R^3} \quad (1.5)$$

Onde: r é o raio de um anel de rocha com seção reta unitária, perpendicular ao eixo da ferramenta e situado a uma distância z do ponto médio do espaçamento entre as bobinas, tomado como ponto de medida. r_T e r_R são, respectivamente, a distância desse anel de rocha às bobinas transmissora e receptora (Figura 1.2).

Integrando $g_D(r, z)$ em relação a r , evidencia-se a dependência da medida com a profundidade. Assim Doll obteve a função resposta vertical da ferramenta ou fator geométrico vertical $g_{D_v}(z)$.

$$g_{D_v}(z) = \begin{cases} \frac{1}{2L} & ; |z| < \frac{L}{2} \\ \frac{L}{8z^2} & ; |z| > \frac{L}{2} \end{cases} \quad (1.6)$$

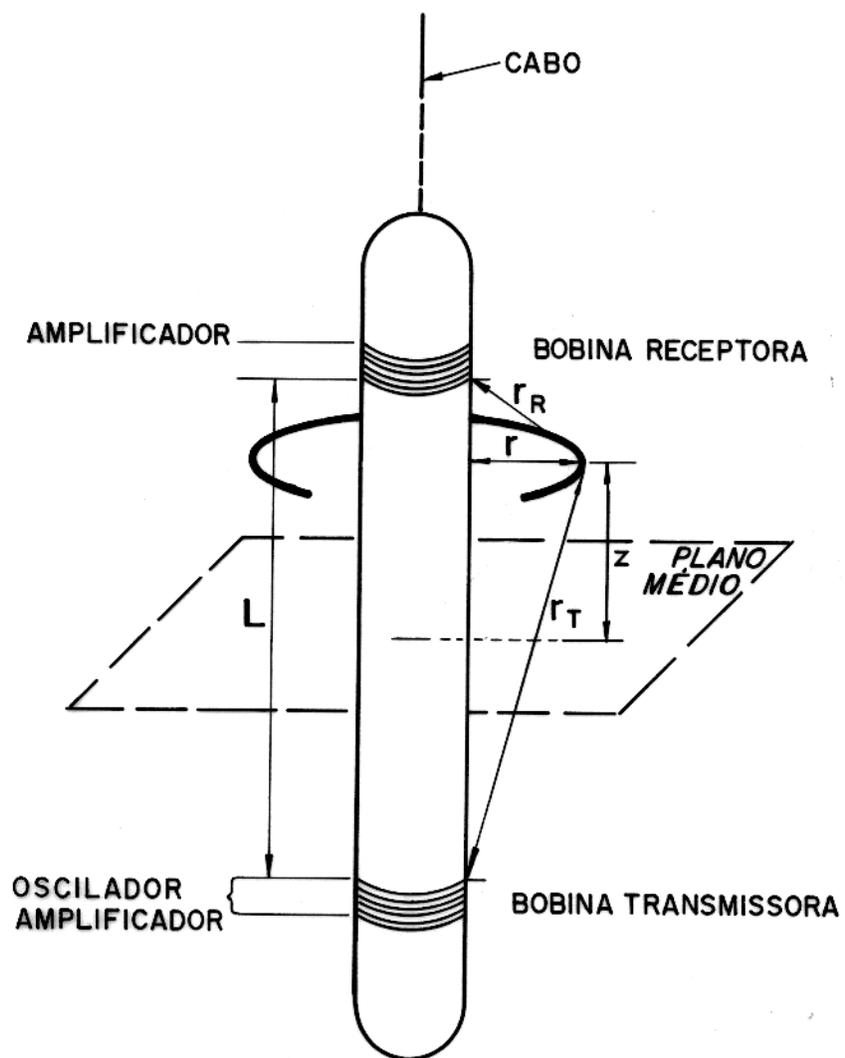


Figura 1.2 - Ferramenta de indução eletromagnética com duas bobinas (Doll, 1949).

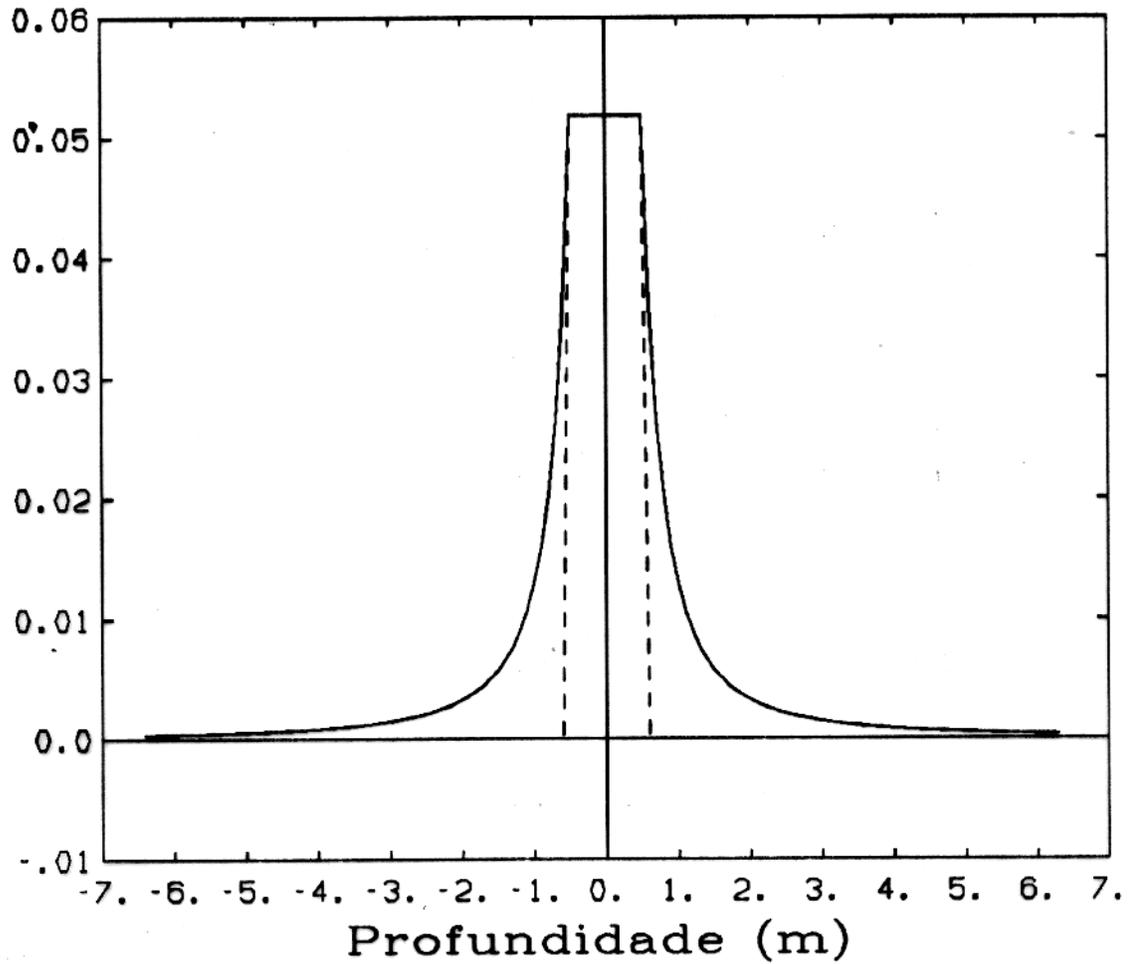


Figura 1.3 - Função resposta vertical para a ferramenta indução eletromagnética de duas bobinas (Doll, 1949) (linha sólida). Função resposta vertical ideal (linha tracejada).

Observa-se que a função resposta vertical (Figura 1.3) se mantém constante no intervalo de $-0,5$ a $0,5$ metros, que é a distância entre as bobinas e infelizmente não cai a zero tão rápido o quanto seria necessário para evitar o efeito danoso da contaminação do valor registrado com informações indesejáveis provindas de regiões distantes da região de interesse. Um exemplo desse efeito é o efeito das camadas adjacentes (*shoulder-bed effect*), característico das ferramentas de indução eletromagnética, que se traduz pela influência de uma camada condutiva na medida realizada frente a uma camada resistiva adjacente. Uma função resposta vertical ideal (Figura 1.3) deveria ser nula para todos os pontos fora do intervalo de interesse, no caso, a distância entre as bobinas.

A aproximação linear, proposta por Doll (1949) negligencia os efeitos de propagação da onda eletromagnética no interior da formação (*skin effect*). Gianzero & Anderson (1972), através da solução das equações de Maxwell, demonstraram que a função resposta vertical para a ferramenta de indução é diferente a cada ponto do perfil, sendo esta variação dependente dos efeitos de propagação, que se agravam para altos valores de condutividade.

A Figura 1.4, mostra algumas formas da função resposta vertical da ferramenta, obtidas por Gianzero & Anderson (1972), em função da condutividade da formação.

1.2.5 A Operação de Convolução

Convolução é a operação matemática definida pela seguinte integral

$$y(z) = \int_{-\infty}^{\infty} x(z - \zeta) h(\zeta) d\zeta = x(z) * h(z) \quad (1.7)$$

Para uma melhor compreensão das implicações físicas da expressão acima, necessitamos de um conceito fundamental: *Os sistemas lineares*. (Figura 1.5)

Em termos gerais, um sistema linear pode ser definido como uma transformação de um conjunto de funções—entrada em um conjunto de funções—saída. Uma equivalente, mas menos compacta descrição seria definir um sistema como uma abstração matemática, que representa o modelo de um fenômeno físico, constituído por uma função—entrada, uma função—saída e uma relação de causa e efeito entre elas. É usual a seguinte notação para expressar uma relação de causa e efeito

$$y(z) = \mathfrak{R}[x(z)] \quad (1.8)$$

Limitaremos nossa atenção, para os sistemas lineares e estacionários. Um sistema linear é caracterizado pela relação

$$y_1(z) = \mathfrak{R}[x_1(z)] \quad \text{e} \quad y_2(z) = \mathfrak{R}[x_2(z)]$$

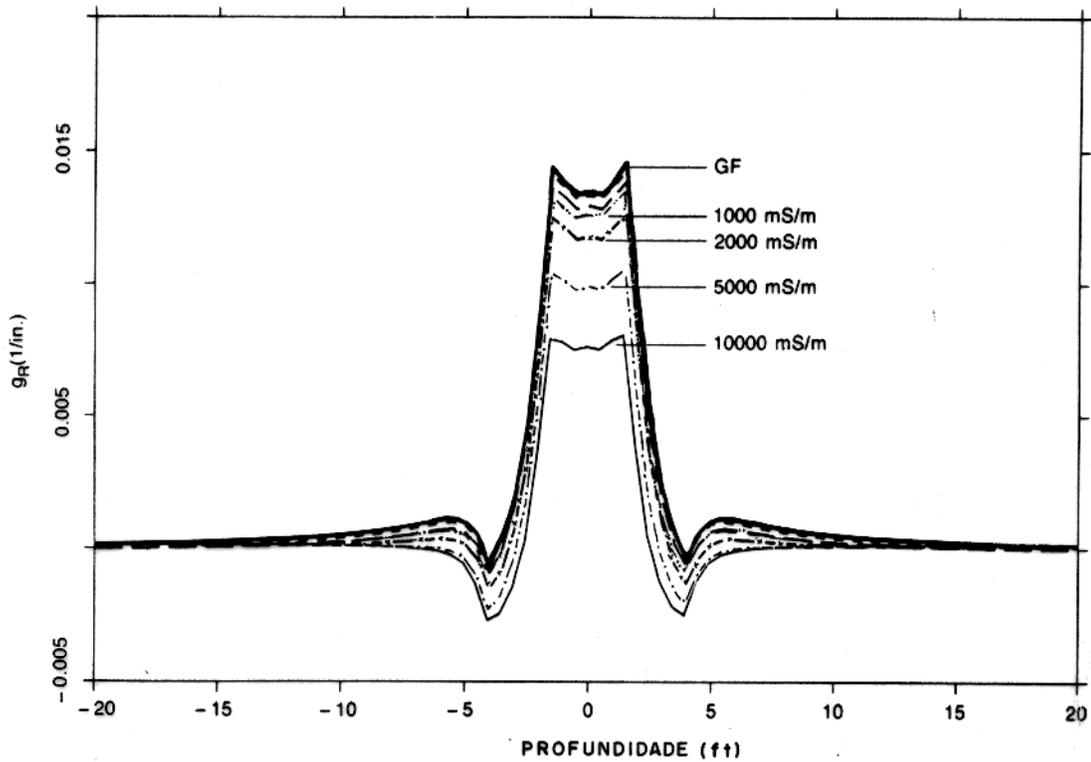


Figura 1.4 - Função resposta vertical para a ferramenta indução eletromagnética convencional, para alguns valores de condutividade (Gianzero & Anderson, 1972).

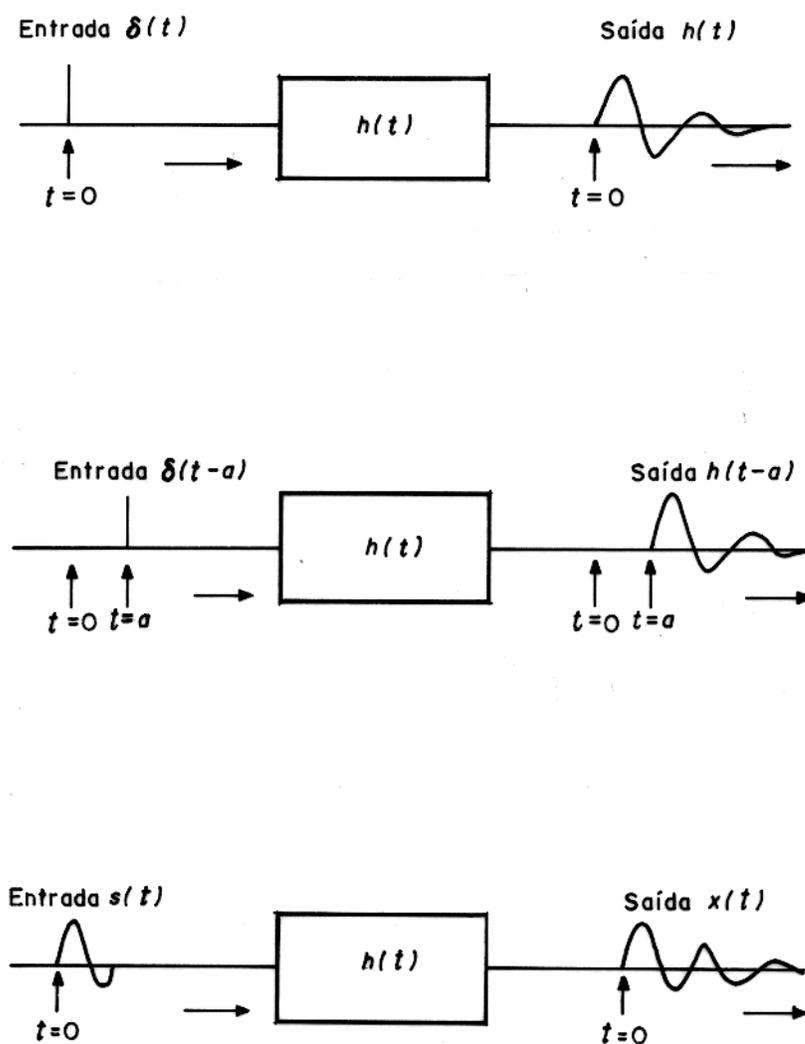


Figura 1.5 - Representação esquemática de um sistema linear e estacionário.

$$\mathfrak{R}[ax_1(z) + bx_2(z)] = ay_1(z) + by_2(z) \quad (1.9)$$

onde a e b são constantes arbitrárias. Um sistema é dito estacionário se e somente se para um valor ζ fixo, tivermos

$$\mathfrak{R}[x(z - \zeta)] = y(z - \zeta) \quad (1.10)$$

Em outras palavras, um sistema linear é estacionário se e somente se um deslocamento na função-entrada corresponder ao mesmo deslocamento na função-saída.

Um sistema linear pode ser perfeitamente caracterizado através do conhecimento de sua resposta quando a função-entrada é a função impulso (delta de Dirac, $\delta(z)$). Seja \mathfrak{R} um sistema que transforma uma função-entrada $x(z)$ qualquer, na correspondente função-saída $y(z)$. Definimos a resposta ao impulso $h(z)$, deste sistema como a função-saída, quando o sistema é excitado com a função impulso $\delta(z)$, isto é

$$h(z) = \mathfrak{R}[\delta(z)] \quad (1.11)$$

Para mostramos então, a operação de convolução, tomamos uma função arbitraria $x(\Delta Z)$ (Figura 1.6), cujo domínio foi dividido em intervalos iguais, de largura ΔZ . Construímos agora, em cada ponto $k\Delta Z$ um retângulo de altura $x(k\Delta Z)$ e largura ΔZ . Como entrada no sistema \mathfrak{R} consideramos uma combinação linear de funções impulso deslocadas $\delta(z - k\Delta Z)$, ponderadas pela constante $x(k\Delta Z)\Delta Z$, ou seja

$$g(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(k\Delta Z)\Delta Z \delta(z - k\Delta Z) \quad (1.12)$$

As propriedades que caracterizam os sistemas lineares, a linearidade e a estacionariedade garantem, que a função-saída apresenta a mesma combinação linear e o mesmo deslocamento da função-entrada

$$y(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(k\Delta Z)\Delta Z h(z - k\Delta Z) \quad (1.13)$$

Temos então, um trem infinito de impulsos ponderados, que excitam o sistema, consequentemente a saída será uma combinação linear das respostas de cada impulso isoladamente. Se nas equações (1.12) e (1.13), fizermos a largura ΔZ de cada retângulo tender a zero e lançarmos mão de uma aproximação heurística, nós podemos razoavelmente entender que $k\Delta Z$ se aproxima de uma variável continua z , ΔZ torna-se dz e o somatório transforma-se em uma integral. Assim, podemos escrever a equação (12) na forma

$$g(z) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\zeta)\delta(z - \zeta)d\zeta = x(z) * \delta(z) = x(z) \quad (1.14)$$

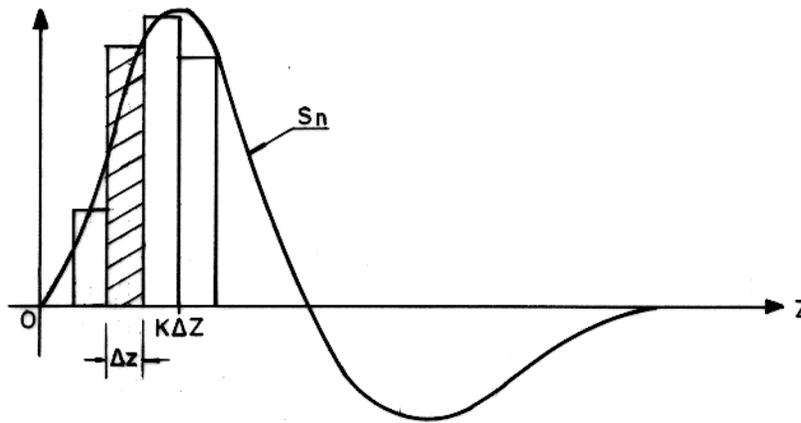


Figura 1.6 - Exemplo de uma função arbitrária, mostrando o processo de convolução no domínio da profundidade.

onde aplicamos a propriedade fundamental da função impulso. Assim, pelas mesmas razões podemos escrever a equação (1.13) na forma

$$y(z) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\zeta)h(z - \zeta)d\zeta = x(z) * h(z) \quad (1.15)$$

A equação (1.15) nos diz que a saída $y(z)$ de um sistema linear e estacionário, resultante de uma entrada $x(z)$, qualquer é simplesmente descrita pela convolução da função—entrada com a função resposta ao impulso $h(z)$ do sistema. Assim se sabemos como o sistema responde quando excitado por um impulso, então podemos usar a equação (1.15) para calcular sua resposta para qualquer função—entrada.

A operação de convolução pode, também, ser expressa na forma discretizada, através da expressão

$$y_n = \sum_{i=0}^{N-1} x_{n-i} h_i \quad (1.16)$$

Onde: x_n , y_n e h_n representam sequências finitas e n neste contexto é a discretização da variável contínua z . Observe que nesta definição as sequências y_n , x_n e h_n são consideradas periódicas com período N .

2 - A DECONVOLUÇÃO DE PERFIS DE POÇO

O sinal obtido a partir da passagem de uma ferramenta de perfilagem ante uma formação rochosa pode ser considerado, a cada ponto de observação, como uma média ponderada do valor do parâmetro petrofísico sobre todo o volume de rocha investigado. Nos concentramos agora sobre a função resposta vertical da ferramenta na forma unidimensional, onde deve ser explicitado que este conceito é uma simplificação, desde que ele implica na hipótese de que a formação rochosa que envolve o poço é homogênea radialmente (Looyestijn, 1982). Normalmente, ela é utilizada como uma função-peso, quando consideramos um perfil petrofísico, onde o valor registrado a cada ponto pode ser considerado o resultado de uma média móvel ponderada do valor do parâmetro da formação no ponto e em toda a sua vizinhança ao longo do poço, ou seja, em profundidade. Em outras palavras, a função resposta vertical da ferramenta contamina o valor real do parâmetro, com informações indesejáveis das vizinhanças.

No processamento de sinais, um sinal ou perfil degradado pela ação dos instrumentos de registro é matematicamente representado através da operação de convolução entre o sinal real e a função resposta da ferramenta. A condição básica para a hipótese de unicidade da resposta da ferramenta é que o sistema seja linear. Isto implica em que a função resposta vertical da ferramenta, seja independente do parâmetro a ser medido, bem como de suas variações e contrastes em profundidade, ao longo do poço.

A deconvolução pode ser conceituada, como a operação inversa à operação de convolução. Podendo ser executada, para o caso dos perfis petrofísicos, tanto no domínio da profundidade, quanto no domínio da frequência espacial, com o objetivo de resgatar a real variação com a profundidade do parâmetro petrofísico mensurado. Cabe ressaltar, que a deconvolução de perfis petrofísicos é uma operação unidimensional, por isto variações bidimensionais inerentes ao ambiente do poço, como a invasão do filtrado da lama, inclinação do seu eixo ou presença de camadas inclinadas podem afetar desfavoravelmente a qualidade do processo.

2.1 O MODELO CONVOLUCIONAL

Normalmente as técnicas de processamento de sinais tratam com dados na forma discretizada, onde o sinal é matematicamente descrito através da operação de convolução no domínio da profundidade. Assim, tomamos a operação de convolução, para o caso geral de

duas sequências espaciais, consideradas periódicas, com período N , descrita pela equação (1.16) reescrita abaixo

$$y_n = \sum_{i=0}^{N-1} x_{n-i} h_i \quad (2.1)$$

2.2 A DECONVOLUÇÃO NO DOMÍNIO DA PROFUNDIDADE

O procedimento para a obtenção da operação inversa da convolução ou seja a deconvolução no domínio da profundidade se inicia escrevendo a equação (2.1) na forma matricial

$$\bar{Y} = [\bar{H}]^t \bar{X} \quad (2.2)$$

onde: \bar{Y} e \bar{X} são matrizes-coluna e \bar{H} é uma matriz quadrada tipo banda diagonal na forma

$$\begin{pmatrix} h(0) & h(1) & h(2) & \dots & 0 \\ h(-1) & h(0) & h(1) & \dots & 0 \\ h(-2) & h(-1) & h(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h(0) \end{pmatrix}$$

e o superescrito t indica a matriz transposta. Admite-se por simplicidade, que a função resposta vertical da ferramenta seja perfeitamente simétrica em relação à origem.

O problema da deconvolução pode agora ser estabelecido como a obtenção da inversão da matriz \bar{H} , tal que, possamos escrever

$$\bar{X} = [[\bar{H}]^t]^{-1} \bar{Y} \quad (2.3)$$

denotando: $\bar{G} = [[\bar{H}]^t]^{-1}$ podemos reescrever a equação (2.3) como

$$\bar{X} = \bar{G} \bar{Y}$$

ou na expressão de somatório

$$x_n = \sum_{i=0}^{N-1} y_{n-i} g_i \quad (2.4)$$

onde verificamos, que a deconvolução nada mais é do que a operação de convolução do sinal medido, y_n , com o operador g_n , que é normalmente referenciado como *operador inverso* ou *operador deconvolucional*.

Os efeitos práticos desta abordagem são muito limitados, uma vez que os ruídos inerentes à qualquer medida real são negligenciados, bem como da necessidade de utilização de um número infinito de pontos para a obtenção da deconvolução ideal (Foster *et al*, 1962).

Uma melhor formulação para o problema inverso é a abordagem segundo o critério de Wiener (Foster *et al*, 1962), onde se realiza a minimização de uma função—objeto no sentido dos mínimos quadrados, normalmente conhecidos como filtros ótimos. Um exemplo dessa metodologia é apresentado por Foster *et al* (1962) para o perfil sônico, onde a implementação do método requer o conhecimento das estatísticas de primeira e segunda ordem do processo aleatório associado à variável tempo de trânsito, considerada como uma sequência do tipo ruído branco. Looyestijn (1982), apresenta alguns exemplos desta metodologia aplicada aos perfis sônico, nucleares e elétricos. Concluindo:

- Os perfis sônicos apresentam bons resultados desde que as condições do poço não interfiram no processo. A resolução vertical pode chegar a 30cm.
- Os perfis nucleares não são passíveis de terem a sua resolução vertical aumentada por meio dessa metodologia devido a não linearidade da resposta da ferramenta.
- Esta metodologia não se aplica aos perfis elétricos, devido a variação da resposta da ferramenta com a condutividade das camadas.

Uma outra abordagem, empregando agora o filtro de Kalman, que apresenta algumas diferenças em relação aos filtros ótimos, foi apresentada por Lyle & Williams (1986) para o perfil de indução, através de um processo iterativo com a introdução de informações novas (*innovations approach*), que são informações introduzidas na estimativa posterior, que não estavam contidas na estimativa anterior da medida. Esse método dispensa o conhecimento de parâmetros estatísticos do processo e é computacionalmente eficiente.

Outra abordagem para a deconvolução no domínio do tempo é a metodologia apresentada por Nelson & Mitchell (1990), onde são utilizadas as informações de uma ferramenta de investigação rasa para promover o aumento da resolução vertical do perfil de indução. O método se baseia na existência de correlação linear entre os dois perfis e utiliza uma rotina de minimização para calcular um filtro, que aplicado ao perfil de alta resolução produziria uma função resposta vertical igual à do perfil de indução. Um ajuste linear entre os perfis de alta resolução filtrado e não filtrado produz um valor de correção para cada ponto, que

é utilizado para o aumento da resolução vertical do perfil de baixa resolução. Este método apresenta problemas quando a correlação entre os perfis é prejudicada devido aos efeitos do ambiente do poço, sendo desastrosos os efeitos da invasão.

2.3 A DECONVOLUÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA ESPACIAL

Uma maneira mais elegante de se visualizar a equação (2.1) é através de uma transformação integral, sendo a mais eficiente, no caso, a transformada de Fourier. Esse processo, apesar da simplicidade operacional aliada à grande eficiência computacional, necessita cuidados, pois normalmente apresenta uma tendência para a amplificação do efeito dos ruídos ou das flutuações estatísticas presentes nos dados originais sobre os dados tratados, bem como falsos resultados podem surgir a partir das instabilidades numéricas. O trabalho é conceitualmente fácil se o espectro da função resposta vertical da ferramenta não corta o eixo das frequências e não apresenta valores muito próximos de zero. Um cruzamento do eixo das frequências significa que a ferramenta falhou na medida de uma determinada frequência espacial do parâmetro da formação. Estas frequências não podem conseqüentemente serem reconstituídas, sendo conhecidas como frequências cegas (*blind frequencies*) (Barber, 1988). Um exemplo de ferramenta cuja função resposta vertical da ferramenta não apresenta frequências cegas é a de raios gama natural.

Os processos de deconvolução na frequência espacial não apresentam problemas se a função resposta vertical da ferramenta é linear, ou seja, é independente dos valores e da variação dos parâmetros da formação. Normalmente não é o que ocorre na realidade, existindo vários exemplos de funções respostas vertical que são extremamente dependentes dos parâmetros mensurados. O exemplo clássico dessa situação é o perfil de indução eletromagnética, que além disso, apresenta um espectro que corta o eixo das frequências. Os casos em que a função resposta vertical da ferramenta é dependente do parâmetro mensurado (caso não linear) torna a deconvolução duplamente difícil e em geral somente uma deconvolução parcial pode ser obtida (Barber, 1988).

Assim, a situação ideal para a deconvolução no domínio da frequência espacial, pode então, ser caracterizada por dois parâmetros:

- Unicidade da função resposta vertical da ferramenta por todo o perfil, ou seja a sua total independência do parâmetro mensurado, isto traduz a linearidade do sistema.
- Inexistência de frequências cegas ou de valores do espectro muito próximos de zero.

2.3.1 A Transformada de Fourier

A transformada de Fourier, normalmente é conceituada como uma representação de uma função definida em um domínio, por exemplo o tempo, em um outro domínio, a frequência. No entanto não existe impedimento algum em se representar funções definidas em um domínio caracterizado por uma variável espacial (profundidade) em um outro domínio representado pela frequência espacial.

Tomamos a função $y(z)$ definida em todo o eixo real $R = (-\infty, \infty)$, assim, o par de transformadas de Fourier profundidade (z) – frequência espacial (k), na forma contínua é definido por

$$Y(k) = \int_R y(z) e^{-ikz} dz \quad (2.5)$$

$$y(z) = \frac{1}{2\pi} \int_R Y(k) e^{ikz} dk \quad (2.6)$$

Onde a equação (2.5) é chamada transformada direta de Fourier e a equação (2.6), de transformada inversa de Fourier e

$$k = \frac{2\pi}{Z}$$

onde Z é o período.

Podemos representar a transformada de Fourier na forma de um operador linear

$$Y(k) = \mathcal{F} [y(z)]$$

sendo o par de transformadas representado por

$$Y(k) \iff y(z)$$

As integrais envolvidas nas equações (2.5) e (2.6) devem ser avaliadas no sentido das integrais de Lebesgue. No caso geral a função $y(z)$ pode ser tanto real como complexa. No caso mais comum, a função no domínio da profundidade é real e a sua correspondente representação no domínio da frequência é complexa, contendo informação de amplitude e fase.

Para o tratamento de sinais digitais é de grande interesse a transformada de Fourier na forma discretizada, que é uma aproximação da transformada de Fourier na forma contínua

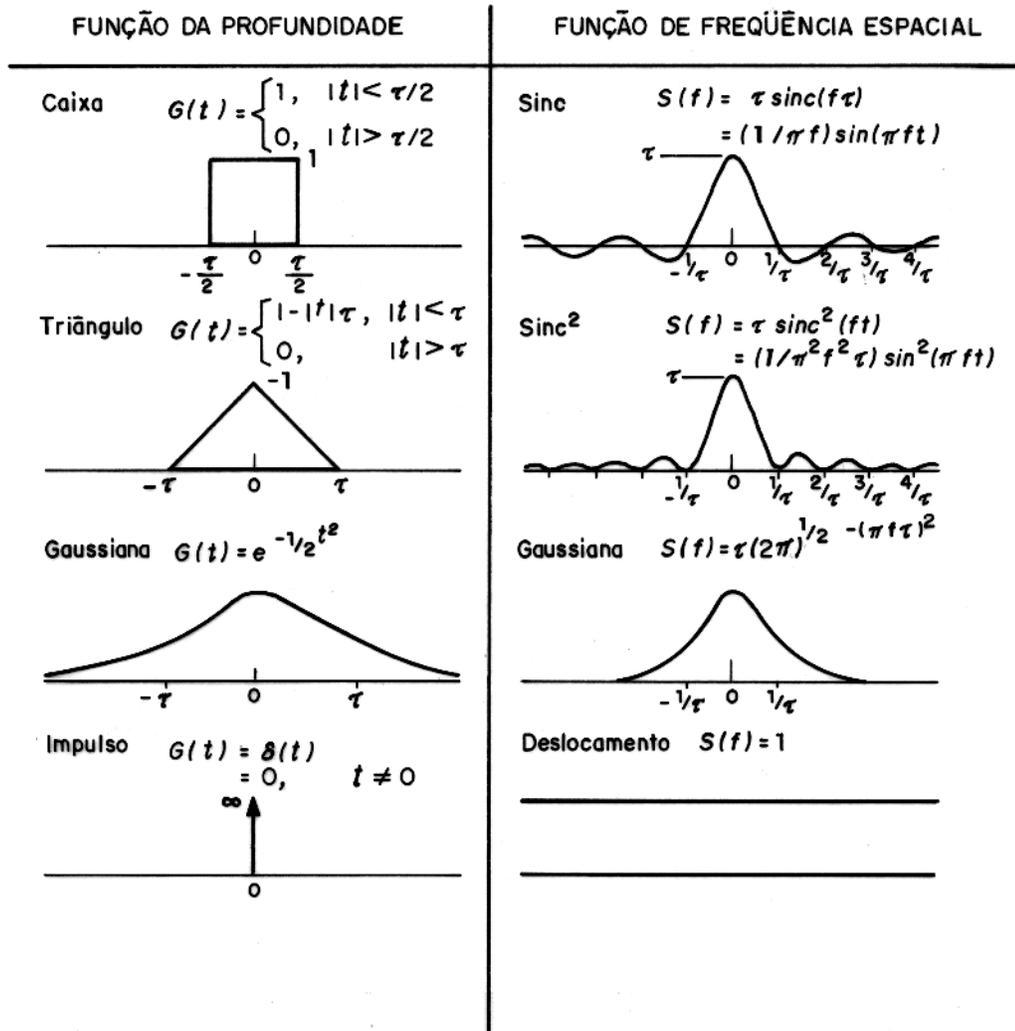


Figura 2.1 - Exemplos de pares de transformadas de Fourier.

através da discretização do eixo- z e do eixo- k , na forma

$$z = n\Delta z \quad \Rightarrow \quad \Delta z = \frac{Z}{N} \quad (2.7)$$

$$k = m\Delta k \quad \Rightarrow \quad \Delta k = \frac{2\pi}{Z} = \frac{2\pi}{N\Delta z} \quad (2.8)$$

assim a expressão para expoente da exponencial fica

$$z k = n m \Delta z \Delta k = n m \frac{2\pi}{N}$$

e a forma discretizada pode ser expressa pelas seguintes expressões

$$Y_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-i2\pi \frac{nm}{N}} \quad (2.9)$$

$$y_n = \sum_{m=0}^{N-1} Y_m e^{i2\pi \frac{nm}{N}} \quad (2.10)$$

Um importante conceito sobre a transformada discreta de Fourier é que ela implica em periodicidade tanto no domínio do espaço quanto no domínio da frequência espacial.

2.3.2 A Janela

A aplicação prática da transformada discreta de Fourier exige a utilização de algoritmos computacionalmente eficientes, conhecidos pela denominação genérica de FFT. Uma característica comum à grande maioria desses métodos é a exigência de que o número de amostras da função a ser operada seja uma potência inteira de 2. Outro aspecto importante é a necessidade de se tratar com um número finito de dados, compatível com um menor custo computacional, isto leva à necessidade de se particionar o conjunto de dados em trechos menores, que necessariamente não possuam um número de amostras com o valor de uma potência inteira de 2.

Esses dois aspectos podem ser convenientemente tratados a partir da escolha de uma janela apropriada para os dados, tal que possua *a priori* um número de amostras compatível para a utilização dos algoritmos de FFT, independente do número de amostras do trecho de trabalho do perfil. Neste trabalho fizemos opção pela adoção de uma janela do tipo *Cosseno-retangular* (Bath, 1979), mostrada na Figura 2.2 (A) e descrita pela expressão

$$j_{CR}(z) = \begin{cases} \frac{1}{2Z} (1 + \cos \frac{5\pi z}{Z}) & ; -Z \leq z \leq \frac{-4Z}{5} \\ \frac{1}{Z} & ; \frac{-4Z}{5} \leq z \leq \frac{4Z}{5} \\ \frac{1}{2Z} (1 + \cos \frac{5\pi z}{Z}) & ; \frac{4Z}{5} \leq z \leq Z \end{cases}$$

onde, Z é o período adotado.

O correspondente espectro da janela (Figura 2.2 (B)) é dado por (Bath, 1979)

$$J_{CR}(k) = \frac{\text{sen}(kZ) + \text{sen}\left(\frac{4kZ}{5}\right)}{kZ\left(1 - \left(\frac{kZ}{5\pi}\right)^2\right)}$$

Para a operação com os dados de perfis de poço, em particular, não existe nenhum critério pré-estabelecido para a escolha da melhor janela. No tratamento de sinais, em geral, dois critérios necessitam ser satisfeitos:

- A janela deve possuir sua maior expressão ao redor do lóbulo central, na frequência. O que requer uma janela larga no domínio da profundidade.
- A janela deve possuir lóbulos laterais pequenos ou desprezíveis, na frequência. O que requer uma função suave no domínio da profundidade.

O procedimento prático para a aplicação de janelas aos perfis pode ser sumarizado na forma:

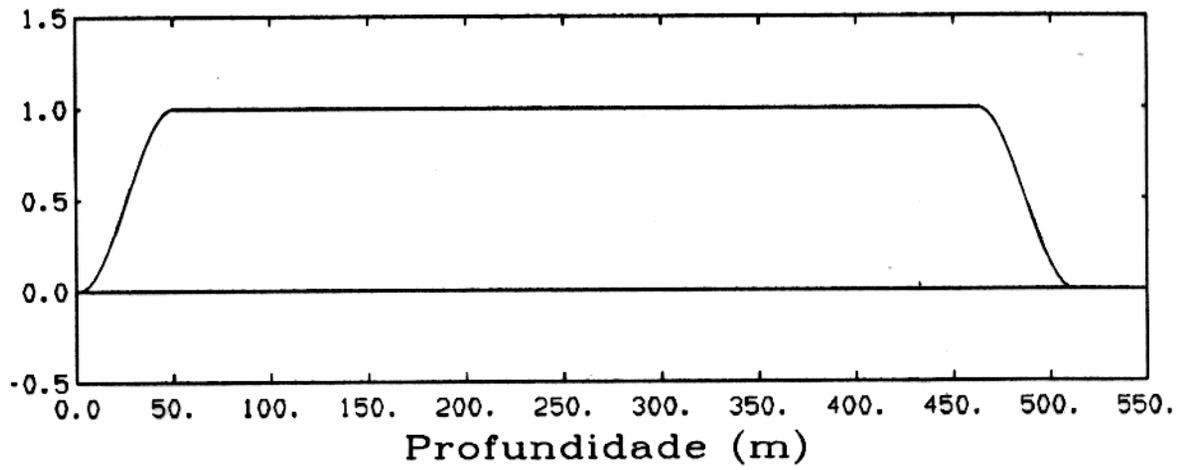
- Multiplicação em profundidade do trecho de perfil pela janela.
- Cálculo da transformada de Fourier, no caso discreto, através de um algoritmo de FFT.

Em nossa experiência, a janela cosseno-retangular mostrou ser a de maior eficiência, pois, mantém inalteradas as amplitudes dos dados no trecho de trabalho, que são incluídos no trecho plano e efetua uma boa finalização das extremidades dos dados, de tal forma que o número final de amostras seja uma potência de 2, produzindo espectros mais estáveis e reduzindo o efeito de frequências indesejáveis, quando do cálculo das transformadas inversas.

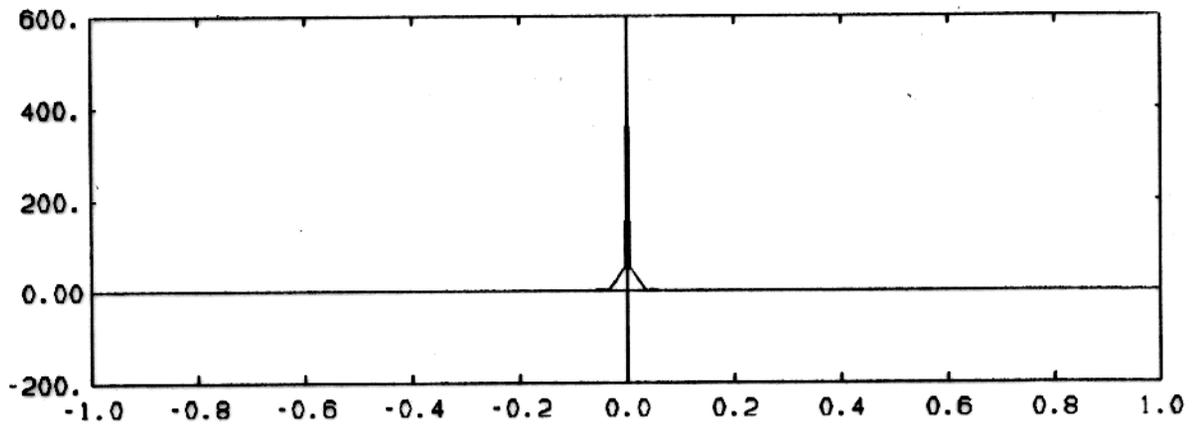
2.3.3 O Teorema da Convolução

O teorema da convolução é um teorema clássico em todas as aplicações de tratamento de sinais. Este teorema pode ser apresentado na forma contínua ou na forma discretizada. Para enfatizar o caráter computacional de sua aplicação à dados de perfis petrofísicos, o apresentaremos na sua forma discretizada, no domínio da profundidade.

O teorema explicita que se duas sequências x_n e h_n possuem transformadas discretas de Fourier dadas por X_m e H_m , respectivamente, então a transformada discreta de Fourier



(a)



(b)

Figura 2.2 - A janela cosseno-retangular (A) e seu espectro na frequência espacial (B).

da convolução dessas seqüências no domínio da profundidade é dado pelo produto de suas transformadas (Weaver, 1990), isto é

$$\mathcal{F}[x_n * h_n] = N(X_m H_m)$$

Para mostrar esse teorema, adotaremos o desenvolvimento de Weaver (1990), iniciando com o produto das transformadas discretas de Fourier da duas seqüências espaciais

$$X_m H_m = \left[\frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} x_q E_N^{-qm} \right] \left[\frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} h_p E_N^{-pm} \right]$$

onde $E_N = e^{i2\pi}$.

$$X_m H_m = \frac{1}{N^2} \sum_{q=0}^{N-1} \left[\sum_{p=0}^{N-1} x_q h_p \right] E_N^{-(q+p)m}$$

Efetuada a seguinte substituição $n = q + p$, obtemos

$$X_m H_m = \frac{1}{N^2} \sum_{q=0}^{N-1} \left[\sum_{n=q}^{N+q-1} x_q h_{n-q} \right] E_N^{-nm}$$

Mudando a ordem dos somatórios e reajustando seus limites, levando em consideração a periodicidade das seqüências, temos

$$X_m H_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} x_q h_{n-q} \right] E_N^{-nm}$$

onde identificamos no interior dos colchetes a operação de convolução das duas seqüências. Assim podemos escrever

$$X_m H_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N} (x_n * h_n) \right] E_N^{-nm}$$

ou formalmente

$$X_m H_m = \frac{1}{N} \mathcal{F}[x_n * h_n]$$

Podemos agora, interpretar esse teorema de uma outra forma, ou seja, a transformada de Fourier do produto de duas seqüências definidas em um domínio é igual à convolução de suas respectivas transformadas (Kanasewich, 1975).

2.3.4 A Operação

Tratamos novamente com a equação (2.1), que descreve a convolução no domínio da profundidade, repetida abaixo por conveniência

$$y_n = \sum_{i=0}^{N-1} x_{n-i} h_n \quad (2.11)$$

Desejamos agora estudar esta expressão no domínio da frequência espacial. Para tanto, consideramos os seguintes pares de transformadas discretas de Fourier

$$\begin{aligned} Y_m &\iff y_n \\ X_m &\iff x_n \\ H_m &\iff h_n \end{aligned}$$

Com base no teorema da convolução, podemos reescrever a equação (2.11), na seguinte forma

$$Y_m = X_m H_m \quad (2.12)$$

Como podemos verificar, a operação inversa para a obtenção de X_m é agora, simplesmente algébrica, ou seja

$$X_m = Y_m G_m \quad (2.13)$$

onde

$$G_m = \frac{1}{H_m} \quad (2.14)$$

A equação (2.13) é a expressão clássica para a deconvolução no domínio da frequência espacial (Hamming, 1983). Através da expressão para G_m , fica evidente o efeito da presença de frequências cegas no espectro (H_m) da função resposta vertical da ferramenta, sobre a deconvolução de perfis. A partir da equação (2.13), por meio da transformada discreta inversa de Fourier, escreve-se a expressão para x_n no domínio da profundidade.

A abordagem de se desenvolver a operação de deconvolução no domínio da frequência aplicada aos perfis de poço, teve seu desenvolvimento ligado à ferramenta de indução eletromagnética e a importância desse perfil para a avaliação de formação. No início dos anos setenta Richard Schaefer (Anderson *et al*, 1987), adotou a teoria do fator geométrico de Doll

e um modelo convolucional para escrever uma equação que descreveria o sinal gerado pela ferramenta de indução eletromagnética, na forma

$$\sigma_{GF}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{GF}(\zeta) \sigma_t(z - \zeta) d\zeta \quad (2.15)$$

na qual $\sigma_{GF}(z)$ é a condutividade aparente registrada pela ferramenta, $\sigma_t(z)$ é a condutividade real da formação e $g_{GF}(z)$ é o fator geométrico vertical, segundo a teoria de Doll.

A partir da transformada de Fourier, com base no teorema da convolução, Schaefer escreveu a equação (2.15) no domínio da frequência espacial

$$\Sigma_{GF}(k) = G_{GF}(k) \Sigma_t(k) \quad (2.16)$$

onde as letras maiúsculas representam as respectivas transformadas de Fourier das letras minúsculas e k é a frequência espacial, cuja unidade é o inverso do comprimento. Operando algebricamente, Schaefer determinou o filtro inverso ideal, na forma

$$H_{GF}(k) = \frac{1}{G_{GF}(k)} \quad (2.17)$$

Neste ponto Schaefer se depara com o problema da presença de frequências cegas no espectro da função resposta vertical da ferramenta de indução, onde é impossível obter um valor para $H_{GF}(k_0)$ quando para k_0 , temos $G_{GF}(k_0) = 0$. Em outras palavras, isto é equivalente a tentar restaurar uma informação que foi irremediavelmente destruída pelo processo de obtenção das medidas. Sua primeira tentativa em resolver o problema foi fazer $H_{GF}(k) = 0$ para todas as frequências acima de k_0 , ou primeira frequência cega. Isto equivale a cortar toda a informação de alta frequência contida em $H_{GF}(k)$. Neste caso a aplicação da transformada inversa de Fourier, resultaria em um filtro de comprimento infinito, impraticável para utilizações práticas. A solução apresentada para este novo problema foi a aplicação da janela de Kaiser, uma função que suaviza filtros infinitos com um mínimo de dano em seu conteúdo de frequência. A aplicação do filtro deconvolutivo assim obtido, produz um valor próximo ao real apenas na região central da camada, apresentando problemas nas bordas e devido à consideração da teoria do fator geométrico de Doll, ele é válido apenas para as baixas condutividades, pois despreza os efeitos de propagação (*skin effect*).

Com o desenvolvimento de uma ferramenta de indução eletromagnética, conhecida como ferramenta duplo-indução eletromagnética (PHASOR, *Schlumberger*), a qual é capaz de mensurar o sinal correspondente ao acoplamento direto (*X-signal*), foi possível a correção dos efeitos de propagação. Barber (1985), desenvolveu um filtro deconvolutivo, chamado *Phasor deconvolution*, que efetua uma correção do filtro de Schaefer nas bordas das camadas.

Barber expressa a redução na medida da condutividade da formação devido aos efeitos de propagação $\sigma_S(z)$ através da relação

$$\sigma_S(z) = \sigma_{GF}(z) - \sigma_P(z) \quad (2.18)$$

onde $\sigma_{GF}(z)$ é a condutividade prevista pela teoria do fator geométrico e $\sigma_P(z)$ é a condutividade registrada pela ferramenta. O erro devido aos efeitos de propagação é causado pela atenuação e o deslocamento de fase da onda eletromagnética quando esta se propaga em um meio dispersivo, tal como a formação rochosa que envolve o poço. A partir desta correção o perfil deconvoluido apresenta bons resultados em uma ampla faixa de condutividades (de 1 a 1000 mS/m).

Em 1988, Barber apresentou uma nova metodologia para a ferramenta de indução, que além da correção do efeito das camadas adjacentes apresenta uma solução para o problema das frequências cegas, que limitam a resolução vertical do arranjo de bobinas de investigação profunda às camadas com espessura superior a 1,5 m. Esse novo processo, conhecido como *Enhanced Resolution Phasor*, que resolve o problema das frequências cegas através da introdução, nessas frequências, de informações do arranjo de bobinas de investigação rasa. A aplicação da análise de Fourier demonstra que toda a informação de alta resolução contida na medida dos dois arranjos provem da mesma região da formação. Assim este processo permite a perfeita resolução de camadas de até 0,9 m de espessura mantendo a profundidade de investigação inalterada.

3 - METODOLOGIA

A deconvolução aplicada aos perfis petrofísicos, trata normalmente com dados que foram gerados na presença de uma ou mais fontes de degradação como uma consequência da complexidade do ambiente do poço e das características físicas da ferramenta de perfilagem. A complexidade do ambiente do poço é a responsável pelas fontes de degradação de natureza eminentemente aleatória ou probabilística, sendo normalmente referidas como fontes de ruídos, caracterizando-se pela introdução de adulterações na grandeza da medida ideal de caráter aditivo e local. Cabe ressaltar que a hipótese de ruído aditivo é puramente uma simplificação matemática para o problema. As fontes de contaminação associadas às características físicas da ferramenta estão diretamente relacionadas ao obscurecimento da grandeza mensurada, não mais, se caracterizando como alterações locais, mas sim, se estendendo por todo o volume de rocha investigado ao longo da corrida da ferramenta, possuindo um caráter eminentemente determinístico, interferindo sobre parâmetros importantes da perfilagem de poço, como a profundidade de investigação radial e resolução vertical da ferramenta.

3.1 O MODELO TEÓRICO

Dado um perfil real ou degradado $y(z)$, assumimos a seguinte relação clássica entre ele e o correspondente perfil ideal $x(z)$

$$y(z) = \int_R x(\zeta) h(z - \zeta) d\zeta + \nu(z) \quad (3.1)$$

onde, $h(z)$ é a função degradante, que traduz a degradação do perfil ideal devido às fontes de natureza determinística, a qual assumimos, por simplicidade matemática, como unidimensional, ou seja, apenas as adulterações ocorridas ao longo do eixo do poço serão consideradas. $\nu(z)$, representa o ruído, considerado do tipo Gaussiano, possuindo distribuição de probabilidades com média zero e variância finita. ζ representa uma profundidade na formação, com respeito à uma determinada posição da ferramenta, z , onde a medida esta sendo realizada. R é o intervalo de integração, onde assumimos que as funções unidimensionais são definidas em todo o eixo real, assim: $R = (-\infty, \infty)$.

Nesta formulação estamos assumindo que exista uma relação linear e invariante em profundidade entre o perfil ideal e o perfil degradado. Para avaliar o operador $h(z)$, admitimos a ausência de ruídos e que o perfil ideal seja uma função muito concentrada, tipo delta de Dirac, $\delta(z)$. Operando formalmente a expressão 3.1, no sentido das distribuições

$$\begin{aligned} x(z) &= \delta(z) \\ y(z) &= \int_R \delta(\zeta) h(z - \zeta) d\zeta = h(z) \end{aligned} \quad (3.2)$$

onde aplicamos a propriedade fundamental das funções muito concentradas, tipo a delta de Dirac

$$\int_R \delta(\zeta) h(\zeta) d\zeta = h(0)$$

ou

$$\int_R \delta(\zeta) h(z - \zeta) d\zeta = h(z)$$

Assim reconhecemos a integral (3.1) como a operação de convolução no domínio da profundidade e podemos identificar a função $h(z)$ como operador convolucional ou como é clássico no tratamento de sinais, como resposta do sistema linear, estacionário ao impulso ou função resposta vertical da ferramenta, para o caso da perfilagem de poço.

Estudaremos a equação (3.1), onde negligenciamos a presença de ruídos. Estaremos assim enfatizando o efeito das fontes de degradação do perfil associadas unicamente ao aparato de medidas. Assim reescrevemos a equação (3.1) na forma

$$y(z) = \int_R x(\zeta) h(z - \zeta) d\zeta \quad (3.3)$$

Esta equação expressa a degradação sofrida pelo perfil ideal, cuja principal característica é que cada valor registrado representa uma média móvel ponderada do valor real do parâmetro petrofísico na profundidade z e toda a sua vizinhança descrita pelo intervalo de variação da coordenada ζ , teoricamente $(-\infty, \infty)$. Sob um outro ponto de vista, podemos interpretar a função $h(z)$ (Figura 3.1) como uma função peso, em profundidade, que introduz na medida relativa a uma determinada profundidade z , informações provindas das profundidades adjacentes. O efeito desse operador é o de suavizar ou mascarar as rápidas variações do valor do parâmetro medido frente as interfaces das camadas com valores contrastantes.

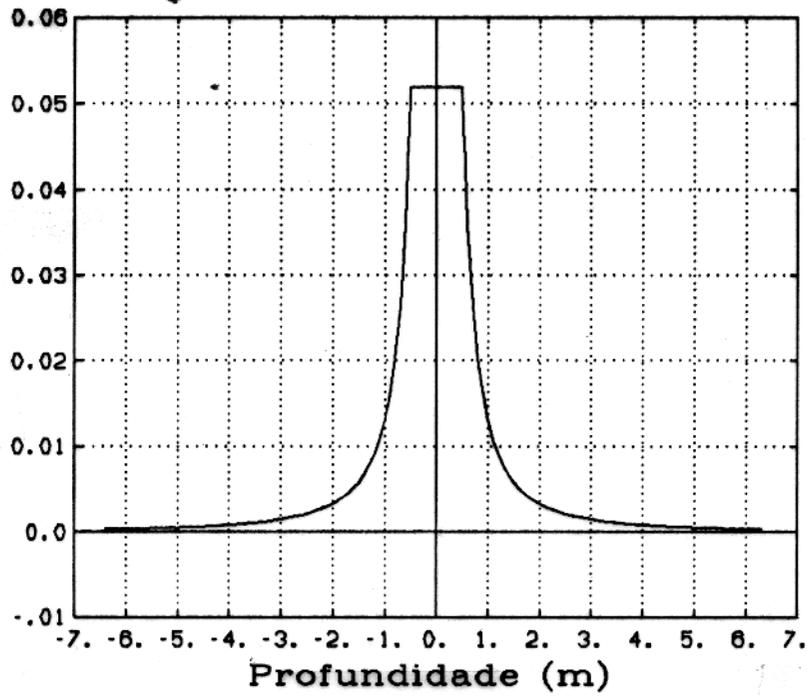


Figura 3.1 - Resposta vertical da ferramenta (Doll, 1949).

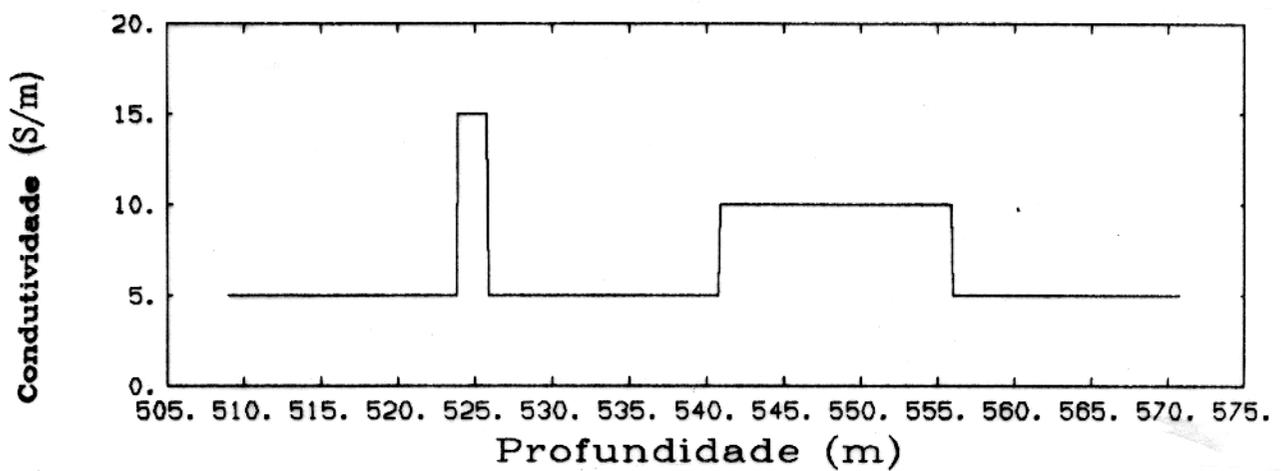


Figura 3.2 - Função contínua por partes, representando a variação de um parâmetro petrofísico com a profundidade.

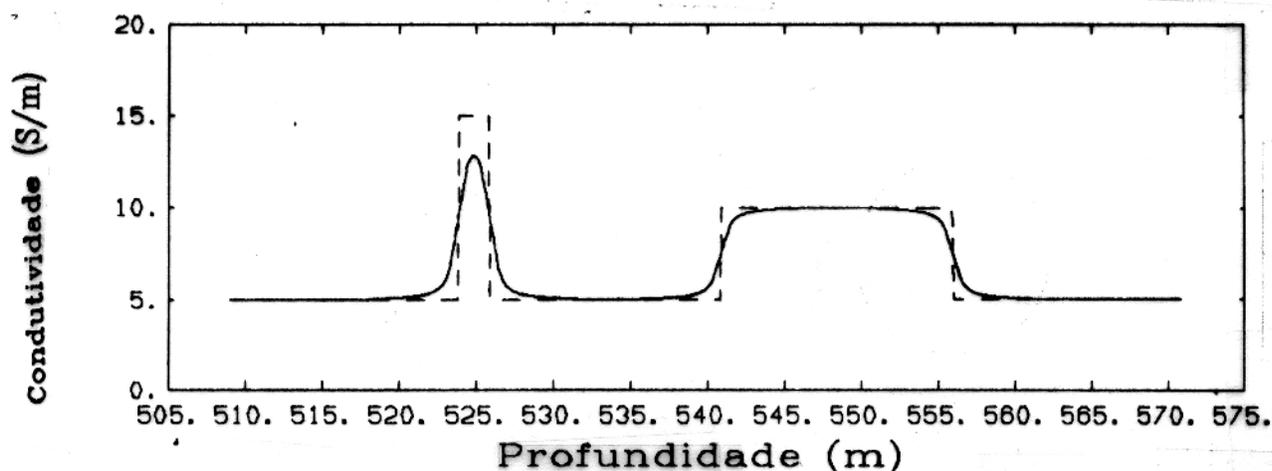


Figura 3.3 - Modelo teórico ou Perfil sintético

O perfil ideal $x(z)$ (Figura 3.2), por sua vez, é comumente descrito por uma função contínua por partes em profundidade, caracterizada por um valor constante do parâmetro mensurado no intervalo entre interfaces, ou seja o valor do parâmetro petrofísico medido é considerado constante ao longo da espessura da camada. A descontinuidade presente na função que descreve o perfil ideal, caracteriza a exata profundidade das interfaces entre camadas, que apresentam valores contrastantes do parâmetro investigado. Estamos implicitamente considerando cada camada atravessada pelo poço, homogênea em profundidade.

A realização da operação de convolução das funções mostradas na Figura 3.1 e na Figura 3.2, será denominada como modelo teórico ou perfil sintético (Figura 3.3).

3.2 A OBTENÇÃO *A PRIORI* DA FUNÇÃO RESPOSTA VERTICAL

Dado um perfil petrofísico de poço descrito pela expressão (3.3), o trabalho da deconvolução é produzir uma aproximação tão boa quanto possível do perfil ideal. Evidentemente, qualquer método de aproximação requer alguma forma de conhecimento a respeito da função degradante ou função resposta vertical da ferramenta (Rosenfeld & Kak, 1982). Em alguns casos o fenômeno físico envolvido no processo de degradação pode ser utilizado para a determinação da função resposta vertical. Como por exemplo, a teoria do fator geométrico de Doll, para a ferramenta de indução eletromagnética. Em outros casos, se a degradação é

de natureza desconhecida ou o fenômeno físico envolvido é extremamente complexo, tal que impossibilite a determinação analítica da função resposta vertical da ferramenta a única alternativa possível é estimar a função resposta vertical a partir, unicamente, do perfil degradado. Esta é uma técnica bastante conhecida e utilizada no tratamento digital de imagens, como por exemplo, se existe alguma razão para se acreditar que a cena original contém um ponto bastante nítido, ou seja muito bem definido, então a imagem desse ponto na fotografia degradada é a própria PSF (*point-spread function*) ou função resposta vertical para o caso unidimensional da perfilagem de poço (Rosenfeld & Kak, 1982). Isto é simples de se mostrar, a partir da consideração de que um ponto muito bem definido é apenas uma representação da função Delta no plano ($\delta(x, y)$). Este normalmente é o caso para o estudo de fotografias astronômicas, onde a imagem de uma estrela distante, considerada como um ponto nítido, pode ser utilizada para a obtenção de uma aproximação da PSF.

3.3 A FUNÇÃO RESPOSTA VERTICAL SOB AS CONDIÇÕES ATUAIS DO POÇO

Para o caso dos perfis petrofísicos, o fenômeno físico envolvido no processo de aquisição das medidas é comumente de natureza bastante complexa, tal que, praticamente inviabiliza a obtenção de uma forma analítica para a função resposta vertical da ferramenta.

Definiremos assim, a chamada, *função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço*, como a função que descreve, unicamente, a degradação ou seja, o conjunto de processos presentes durante a operação de perfilagem, que alteram ou deturpam o perfil ideal dando origem ao perfil registrado. A função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço não mantém, necessariamente, nenhuma relação com uma possível função resposta vertical na forma analítica, por ventura existente, para a ferramenta de interesse. Uma vez que para a sua determinação numérica o fenômeno físico interveniente no processo de aquisição das medidas é negligenciado. Tratamos a função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço como um ente puramente matemático ou um parâmetro de perfilagem relacionado à resolução vertical do perfil, ou seja, do conjunto de valores registrados de um determinado parâmetro petrofísico, amostrados regularmente em profundidade pela ferramenta de perfilagem.

3.3.1 A Degradação

Em uma fotografia qualquer, a degradação normalmente não é constante por todo o plano da imagem, existindo regiões onde esta foi mais intensa e outras onde a degradação foi mais amena ou até mesmo inexistente. Este fato, sem embargo, pode ser diretamente estendido

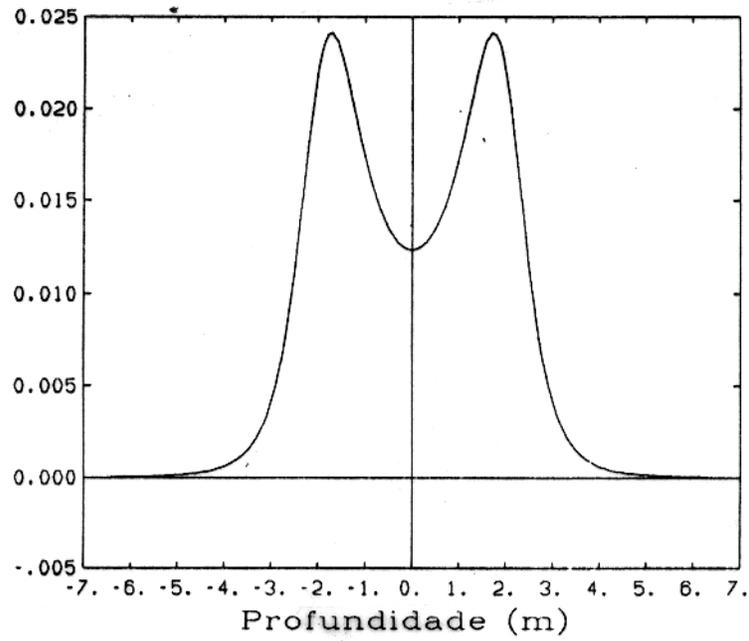


Figura 3.4 - Função resposta de uma ferramenta de baixa resolução vertical.

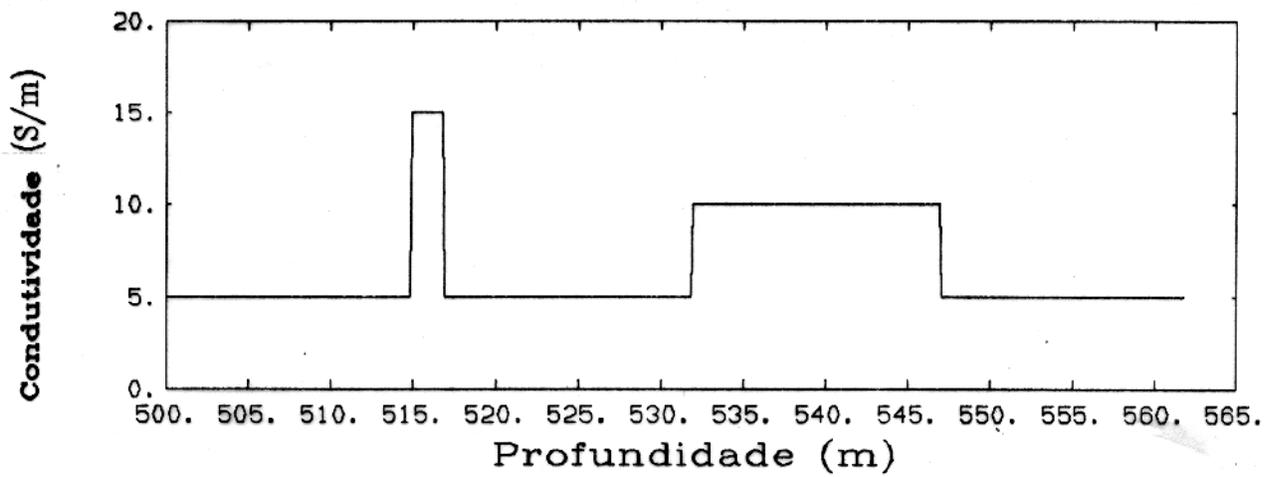


Figura 3.5 - Perfil ideal.

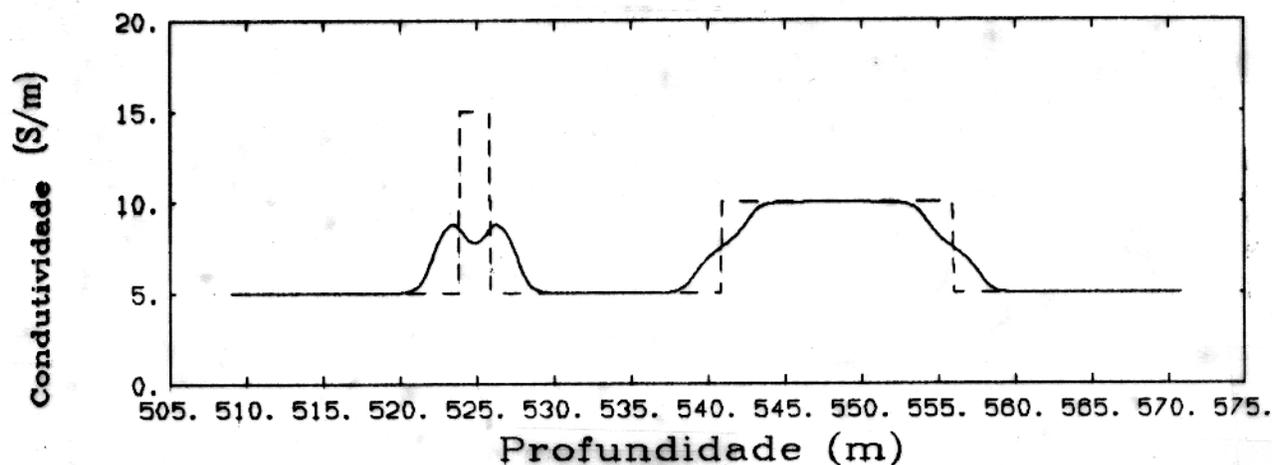


Figura 3.6 - Modelo sintético ou Perfil degradado.

aos perfis petrofísicos, onde podemos exemplificá-lo com um modelo sintético. A Figura 3.4 mostra a função resposta vertical para uma ferramenta de hipotética, considerada de baixa resolução vertical. Tomamos agora, um perfil ideal composto por camadas, com espessuras variadas e valores constantes de condutividade em cada camada (Figura 3.5). Efetuamos a obtenção do perfil sintético ou degradado a partir da operação de convolução, mostrada na Figura 3.6.

Voltemos nossa atenção para o perfil degradado (Figura 3.6) em comparação com o perfil ideal (Figura 3.5). Rapidamente verificamos, que nas camadas espessas, praticamente não ocorreu degradação do valor real e que a degradação é intensa nas camadas finas. Por outro lado, todos os contatos litológicos foram degradados. Assim verificamos que o efeito da degradação se evidencia basicamente sobre as camadas finas e sobre os contatos litológicos. Esse efeito pode ser denominado como efeito das camadas adjacentes.

3.3.2 O Intervalo de Controle

Com base nessas observações, estamos interessados em identificar intervalos de profundidade no perfil, que serão denominados de *intervalos de controle*.

Os *intervalos de controle*, podem ser conceituados como trechos, em profundidade, do perfil, nos quais podemos, com segurança prever o real comportamento do parâmetro

petrofísico investigado, com base nas hipóteses admitidas para o perfil ideal. A determinação dos intervalos de controle ao longo do perfil devem ser norteadas por critérios bem estabelecidos:

- Existência de no mínimo duas camadas adjacentes com espessura superior à resolução vertical intrínseca da ferramenta.
- Existência de um valor aproximadamente constante para o parâmetro petrofísico nessas camadas.
- Ocorrência de baixos níveis de ruído ao longo do intervalo.
- Existência de correlação em profundidade, do trecho definido como intervalo de controle em todos os perfis disponíveis.

Teoricamente, duas feições, bastante comuns nos perfis, se apresentam como ideais para atuarem como intervalos de controle:

- Tipo *escada*, que se caracterizam pela existência de um salto bem definido do valor do parâmetro petrofísico entre duas camadas adjacentes.
- Tipo *caixa*, que se caracterizam pela presença de dois saltos bem definidos do valor do parâmetro petrofísico, os quais determinam uma camada espessa ladeada por duas outras camadas, que apresentam valores próximos ou iguais do parâmetro mensurado.

A Figura 3.7 apresenta o mesmo perfil sintético mostrado na Figura 3.6 com a caracterização do intervalo de controle do tipo *caixa* ao longo do perfil.

3.3.3 O Perfil Ideal no Interior do Intervalo de Controle

O perfil ideal, no interior do intervalo de controle, pode ser conceituado como a descrição do comportamento desejável para o perfil. A sua definição depende basicamente da existência de correlação entre o intervalo de controle definido nos perfis de baixa resolução vertical com o intervalo de controle definido nos perfis de alta resolução vertical disponíveis e da interpretação do intervalo de controle como um evento geológico possível na formação de interesse.

A determinação da forma do perfil ideal no interior do intervalo de controle é obtida a partir da suposição de que a camada geológica é verticalmente homogênea, isto equivale

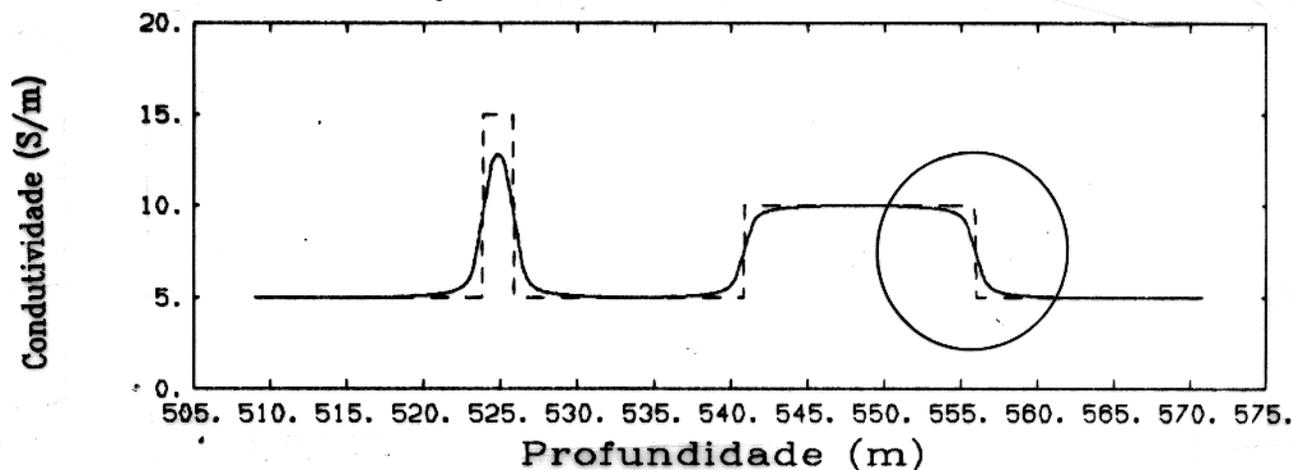


Figura 3.7 - Perfil degradado, mostrando o intervalo de controle do tipo *escada*.

a dizer que o parâmetro petrofísico é constante ao longo de toda a espessura da camada. Assim se tomarmos por exemplo o intervalo de controle do tipo *escada*, o perfil ideal é assumido comportar-se como uma função tipo Heaviside ou degrau, onde o patamar inferior é assumido com o valor médio mínimo e o superior com o valor médio máximo do trecho do perfil degradado definido como intervalo de controle. A Figura 3.8 ilustra um intervalo de controle do tipo *escada*, com o respectivo perfil ideal associado. Para o intervalo de controle do tipo *caixa*, o perfil ideal é assumido como uma função do tipo caixa, com semelhantes suposições a respeito dos valores do parâmetro petrofísico tomados no interior do intervalo de controle.

Um fator de fundamental importância para a completa definição do perfil ideal no interior do intervalo de controle é a

- Exata determinação da profundidade das interfaces entre camadas.

Este problema é solucionado a partir do conceito de centro de gravidade da área delimitada pelos dois intervalos de controle. O conceito de centro de gravidade pode ser expresso na forma

$$\bar{z} = \frac{1}{A} \int_{z_1}^{z_2} z dA$$

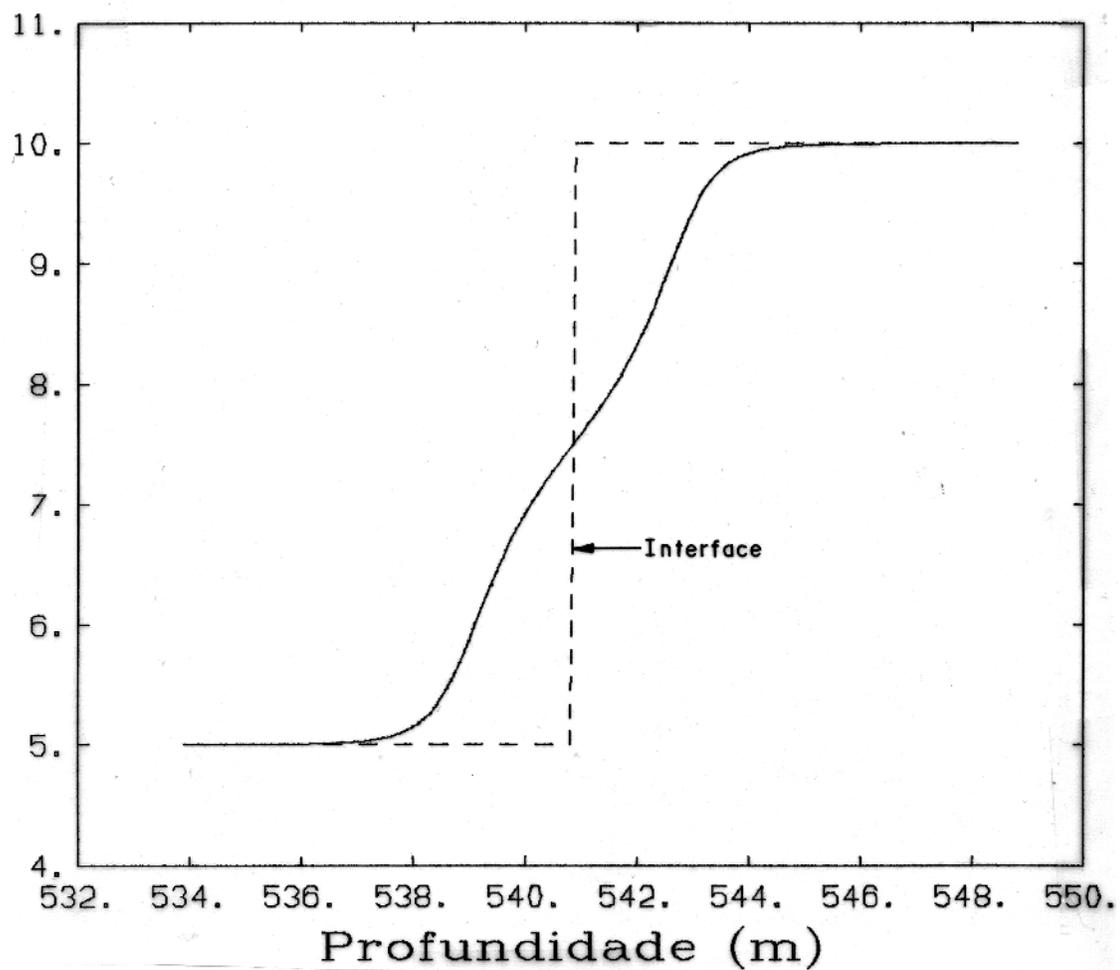


Figura 3.8 - Intervalo de controle do tipo *escada* (linha sólida) e o respectivo perfil ideal associado (linha tracejada).

onde, A representa a área dada por

$$A = \int_{Z1}^{Z2} [x(z) - y(z)] dz$$

\bar{z} é a profundidade da interface no interior do intervalo de controle. $x(z)$ é o intervalo de controle no perfil ideal. $y(z)$ é o intervalo de controle no perfil original. $Z1$ e $Z2$ são os limites em profundidade do intervalo de controle. Em outras palavras a profundidade \bar{z} representa o ponto de interseção entre o intervalo de controle do perfil original e o salto do intervalo de controle do perfil ideal. Para o caso do intervalo de controle do tipo *caixa* o cálculo deve ser efetuado separadamente para cada uma das interfaces.

3.3.4 O Método

A determinação da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço a partir dos próprios perfis petrofísicos, vem basicamente das mesmas ideias admitidas no tratamento digital de imagens. Onde a principal hipótese que assumimos é que no interior do intervalo de controle conhecemos exatamente a forma do perfil ideal ou não degradado.

Definimos a sequência h_n como a função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, na forma discretizada e assumimos a validade da seguinte expressão no interior do intervalo de controle

$$\bar{y}_n = \sum_{i=0}^{N-1} \bar{x}_{n-i} h_i \quad (3.4)$$

onde, \bar{y}_n é o trecho de perfil definido como intervalo de controle, \bar{x}_n é o perfil ideal associado.

A equação (3.4) expressa a discretização da equação (3.3) para a operação de convolução no interior do intervalo de controle, assim caracterizamos a sequência h_n como o operador degradante do perfil ideal, ou como é clássico no tratamento de sinais, h_n atua como um filtro, considerando-se no interior do intervalo de controle um sistema linear cuja entrada é o perfil ideal \bar{x}_n e a saída é o trecho do perfil original definido como intervalo de controle \bar{y}_n .

A solução da equação (3.4) é melhor visualizada no domínio da frequência espacial através da transformada de Fourier na forma discretizada. Assim consideremos os seguintes pares de transformadas de Fourier

$$\bar{y}_n \iff Y_m^*$$

$$\begin{aligned}\bar{x}_n &\iff X_m^* \\ h_n &\iff H_m\end{aligned}$$

e a validade do teorema da convolução no domínio da profundidade. Podemos reescrever a equação (3.4) no domínio da frequência espacial como uma expressão algébrica, na forma

$$Y_m^* = X_m^* H_m \quad (3.5)$$

onde facilmente podemos isolar H_m , na forma

$$H_m = \frac{Y_m^*}{X_m^*} \quad (3.6)$$

e obter a função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, h_n , através da transformada discreta inversa de Fourier, repetida abaixo por conveniência

$$h_n = \sum_{m=0}^{N-1} H_m e^{i2\pi \frac{nm}{N}}$$

onde a função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço satisfaz a

$$\int_{Z_1}^{Z_2} h(z) dz = 1$$

no caso contínuo ou na forma discretizada a

$$\sum_{n=0}^{N-1} h_n = 1$$

A obtenção da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, através da equação (3.6) depende fundamentalmente do espectro do perfil ideal X_m , que necessariamente deve ser diferente de zero em todo o intervalo de variação de m . Este aspecto pode ser esclarecido se estudamos a transformada de Fourier do perfil ideal. Analisamos primeiramente o perfil ideal do tipo *escada* ou degrau, definido como a função degrau simples na forma teórica, dado por

$$s(z) = \begin{cases} A & \text{para } z > 0 \\ 0 & \text{para } z < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

onde A é a amplitude do salto entre os dois patamares.

Consideramos a princípio o seguinte par de transformada de Fourier

$$s(z) \iff S(k)$$

e definimos a função $s(-z)$ de tal maneira que

$$s(z) + s(-z) = A \quad (3.8)$$

Operando a transformada de Fourier de ambos os lados da equação (3.8) e utilizando a propriedade de linearidade, vem

$$S(k) + S(-k) = 2\pi A\delta(k) \quad (3.9)$$

Assumimos agora que a transformada de Fourier da função degrau é da forma

$$S(k) = w\delta(k) + B(k) \quad (3.10)$$

onde $B(k)$ é uma função ordinária e w é uma constante, então

$$\begin{aligned} S(k) + S(-k) &= w\delta(k) + B(k) + w\delta(-k) + B(-k) \\ &= 2w\delta(k) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Assim concluímos que $w = \pi A$ e $B(k)$ é ímpar. Para calcular $B(k)$ tomamos a derivada da função degrau simples, dada por

$$\frac{ds(z)}{dz} = \delta(z) \quad (3.12)$$

Utilizamos agora a propriedade da transformada de Fourier de uma derivada e operamos a transformação da expressão (3.12)

$$\begin{aligned} ik S(k) &= 1 \\ ik[\pi A\delta(k) + B(k)] &= 1 \end{aligned}$$

Como $k\delta(k) = 0$, concluímos que

$$B(k) = \frac{1}{ik} \quad (3.13)$$

Finalmente, obtemos

$$S(k) = \pi A\delta(k) + \frac{1}{ik} \quad (3.14)$$

Como podemos facilmente verificar, a função $S(k)$ é diferente de zero para todos os valores de k . Não existindo *a priori* nenhuma causa de instabilidade sob este aspecto.

Para o caso do perfil ideal tipo *caixa*, seu espectro, representado por uma função do tipo *sinc*, (Figura 3.9) através de uma expressão do tipo

$$B(k) = \frac{\text{sen}(k)}{k}$$

não apresenta o mesmo tipo de comportamento. Para alguns valores bem definidos de frequência espacial, o espectro assume o valor zero. Nesse caso, reamostramos a função de forma tal que retiramos da operação os valores de k indesejáveis (Rosenfeld & Kak, 1982). Esse procedimento não causa maiores problemas para a existência da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, simplesmente porque se entendermos a transformada de Fourier como um cálculo de área, a retirada de certos valores bem definidos de frequência espacial não contribui de maneira significativa sobre o cálculo final da área. Sob esta interpretação, em princípio, a função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço é perfeitamente recuperável.

3.4 A INTERPRETAÇÃO

A análise da equação (3.6) tem como consequência a determinação da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, unicamente no interior do intervalo de controle. Desejamos agora estender esse conceito a todo um trecho do perfil. Para tanto, consideramos

- A função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço é completamente independente do fenômeno físico inerente ao processo de obtenção das medidas.
- A função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço é capaz de reconstituir perfeitamente o perfil degradado no interior do intervalo de controle a partir da convolução com o perfil ideal.

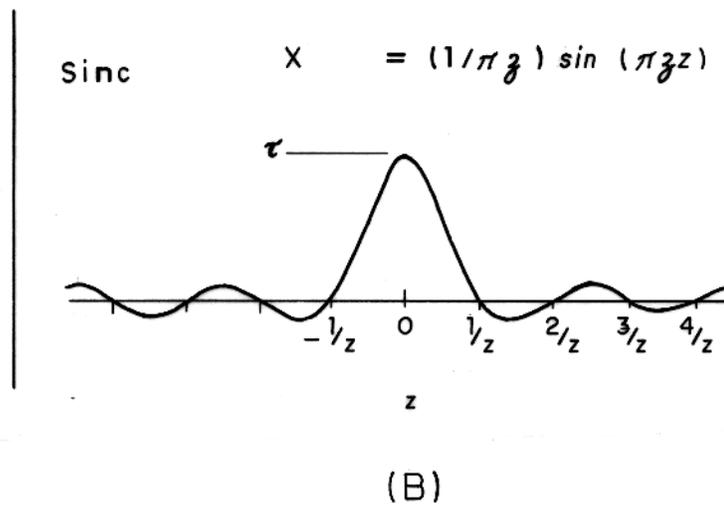
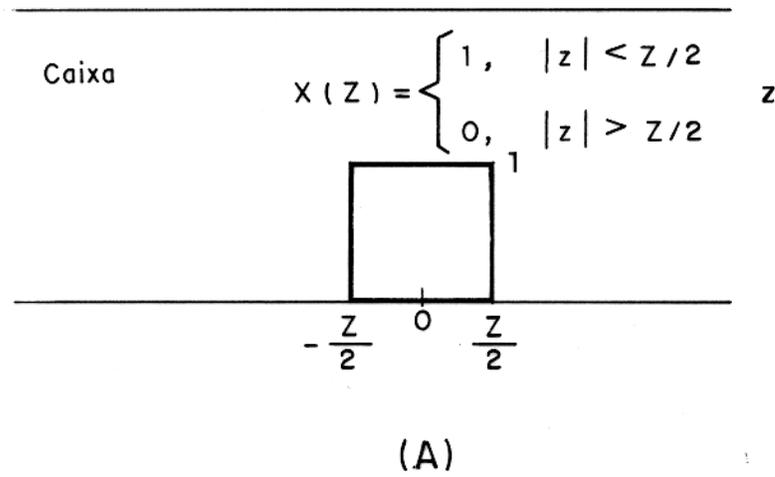


Figura 3.9 - Intervalo de controle do tipo *caixa* (A) e sua respectiva transformada de Fourier (B).

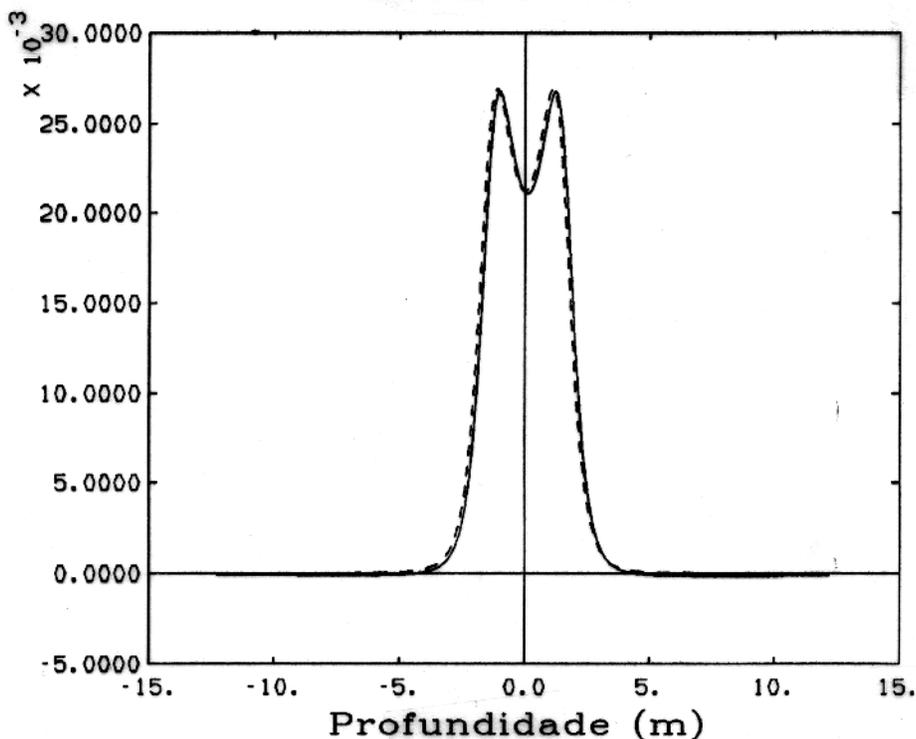


Figura 3.10 - Função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (linha sólida) e função resposta vertical original (linha tracejada).

Assim estamos considerando que a degradação ocorrida no interior do intervalo de controle é uma boa aproximação da degradação ocorrida em sua vizinhança e está completamente descrita pela função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço e a definição da resolução vertical do perfil, que pode ser então, obtida a partir da largura de seu lóbulo central tomada na metade de seu valor máximo.

A operação descrita pela equação (3.6) pode ser exemplificada tomando-se o intervalo de controle mostrado na Figura 3.8, resultando na função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, mostrado na Figura 3.10. Este exemplo mostra apenas a qualidade do método em obter uma curva muito próxima da função resposta vertical original, apenas para verificação, uma vez que o intervalo de controle e o perfil ideal adotados são os corretos. Por outro lado, procura mostrar a dependência da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço com a escolha do intervalo de controle e do perfil ideal.

3.5 A DECONVOLUÇÃO

O desenvolvimento de algoritmos para a solução do problema da deconvolução de perfis de baixa resolução é uma tarefa abraçada por vários profissionais da perfilagem de poço em todo o mundo e várias abordagens da solução do problema foram publicadas até o momento, demonstrando o interesse da indústria do petróleo e denotando as dificuldades conjunturais do problema.

Apresentaremos um novo algoritmo, que é uma proposta geral para o incremento da resolução vertical dos perfis convencionais, incorporando informações de um perfil de alta resolução vertical, através da introdução do conceito de função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço. Este novo conceito é entendido por meio de uma completa reinterpretação dos termos da expressão clássica da deconvolução no domínio da frequência espacial. Com as seguintes vantagens:

- Possibilidade de utilização de quaisquer pares de perfis de alta e baixa resolução vertical, independente da grandeza física mensurada por cada um.
- Não há necessidade de calibração da ferramenta de alta resolução em função da ferramenta de baixa resolução.
- A presença de heterogeneidades laterais como a invasão do filtrado da lama ou do bolo de lama não afetam a qualidade do processo.

3.5.1 O Filtro Inverso

A técnica que passamos a apresentar se origina da equação clássica de deconvolução no domínio da frequência espacial, repetida abaixo

$$X_m = Y_m G_m \quad (3.15)$$

onde X_m é transformada de Fourier do perfil deconvoluido. Y_m é a transformada de Fourier do perfil original e G_m é a transformada de Fourier do filtro inverso.

Para tornar possível a operação de convolução, descrita pela equação (3.15) é fundamental o conhecimento e o comportamento matemático da função G_m , definida no domínio da frequência espacial. Neste ponto, incorporamos o conceito de função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, $h(z)$ e escrevemos a função G_m , na forma

$$G_m = \frac{1}{H_m} \quad (3.16)$$

onde H_m é a transformada de Fourier da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço. Como descrito anteriormente a função H_m é por construção, diferente de zero para todos os valores de m , o que garante a existência da função G_m .

A principal consideração a respeito da função G_m é de que ela é válida para todo o trecho de perfil de interesse. Em outras palavras, a despeito da função h_n e conseqüentemente a sua respectiva transformada de Fourier, H_m , serem definidas unicamente no interior do intervalo de controle. Consideramos que ela descreve completamente a degradação atuante sobre todo o perfil ideal, no intervalo de profundidades de interesse. O que é naturalmente estendido à função G_m e conseqüentemente à sua transformada inversa de Fourier, g_n . Uma outra forma de interpretar o filtro inverso G_m é entender o filtro inverso como o operador que transforma o perfil degradado no perfil ideal, no interior do intervalo de controle. Quando aplicado a todo o trecho do perfil de baixa resolução vertical ele força a uma aproximação do perfil ideal, desconhecido, para todo o trecho.

3.5.2 O Método

A deconvolução de perfis petrofísicos por meio do filtro inverso G_m , discutido na seção anterior, pode ser operacionalizada através de duas metodologias, que diferem basicamente, quanto à obtenção do perfil ideal no interior do intervalo de controle.

3.5.2.1 A Deconvolução a partir de um Perfil Ideal no Intervalo de Controle

Esta abordagem é indicada para o caso de reavaliação de formação em poços antigos, onde não se dispõe de perfis de alta resolução vertical, mas se possui um alto nível de conhecimento geológico, tanto estrutural quanto estratigráfico da região e possivelmente se dispõe de dados de laboratório e de produção sobre os parâmetros petrofísicos dos intervalos de interesse, tal que se possa definir com precisão as exatas localizações em profundidade das interfaces e a definição de valores confiáveis para os intervalos de controle de cada trecho de interesse no perfil.

Uma ilustração dessa metodologia é mostrada na Figura 3.11 para o perfil mostrado na Figura 3.6. Apesar da simplicidade do modelamento é possível se avaliar a capacidade de resolução da metodologia apresentada.

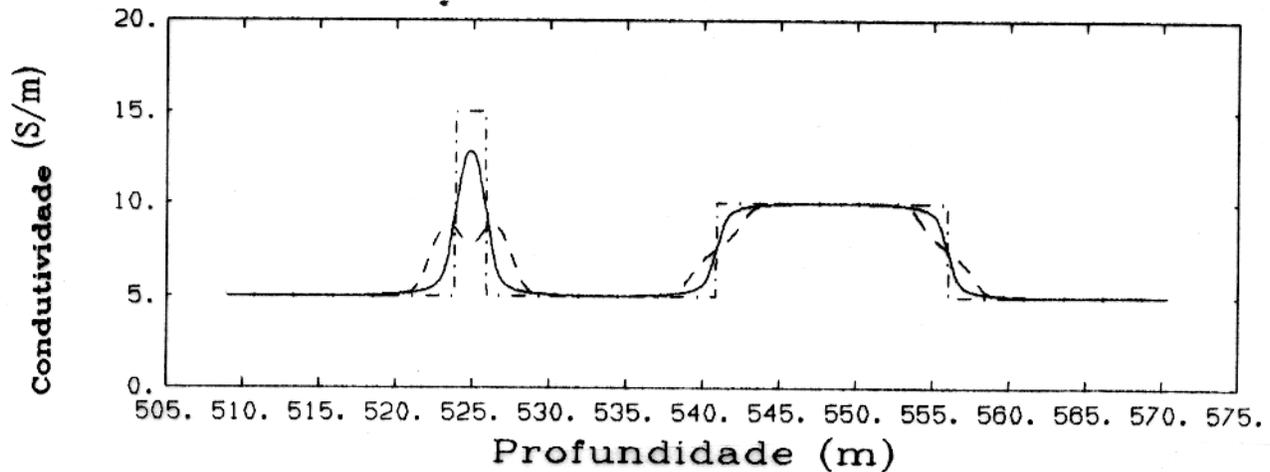


Figura 3.11 - Perfil deconvolvido (linha sólida). Perfil original (linha tracejada). Perfil ideal (linha pontilhada).

A Deconvolução a partir de um Perfil de Alta Resolução Vertical

Este processo numérico de deconvolução se origina da análise da equação (3.15) sob um outro ponto de vista, onde faremos uma completa reinterpretação de cada termo dessa equação, para descrevermos a forma do filtro inverso G_m a partir da disponibilidade de informações de um perfil de alta resolução vertical corrido ante as mesmas formações rochosas investigadas pelo perfil de baixa resolução vertical.

A equação (3.16) para o filtro inverso G_m , no interior do intervalo de controle, pode ser reescrita na forma

$$\begin{aligned} G_m &= \frac{1}{H_m} \\ &= \frac{X_m}{\hat{X}_m} \end{aligned} \quad (3.17)$$

onde, reinterpretemos os termos:

- X_m é a transformada de Fourier do perfil ideal, assumido como o intervalo de controle tomado no perfil de alta resolução vertical.

- \hat{X}_m é a transformada de Fourier do intervalo de controle, tomado em um perfil calculado, que efetua as mesmas observações que o perfil de alta resolução vertical, mas possui uma resolução vertical semelhante ao perfil de baixa resolução vertical.

Para a melhor compreensão da função \hat{X}_m , definida no domínio da frequência espacial, considere o par de transformadas de Fourier

$$\hat{x}_n \iff \hat{X}_m$$

onde, \hat{x}_n é o intervalo de controle calculado satisfazendo a expressão

$$\hat{x}_n = ay_n + b \quad (3.18)$$

onde, a e b são constantes reais e y_n é o intervalo de controle tomado no perfil de baixa resolução vertical. Assim, estamos considerando, que independente da grandeza física mensurada nos dois intervalos de controle, a constante a é necessariamente diferente de zero, tal que a função \hat{x}_n , definida pela transformação linear descrita pela equação (3.18) exista. Esta consideração é garantida pelo critério de existência de correlação, às mesmas profundidades, entre o intervalo de controle definido no perfil de alta resolução vertical e o intervalo de controle determinado no perfil de baixa resolução vertical.

De maneira inteiramente análoga à interpretação da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, consideramos que o filtro inverso g_n , onde tomamos o par de transformadas de Fourier

$$g_n \iff G_m$$

definido no interior do intervalo de controle, é adimensional e satisfaz a equação

$$\int_{Z_1}^{Z_2} g(z) dz = 1$$

no caso contínuo ou na forma discretizada

$$\sum_{n=0}^{N-1} g_n = 1$$

e possua validade por todo o intervalo de profundidades de interesse no perfil de baixa resolução vertical.

Matematicamente, a validade do filtro inverso por todo o trecho do perfil de baixa resolução vertical, pode ser expressa através da seguinte equação escrita no domínio da frequência espacial

$$\bar{Y}_m = Y_m G_m \quad (3.19)$$

onde reinterpretemos os termos

- Y_m é a transformada de Fourier do intervalo de profundidades de interesse no perfil de baixa resolução vertical.
- \bar{Y}_m é a transformada de Fourier de um perfil calculado, que efetua as mesmas observações realizadas pelo perfil de baixa resolução vertical, no interior do poço, com resolução vertical semelhante a do perfil de alta resolução vertical, ou seja, o perfil deconvoluido.

Para ilustrar essa metodologia, vamos estudar dois perfis sintéticos obtidos a partir do modelo convolucional. Estamos admitindo que a resolução vertical deste tipo de perfil é função exclusiva do espaçamento. Outra simplificação que adotaremos é de que a formação investigada é radialmente homogênea, isto equivale a adotar o mesmo perfil ideal para os dois casos, ou seja, independente da profundidade de investigação de cada ferramenta a variação do parâmetro petrofísico em subsuperfície para ambos é a mesma. Mostramos então, uma formação hipotética composta por sete camadas, das quais três são consideradas camadas finas e o intervalo de controle é tomado do tipo *caixa*, tomado na parte final do perfil.

Na Figura 3.12 mostramos o perfil sintético considerado de alta resolução vertical, na Figura 3.13 mostramos o perfil sintético considerado de baixa resolução vertical. Ao qual aplicaremos a deconvolução a partir da função resposta vertical da ferramenta definida a partir do perfil de alta resolução vertical.

Na Figura 3.14 mostramos o resultado do processamento ou seja, o perfil de baixa resolução vertical deconvoluido.

Apesar da simplicidade do modelo, é possível se avaliar a eficiência do método apresentado. Investigaremos agora um perfil sintético, um pouco mais complexo, quanto à função resposta vertical da ferramenta nas condições atuais do poço. Estudaremos o caso em que a função degradante é formada a partir da convolução de duas funções mais simples. A primeira tomada da teoria do fator geométrico para uma ferramenta com espaçamento entre as bobinas igual a 1 *m*. A segunda, uma função com base larga, tal que produza uma degradação superior a anterior. Na Figura 3.15 mostramos as duas funções resposta, na forma

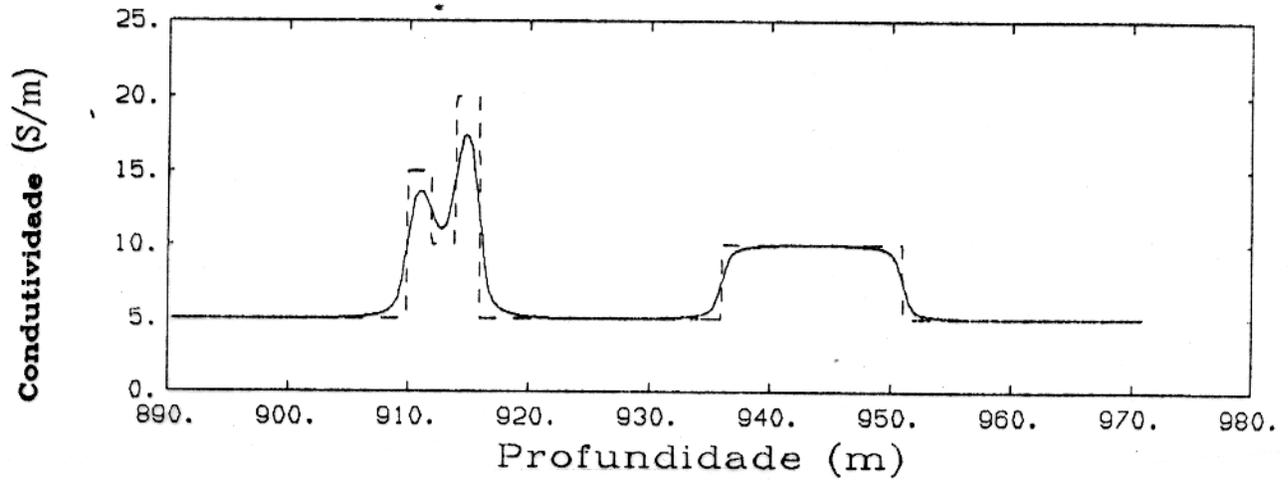


Figura 3.12 - Perfil de alta resolução vertical (linha sólida). Perfil ideal (linha tracejada).

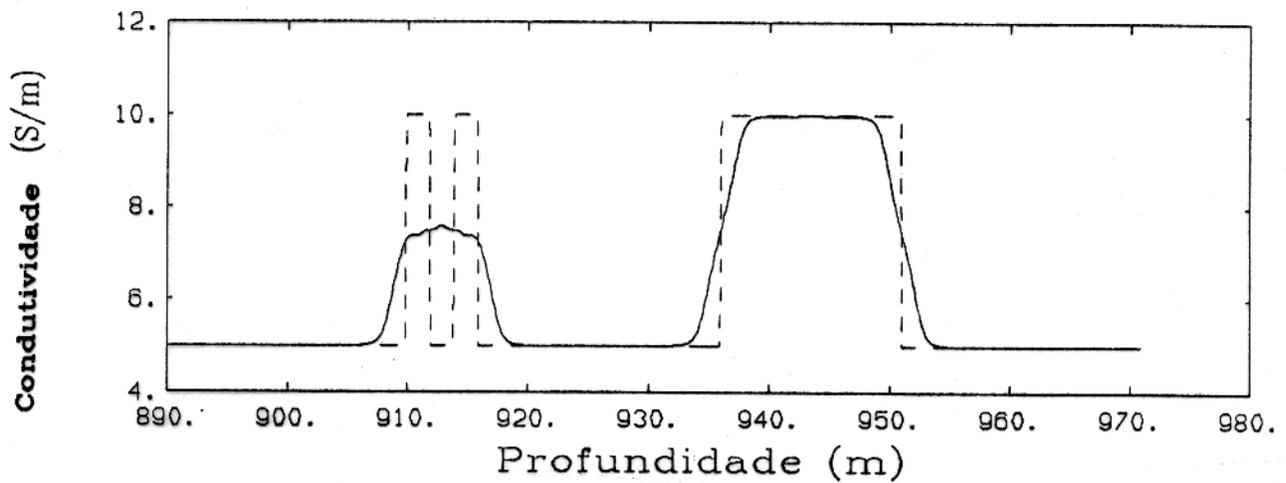


Figura 3.13 - Perfil baixa resolução vertical (linha sólida). Perfil ideal (linha tracejada).

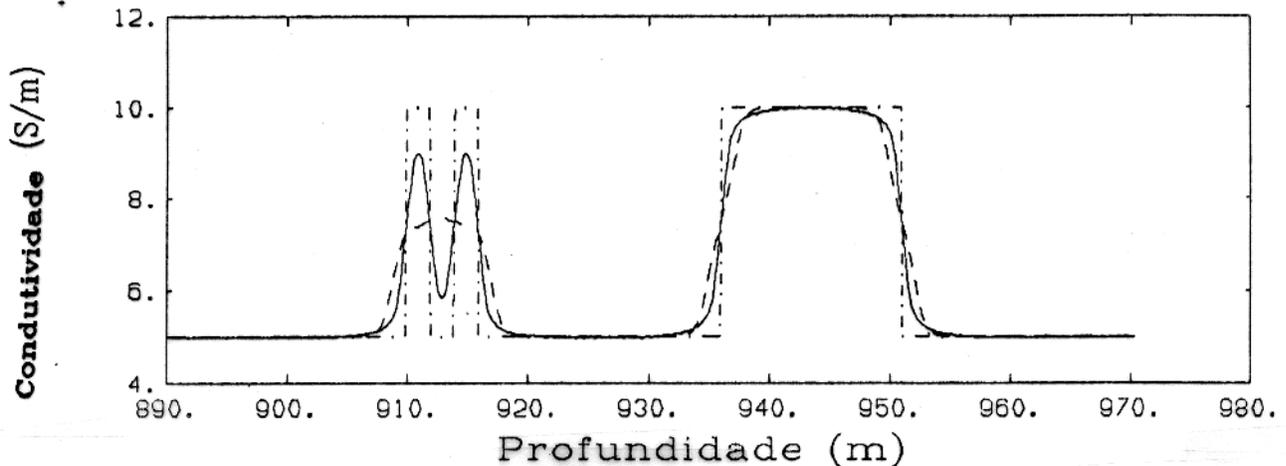


Figura 3.14 - Perfil baixa resolução vertical deconvoluido (linha sólida). Perfil de baixa resolução vertical original (linha tracejada). Perfil ideal (linha pontilhada).

mais simples. Em (A) é mostrada a função resposta referente a um espaçamento entre bobinas igual a 1 m, em (B) mostramos o segundo caso e em (C) mostramos o perfil degradado. Esta aplicação visa ilustrar o fato de que a metodologia apresentada se aplica não somente a uma distinta função resposta vertical, mas a qualquer relação linear de funções resposta vertical.

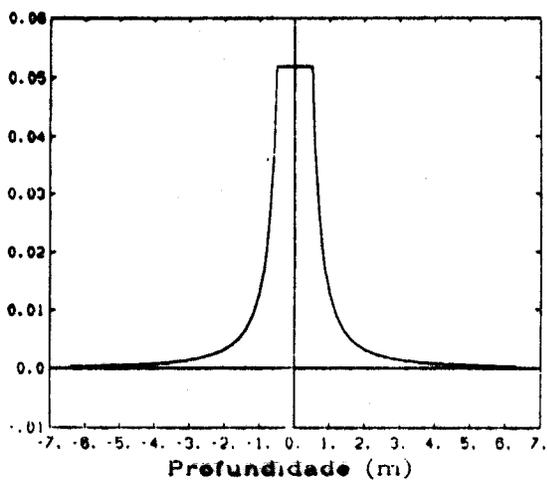
A Figura 3.16 apresenta o perfil sintético e o correspondente perfil deconvoluido

3.6 APLICAÇÕES

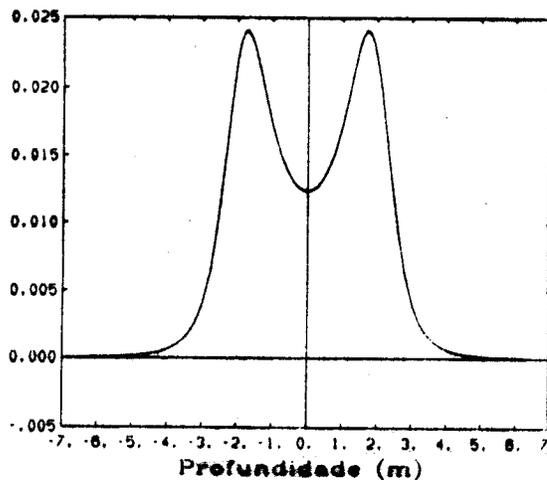
Nesta seção abordaremos algumas questões relativas a aplicabilidade do método.

3.6.1 A Sensibilidade ao Ruído

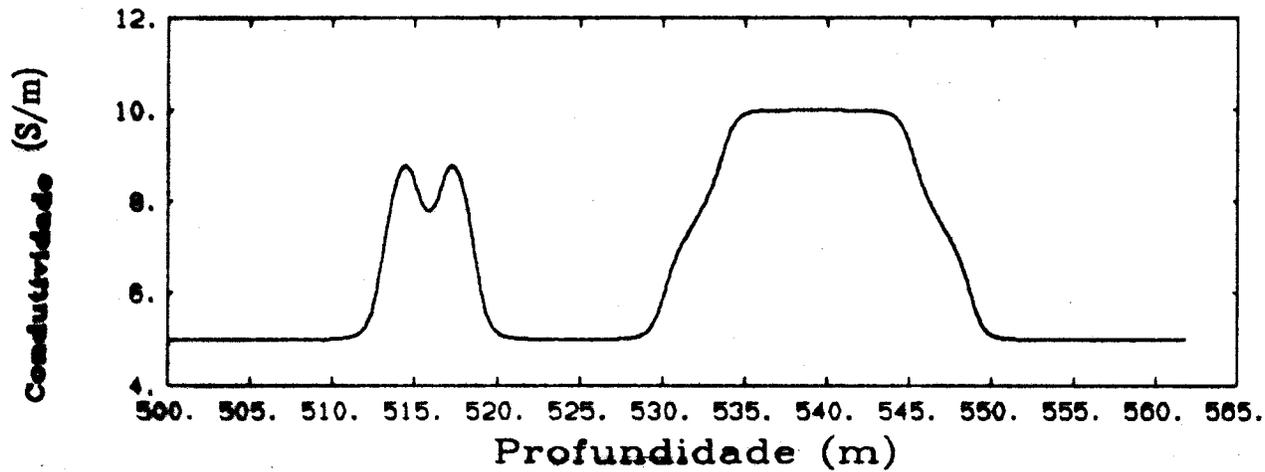
A complexidade do ambiente do poço é a responsável pela contaminação da medida de caráter local, de natureza eminentemente aleatória ou probabilística, denominadas genericamente de ruídos. A grande maioria dos algoritmos de deconvolução requer algum conhecimento *a priori* do comportamento estatístico do ruído e de como ele se relaciona com o



(A)



(B)



(C)

Figura 3.15 - Funções resposta vertical. Função de alta resolução vertical (A). Função de baixa resolução vertical (B). Perfil degradado (C).

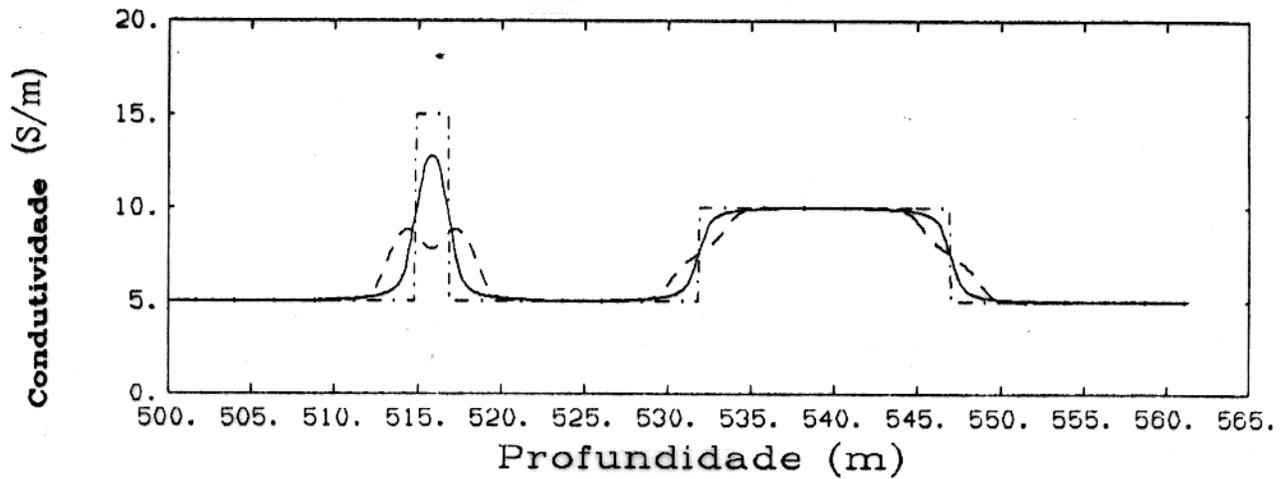


Figura 3.16 - Perfil deconvolvido (linha sólida). Perfil sintético (linha tracejada). Perfil ideal (linha pontilhada).

perfil.

Estudaremos o comportamento da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, considerando a presença de ruído no trecho do perfil original, tomado como intervalo de controle. Assim reconsideramos a equação (3.4), no domínio da profundidade, na forma discretizada

$$y_n = \sum_{i=0}^{N-1} x_{n-i} h_n + \nu_n \quad (3.20)$$

e sua respectiva representação no domínio da frequência espacial

$$Y_m = X_m H_m + V_m \quad (3.21)$$

onde V_m é a transformada de Fourier da sequência espacial que representa o ruído, ν_n , considerado aditivo, do tipo ruído branco com variância finita, média zero e não correlacionável com o perfil. Assim, isolando H_m nessa situação

$$H_m = \frac{Y_m}{X_m} - \frac{V_m}{X_m} \quad (3.22)$$

onde investigaremos o efeito da parcela relativa ao ruído sobre a operação. Normalmente, no tratamento de sinais, investiga-se o efeito degradante do ruído nas vizinhanças dos zeros do operador X_m , que assumem valores muito pequenos fazendo com que a parcela relativa ao ruído se torne dominante no espectro final. No caso da função resposta vertical da ferramenta

sob as condições atuais do poço, esse efeito é praticamente desprezível. Para o intervalo de controle do tipo *escada*, o operador X_m assume altos valores nas baixas frequências, o que atenua o efeito do ruído. Para as altas frequências, onde o operador assume valores menores, mas diferentes de zero e o conteúdo de ruído para esses valores de frequência, normalmente, é dominante no sinal e praticamente inexistente informação a ser recuperada. No intervalo de controle do tipo *caixa*, não ocorre o efeito de atenuação do ruído nas baixas frequências, mas não há razão para se imaginar um efeito de maior gravidade, devido à prévia retirada dos zeros do operador X_m .

Quando operamos a deconvolução a partir do operador inverso G_m , definido através da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, a análise do efeito do ruído sobre o perfil deconvolvido, pode ser realizada por meio da expressão

$$\frac{Y_m}{H_m} = X_m + \frac{V_m}{H_m} \quad (3.23)$$

onde, aplicamos o operador inverso a todo o perfil Y_m e observamos que devido ao comportamento do operador H_m a parcela relativa ao ruído não é amplificada, fazendo com que o perfil deconvolvido na pior hipótese possua o mesmo nível de ruído que o perfil original.

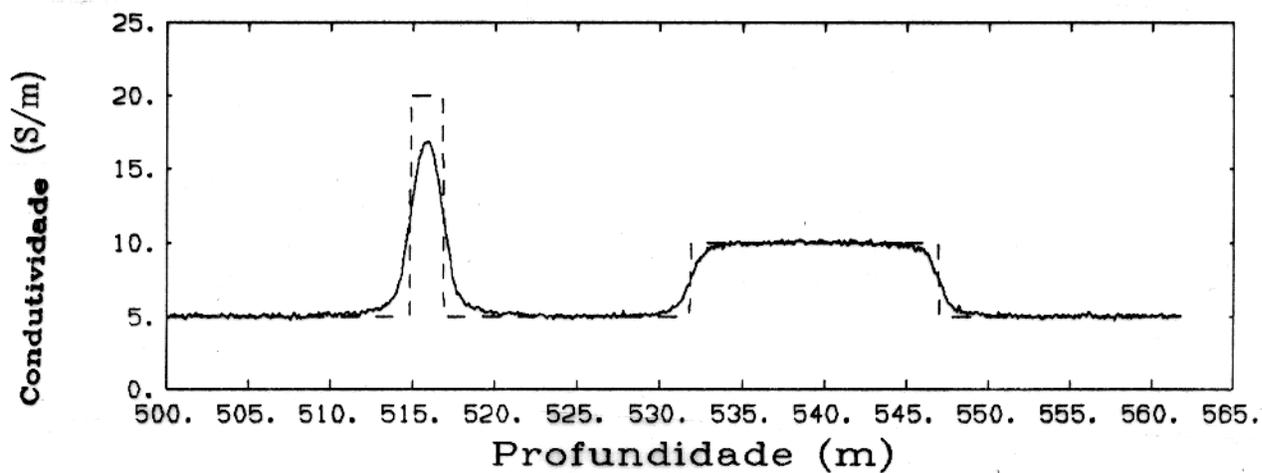
Na Figura 3.17 apresentamos o perfil de alta resolução vertical, contaminado com a adição de ruído do tipo Gaussiano com desvio padrão igual a 5 (Figura 3.17 (A)). Mostramos também o perfil de baixa resolução vertical, contaminado com a adição de ruído do tipo Gaussiano com desvio padrão igual a 3 (Figura 3.17 (B)).

Para o caso da aplicação da deconvolução a partir da obtenção do filtro inverso através da utilização de um perfil de alta resolução vertical, ocorre certa amplificação do nível de ruído no perfil deconvolvido, sem afetar no entanto, a aplicabilidade do método. Para exemplificar este fato, mostramos na Figura 3.18 um exemplo de deconvolução do perfil mostrado na Figura 3.17 (B).

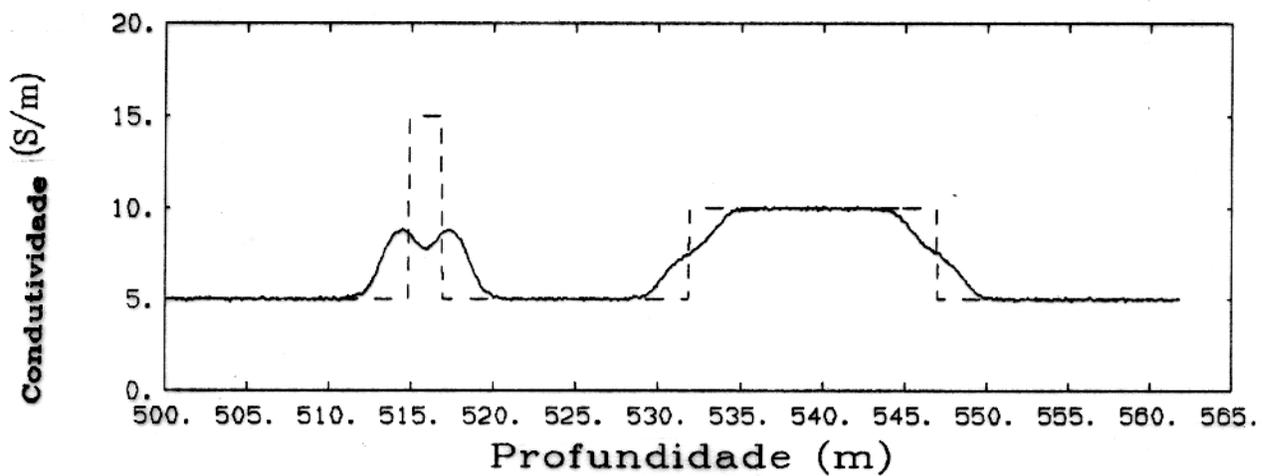
3.6.2 O Filtro de Mediana

A deconvolução de perfis a partir da obtenção da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, requer muito cuidado com o tratamento do ruído, quando este ocorre em níveis prejudiciais ao processo. A técnica utilizada para contornar o problema é a aplicação do filtro de mediana, cuja principal característica é manter inalteradas as amplitudes dos saltos de valores do parâmetro investigado, que ocorre nas interfaces entre camadas com valores contrastantes.

O princípio de funcionamento do filtro é trocar o valor de cada ponto do perfil pela



(A)



(B)

Figura 3.17 - Perfil de alta resolução vertical ruidoso (A). Perfil de baixa resolução vertical ruidoso (B)

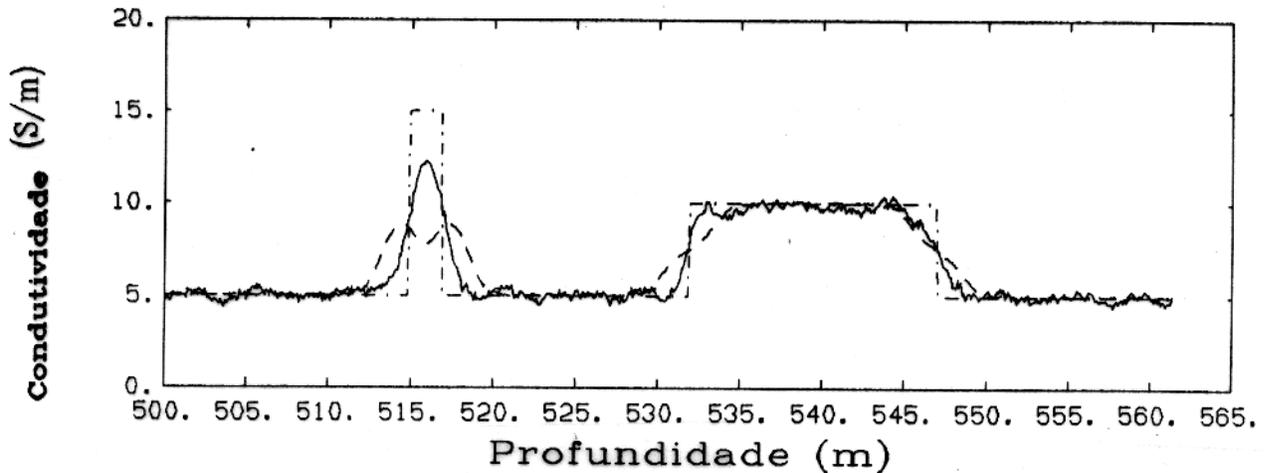


Figura 3.18 - Perfil deconvolvido (linha sólida). Perfil sintético (linha tracejada). Perfil ideal (linha pontilhada).

mediana dos valores dos pontos vizinhos, dentro de um certo intervalo previamente escolhido (Rosenfeld & Kak, 1982). O comportamento do filtro é melhor esclarecido a partir da análise do seguinte exemplo. Considere que o sinal-entrada é dado pela sequência abaixo

0006001210121024202420012344444000

aplicamos o filtro, trocando cada valor pela mediana de cada ponto e seus dois vizinhos. Se eles possuem valores a , b e c onde, $a \leq b \leq c$, a mediana é justamente o valor de b . Assim

0000011111111222222001234444400

agora, o ruído concentrado (6) é eliminado, bem como as flutuações e a amplitude da rampa e o degrau são preservados.

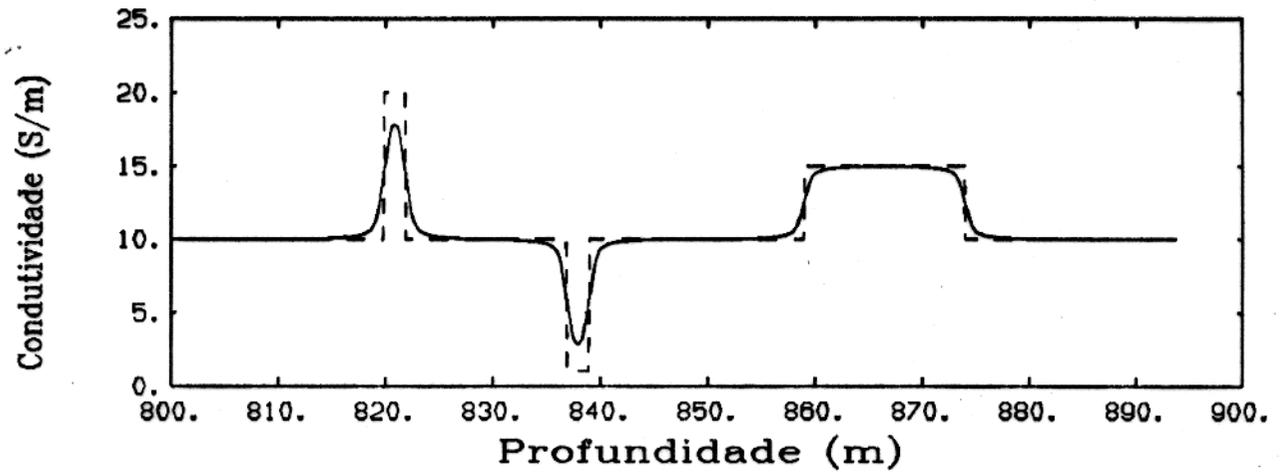
3.6.3 A Invasão do Filtrado da Lama

Normalmente, frente à zonas permo-porosas ocorre a tendência do fluido de perfuração penetrar na formação, deslocando o hidrocarboneto, por ventura, presente ou modificando as propriedades naturais da água de formação. A esse fenômeno, dá-se o nome de invasão do filtrado da lama e à região em torno do poço, que teve modificada as suas características

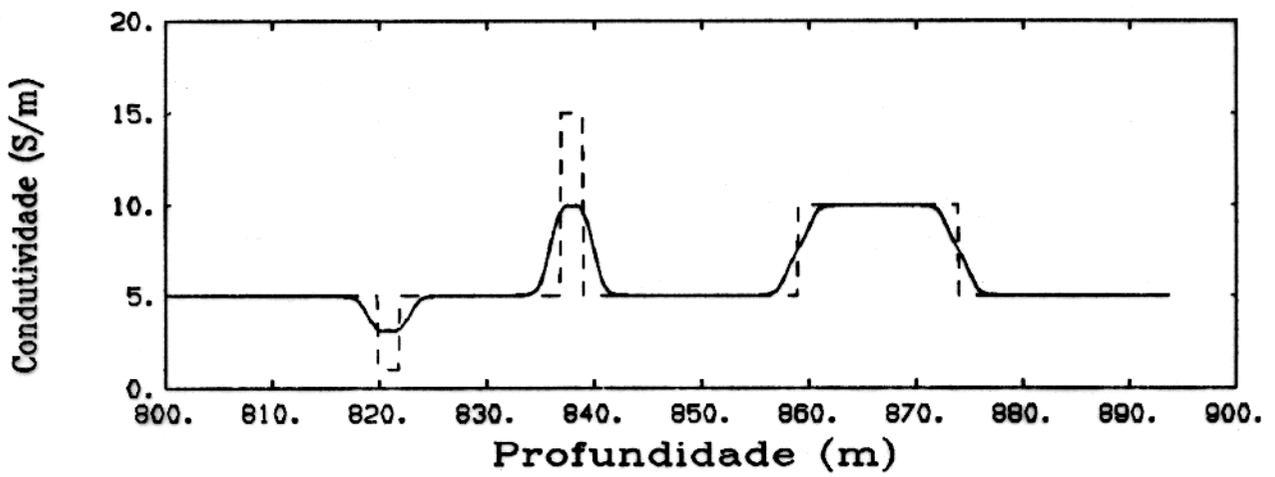
originais, o nome de zona invadida. Esta zona afeta a leitura de todas as ferramentas, sobretudo as de investigação rasa como as ferramentas nucleares e as micro-elétricas.

A maioria das técnicas voltadas para o aumento da resolução vertical dos perfis de investigação profunda com a introdução de informações de um arranjo de investigação rasa (Barber, 1988; Nelson *et al*, 1990) se depararam com o problema da invasão e exigiram que a profundidade da invasão fosse rasa o suficiente para que a leitura do arranjo de investigação rasa fosse efetuada na zona virgem.

Para o caso da deconvolução a partir da obtenção da resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço não existe a necessidade da imposição de homogeneidade radial para a formação ao longo de todo o trecho do perfil de interesse, bastando apenas, que a condição de existência de correlação entre os perfis no intervalo de controle seja satisfeita. Exemplificamos este fato com a Figura 3.19 e a Figura 3.20, onde mostramos na Figura 3.19 os dois perfis utilizados e na Figura 3.20 o perfil deconvoluido.



(A)



(B)

Figura 3.19 - Perfil sintético de investigação rasa (A). Perfil sintético de investigação profunda (B).

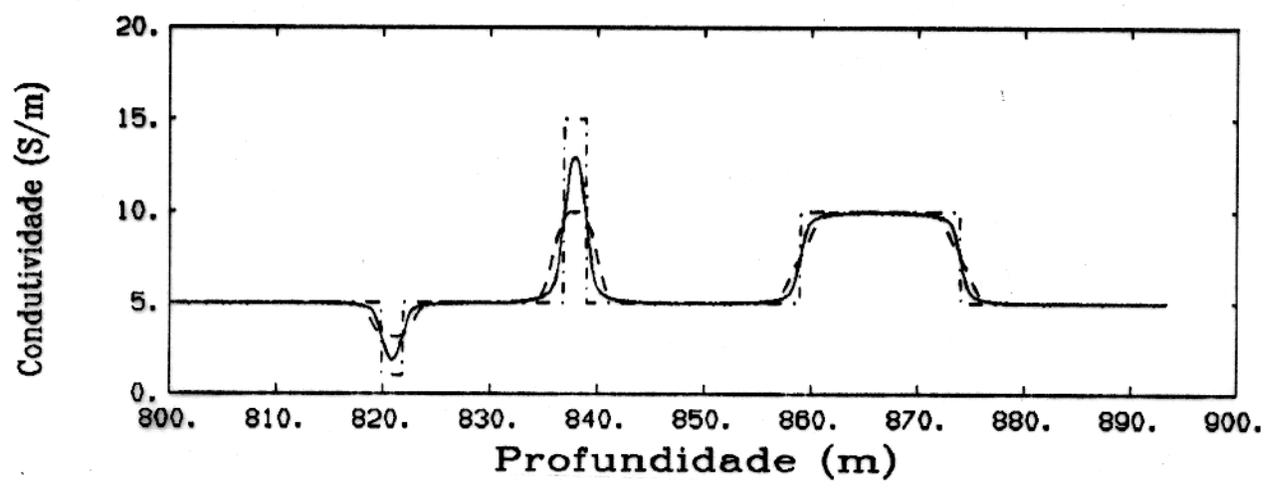


Figura 3.20 - Perfil deconvoluido.

4 - APLICAÇÃO AOS PERFIS PETROFÍSICOS

Neste capítulo apresentaremos alguns exemplos da aplicação da deconvolução de perfis petrofísicos a partir da obtenção da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço, para alguns perfis disponíveis, do campo de Pilar, na bacia SE-AL.

4.1 O CAMPO DE PILAR

O campo de Pilar está localizado na porção emersa da bacia Sergipe-Alagoas, no nordeste brasileiro, abrangendo uma área de 25 Km^2 , com sua litologia caracterizada, em alguns trechos, pela presença de camadas delgadas compostas por arenitos e margas. Apresentando produção de óleo e gás nos arenitos da formação Coqueiro Seco e gás nos arenitos da formação Penedo.

4.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Apresentamos nessa seção alguns exemplos de aplicação em perfis reais, de baixa resolução vertical da metodologia exposta neste trabalho. O perfil de alta resolução vertical disponível é o micro-esférico focalizado (MSFL, *Schlumberger*).

4.2.1 Exemplo 1

Para esse exemplo tomamos um trecho do perfil de indução eletromagnética (ILD, *Schlumberger*), corrido no poço PIR-69, nas profundidades de 950 a 975 m. O intervalo de controle foi tomado nas profundidades de 951,5 a 956,5 m (Figura 4.1 (C), linha sólida), ao qual foi aplicado o perfil ideal estimado (Figura 4.1 (C), linha tracejada). A resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço obtida através da metodologia apresentada é mostrada na Figura 4.1 (A). O perfil deconvolvido é mostrado na Figura 4.1 (B) (linha sólida) e o perfil original (linha tracejada). O efeito do processamento pode ser verificado através do incremento do gradiente da linha sólida em comparação com a linha tracejada, bem como dos valores lidos nos intervalos de menor espessura. Neste exemplo buscamos mostrar um caso bastante comum da deconvolução a partir de um perfil quase-sintético para o perfil de

indução, onde o intervalo de controle no perfil original é baixa qualidade, o que não causa maiores danos ao processamento.

4.2.2 Exemplo 2

Neste exemplo tomamos um trecho do perfil de densidade do poço PIR-66, nas profundidades de 975 a 1000 *m*. A resposta vertical da ferramenta está mostrada na Figura 4.2 (A). O perfil com resolução vertical ampliada é mostrado na Figura 4.2 (B) (linha sólida) e o perfil original mostrado em linha tracejada. O intervalo de controle foi tomado nas profundidades de 995 a 999,5 *m* do perfil original (Figura 4.2 (C) (linha sólida)), ao qual foi aplicado o perfil ideal, mostrado na mesma figura em linha tracejada, o qual arbitra a mais provável posição da interface, o que provoca, por meio do processamento, uma correção do posicionamento, ao longo do perfil, da localização das interfaces. Isto pode ser verificado no perfil processado através do reposicionamento das interfaces em todo o trecho. O perfil de densidade compensado é um perfil considerado de boa resolução vertical, apresentando, em geral, pequena degradação dos valores lidos nas camadas menos espessas o que justifica a pequena variação dos valores processados.

4.2.3 Exemplo 3

Mostramos na Figura 4.3 mais uma aplicação do método aqui apresentado ao perfil de densidade (LDT, *Schlumberger*), do qual tomamos o trecho entre as profundidades de 3201 a 3211 *m*. O intervalo de controle foi tomado nas profundidades de 3207,7 a 3209,7 *m*. O intervalo de controle ideal atribuído está mostrado na Figura 4.3 (C) (linha tracejada) e o trecho original em linha sólida. A resposta da ferramenta sob as condições atuais do poço está mostrada na Figura 4.3 (A). Na Figura 4.3 (B) em linha sólida está mostrado o perfil com resolução vertical ampliada e o perfil original em linha tracejada. O efeito do processamento é visualizado nas camadas nas profundidades de 3202 a 3204 *m* com o aumento do gradiente da curva processada associada ao incremento dos valores lidos. A utilização de trechos de pequena profundidade permite uma melhor visualização do processamento.

4.2.4 Exemplo 4

Para esse exemplo tomamos um outro trecho do perfil de indução eletromagnética, corrido no poço PIR-69, nas profundidades de 807 a 825 *m*. O intervalo de controle foi tomado nas profundidades de 807 a 809 *m* (Figura 4.4 (C) (linha sólida)) ao qual foi associado

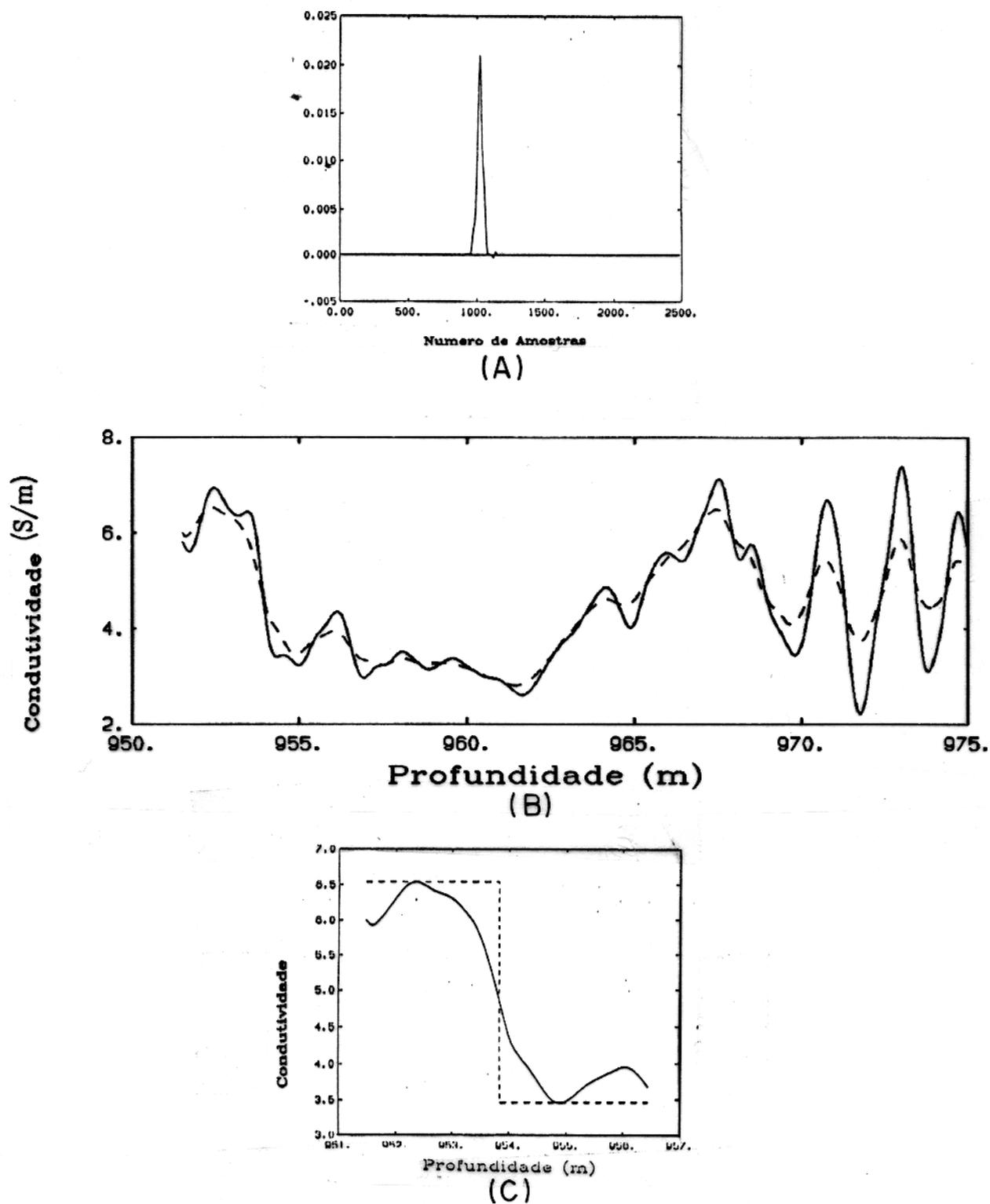


Figura 4.1 - Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de indução eletromagnética original (linha tracejada). Perfil de indução eletromagnética com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).

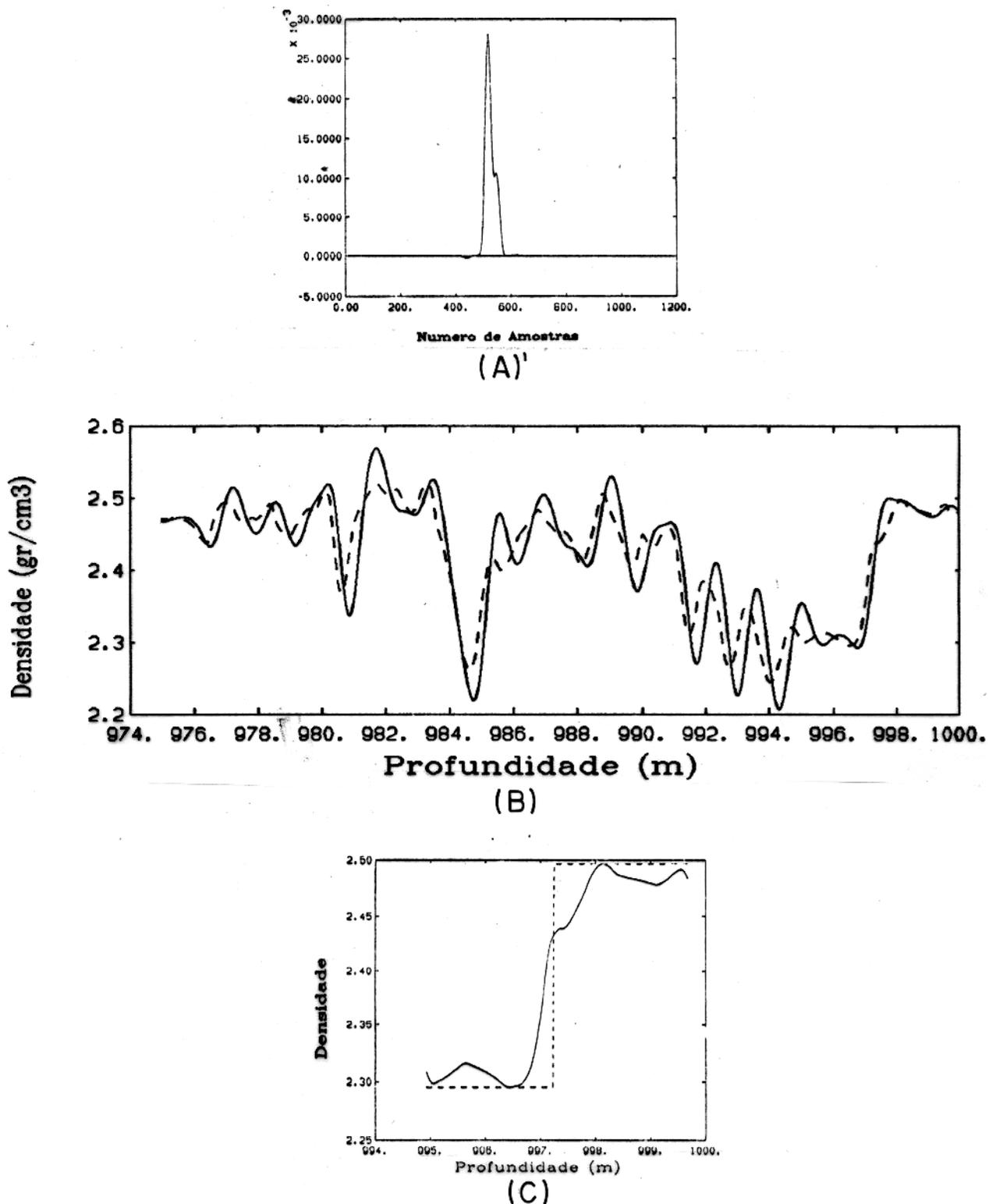


Figura 4.2 - Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de densidade original (linha tracejada). Perfil de densidade com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).

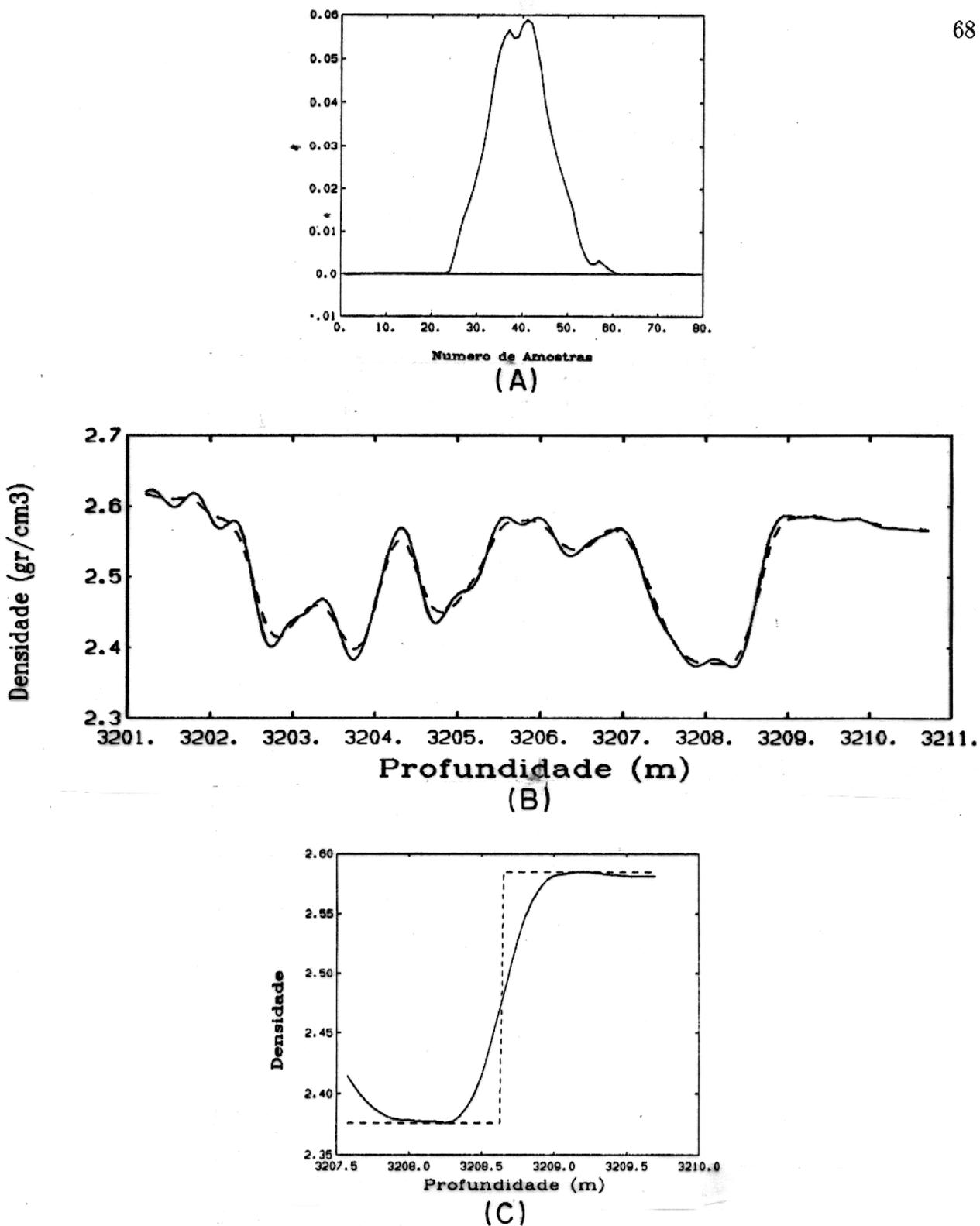


Figura 4.3 - Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de densidade original (linha tracejada). Perfil de densidade com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).

o perfil ideal, mostrado na mesma figura em linha tracejada. Neste trecho não existe a evidência da presença de camadas finas uma vez que o perfil processado (Figura 4.4 (B) (linha sólida)) é praticamente igual ao perfil original (Figura 4.4 (C) (linha tracejada)). A resposta da ferramenta sob as condições atuais do poço é mostrado na Figura 4.4 (A). Um trecho de perfil, tomado frente a camadas espessas é normalmente utilizado para a verificação da qualidade do processamento, para a sua aplicação em profundidades onde se espera a ocorrência de camadas finas. Neste caso a aplicação se mostrou positiva uma vez que não ocorreu a introdução, no perfil processado, de nenhuma frequência estranha originada do processamento em si..

4.2.5 Exemplo 5

Neste exemplo mostramos a deconvolução de um trecho do perfil de raios gama natural, corrido no poço PIR-69 (Figura 4.5 (B) (linha tracejada)), o perfil processado está mostrado na mesma figura em linha sólida. O intervalo de profundidades foi tomado entre 507 a 525 m, com o intervalo de controle tomado nas profundidades de 522,5 a 526 m (Figura 4.5 (C)). A perfeita determinação da localização da interface no interior do intervalo de controle proporciona a correção, em profundidade das localizações das interfaces das camadas ao longo do trecho processado. No intervalo de 516 a 518 m ocorre a evidência da presença de camadas finas. A função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço está mostrada na Figura 4.5 (A).

4.2.6 Exemplo 6

Neste exemplo, mostramos a aplicação da deconvolução do trecho do perfil de indução eletromagnética do poço PIR-66, tomado nas profundidades de 427 a 451 m pelas duas metodologias descritas neste trabalho. Na Figura 4.6 (A) mostramos em linha sólida o perfil deconvoluido a partir da função resposta da ferramenta sob as condições atuais do poço obtida através de um perfil ideal arbitrado ao intervalo de controle e em linha tracejada o perfil original. Na Figura 4.6 (B) mostramos em linha sólida o perfil deconvoluido a partir da função resposta da ferramenta sob as condições atuais do poço obtida através da utilização, no intervalo de controle, de um trecho do perfil de alta resolução vertical disponível neste poço, que é o perfil de micro-resistividade, tomado nas profundidades de 449 a 451 m. A comparação visual dos perfis processados mostra uma boa coerência (qualitativamente) nas formas finais dos perfis processados, mas mostra algumas variações na grandeza dos valores finais de condutividade. Este efeito é devido ao fato de que o perfil ideal apresenta maior

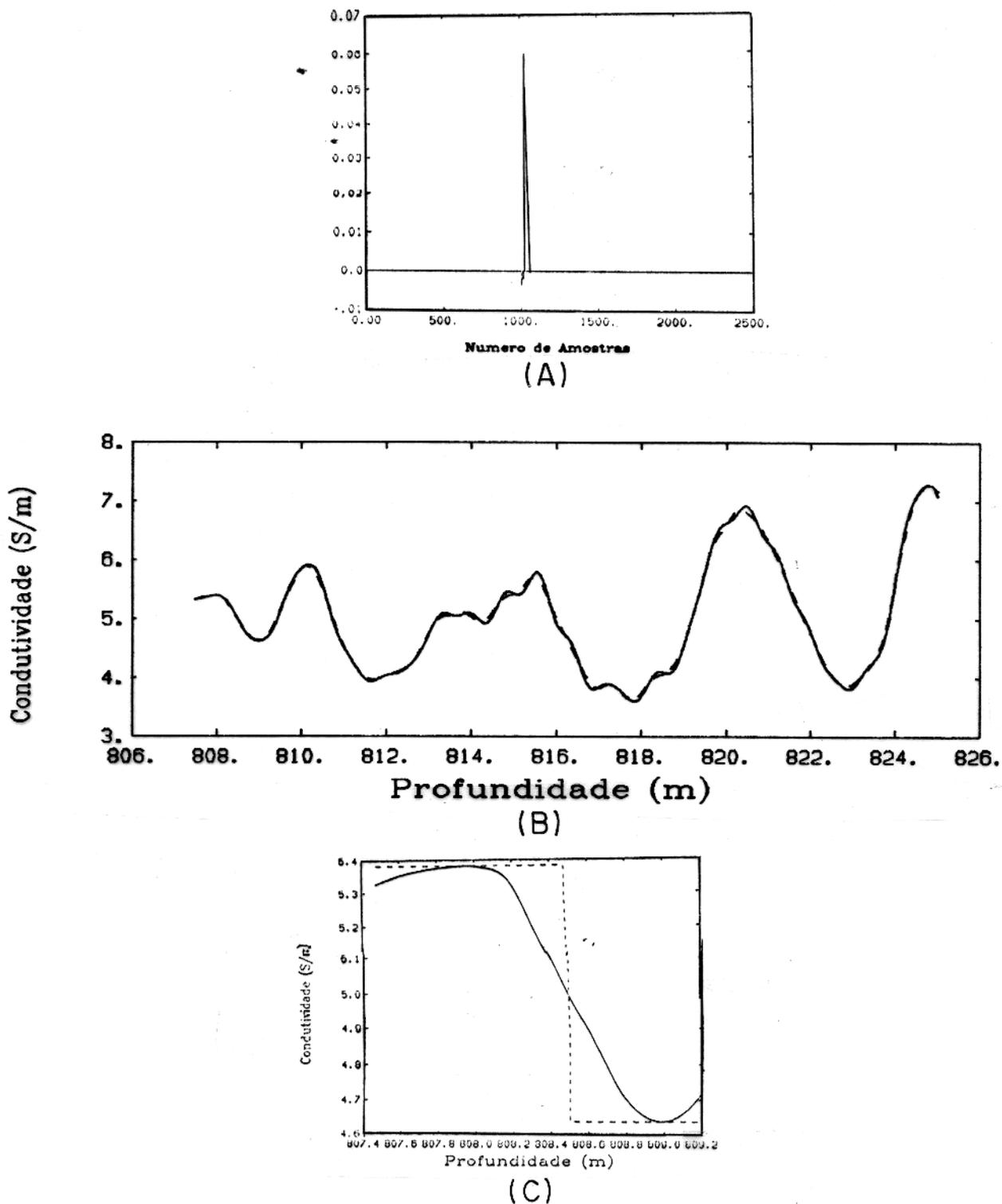


Figura 4.4 - Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de indução eletromagnética original (linha tracejada). Perfil de indução eletromagnética com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).

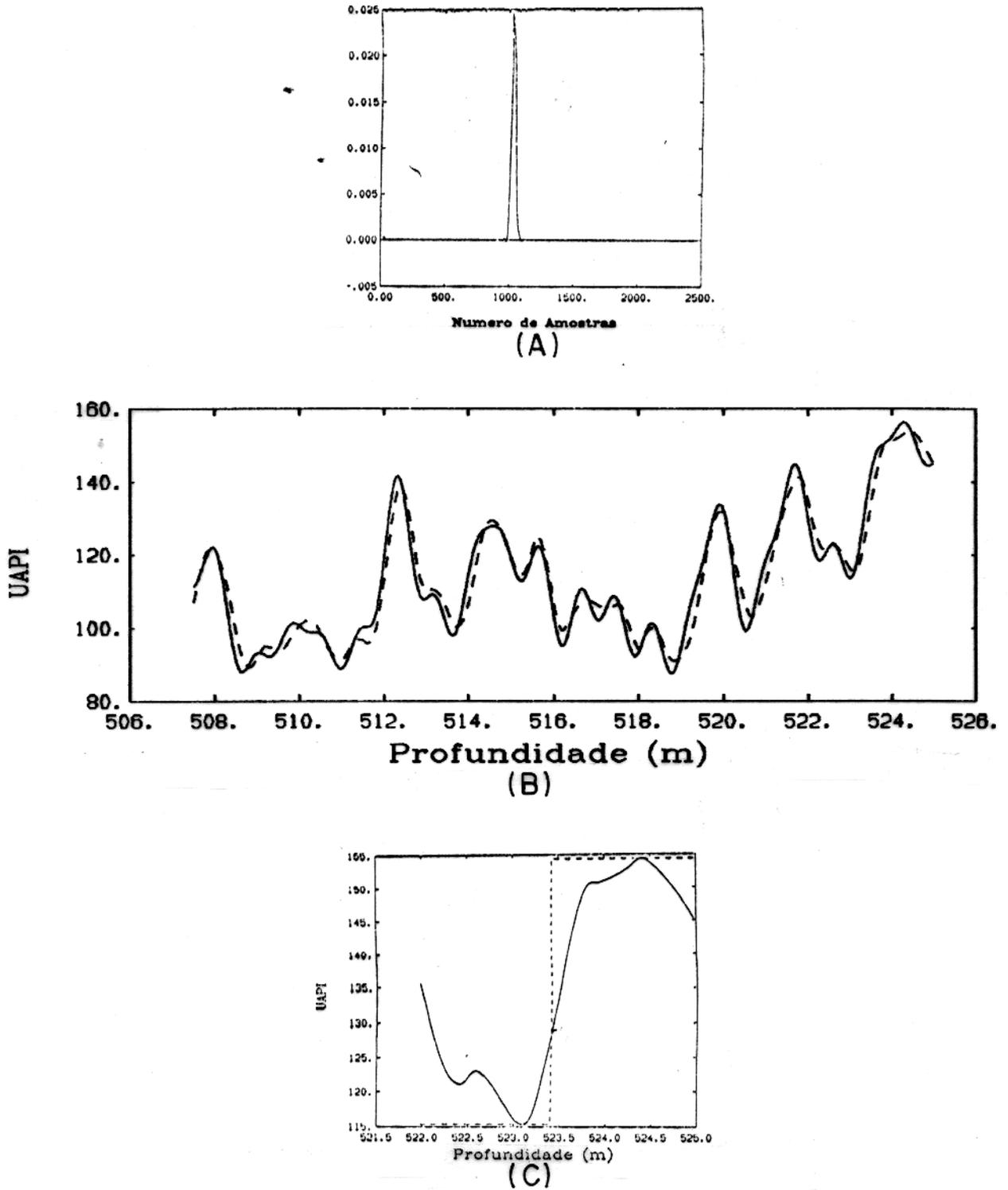


Figura 4.5 - Resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço (A). Perfil de raios gama natural original (linha tracejada). Perfil de raio gama natural com resolução vertical melhorada (linha sólida) (B). Intervalo de controle (C).

resolução vertical que o de micro-resistividade, ou seja o maior conteúdo de frequência torna o processamento mais efetivo.

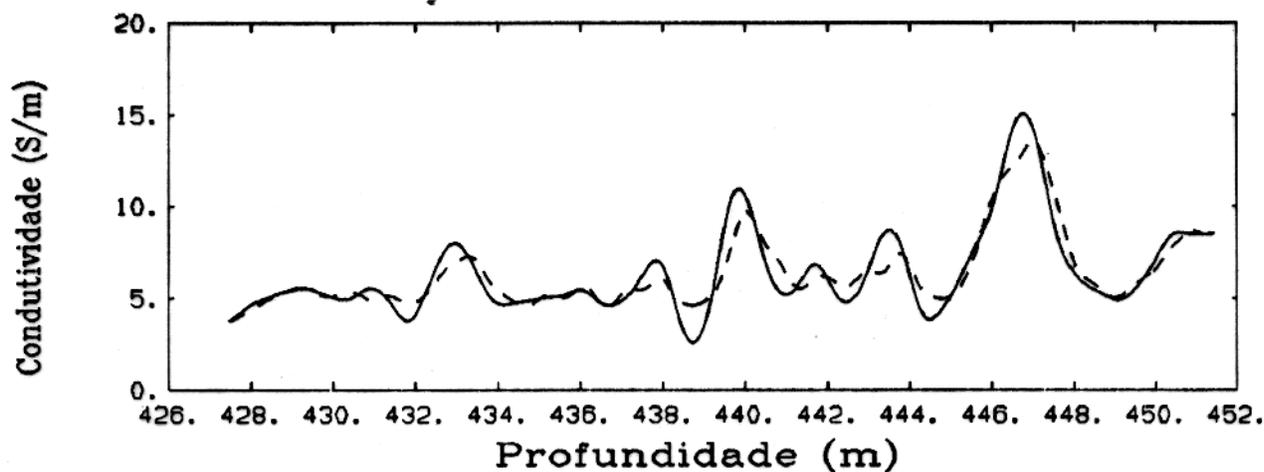
Nos casos onde não existe a possibilidade de se arbitrar um perfil ideal para o intervalo de controle a utilização de informações obtidas de uma ferramentas de mais alta resolução vertical, tornam o processamento, em termos gerais, bastante aceitável, do ponto de vista de identificação de camadas de pequena espessura no perfil original.

4.2.7 Exemplo 7

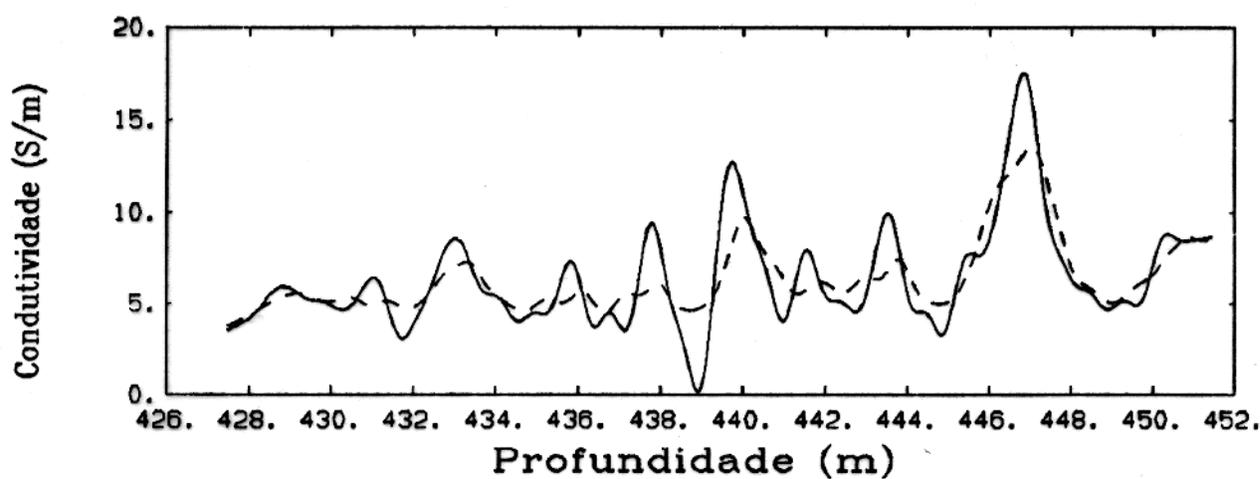
Para esse exemplo tomamos o perfil de resistividade para o poço PIR-66, tomado nas profundidades de 427 a 451 apresentado em linha tracejada na Figura 4.7 (B), deconvoluido (Figura 4.7 (B) (linha sólida)), através da associação de um trecho do perfil de alta resolução (MSFL) no interior do intervalo de controle, tomado nas profundidades de 449 a 451 m. Na Figura 4.7 (A) mostra o intervalo de controle assumido, em linha sólida é mostrado o perfil de resistividade e em linha tracejada o perfil de micro-resistividade. O ajuste em profundidade dos dois perfis, no interior do intervalo de controle, provoca o reposicionamento das camadas vistas no perfil deconvoluido.

4.2.8 Exemplo 8

Neste exemplo tomamos um trecho do perfil de indução eletromagnética corrido no poço PIR-69, nas profundidades de 710 a 730 m, com boas evidências da presença de camadas de pequena espessura, vistas no perfil de alta resolução vertical (MSFL), mostrado na Figura 4.8 (B), do qual um trecho nas profundidades de 711 a 712,8 m foi associado ao perfil de baixa resolução vertical. As evidências de camadas finas não aparece no perfil de indução original (Figura 4.8 (A) (linha tracejada)) e está clara no perfil deconvoluido (Figura 4.8 (A) (linha sólida)), que agora apresenta uma boa correlação em relação ao perfil de alta resolução vertical.

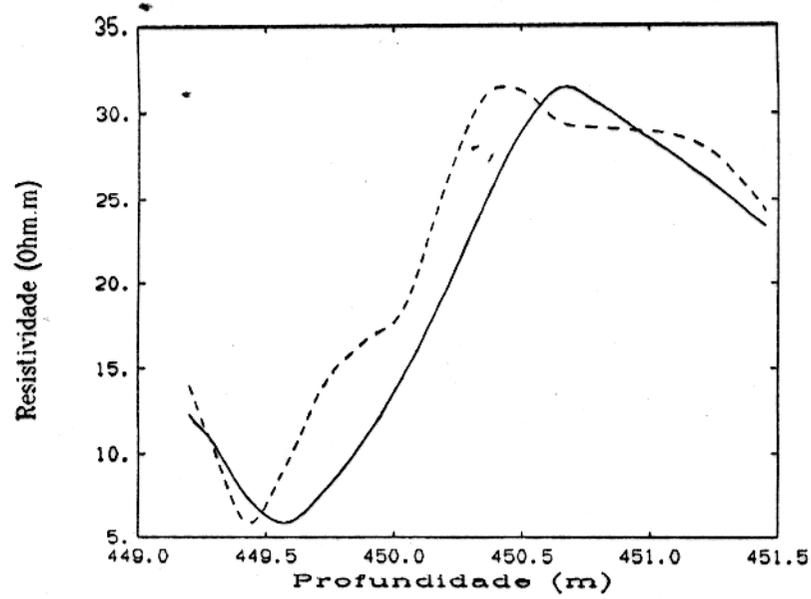


(A)

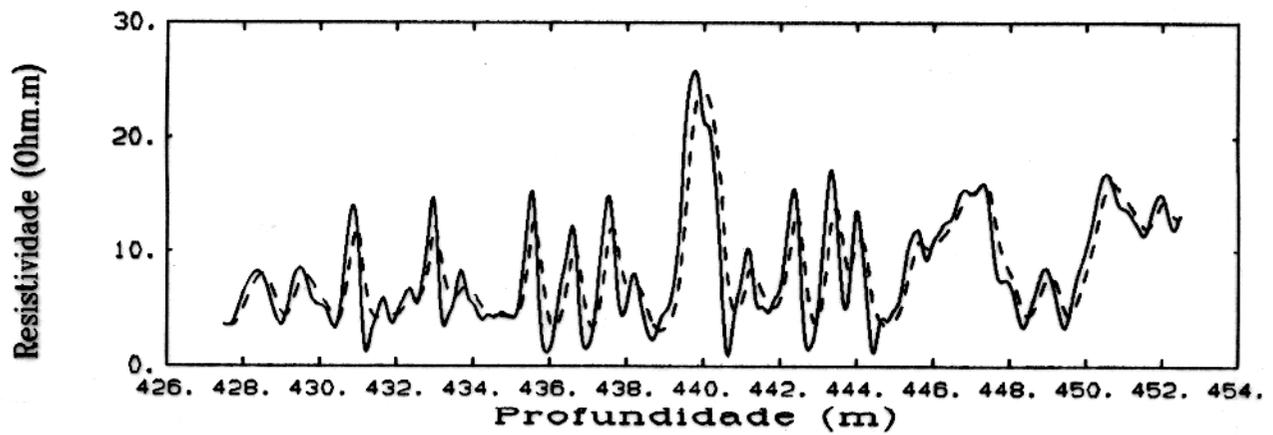


(B)

Figura 4.6 - Perfil de indução eletromagnética original (linha tracejada). Perfil deconvolvido a partir de um perfil ideal associado ao intervalo de controle (linha sólida) (A). Perfil de indução eletromagnética original (linha tracejada). Perfil deconvolvido a partir de um trecho de perfil de alta resolução vertical associado ao intervalo de controle (linha sólida) (B).



(A)



(B)

Figura 4.7 - Intervalo de controle, perfil de resistividade (linha sólida), perfil de micro-resistividade (linha tracejada) (A). Perfil de resistividade deconvoluido (linha sólida), perfil original (linha tracejada) (B).

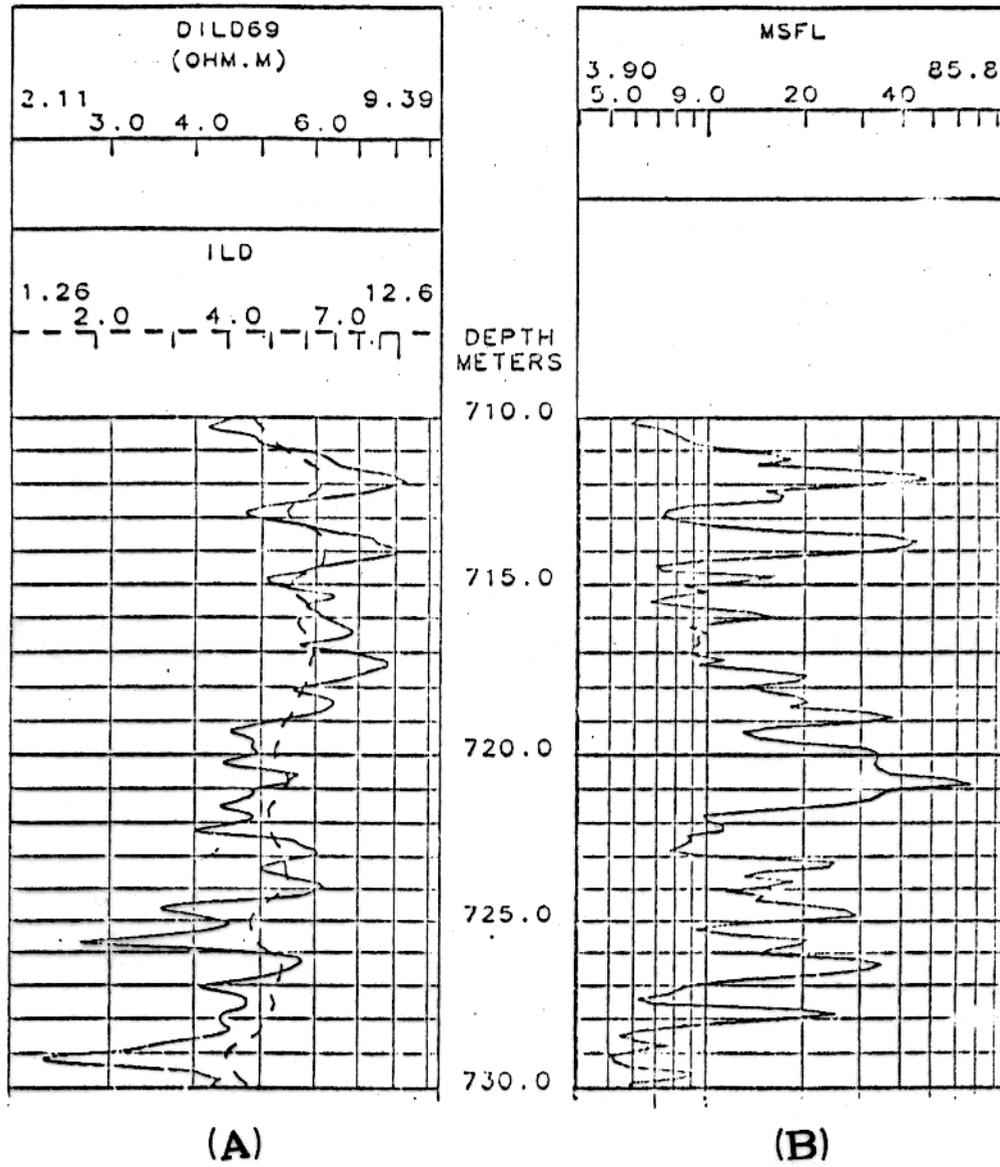


Figura 4.8 - Perfil de indução eletromagnética deconvolvido (linha sólida), perfil original (linha tracejada) (A). Perfil de micro-resistividade (B).

5 - CONCLUSÕES

A deconvolução dos perfis convencionais através da determinação *a priori* da função resposta vertical da ferramenta, a partir das informações de alta resolução obtidas de uma ferramenta de investigação rasa, denominada como *função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço*, mostrou-se um método computacionalmente eficiente e de caráter geral. Ou seja, não é restrito a uma determinada ferramenta específica ou a um pacote de processamento de uma determinada empresa de perfilagem, incorporando em seu desenvolvimento todos os tratamentos anteriores aplicados aos dados do perfil. Este método permite ainda a completa utilização das informações das ferramentas de investigação rasa, uma vez que a presença de invasão do filtrado e do bolo da lama, que impediram a utilização dessas informações em trabalhos anteriores, não degradam este processo. Apresenta ainda a possibilidade de incorporação de novos avanços tecnológicos, com a utilização de informações de novas ferramentas de alta resolução vertical, aprimorando o processo de incremento da resolução vertical dos perfis convencionais.

Como a maioria dos outros métodos de deconvolução apresentados, a determinação da função resposta vertical da ferramenta sob as condições atuais do poço apresenta limitações no trato com dados que apresentam um nível excessivo de ruídos ou contrastes muito elevados (maiores que uma ordem de grandeza) do parâmetro petrofísico investigado. A qualidade do processo é extremamente dependente do julgamento do usuário na escolha dos intervalos de controle ao longo do perfil. Ao que recomendamos a sua utilização em estações de trabalho, de maneira iterativa, para a verificação da escolha do melhor intervalo de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asquith, G. 1982. Basic Well Log Analysis for Geologists. Tulsa. AAPG Press. 216 p.
- Allen, D. 1984. Laminated Sand Analysis. In: SPWLA 25th Annual Logging Symposium, June, New Orleans. Proceedings... New Orleans, SPWLA, paper XX.
- Allen, D.; Anderson, B.; Barber, T. D.; Flaum, C.; Hemingway, J.; Ligneris, S. 1988. Advances in High-Resolution Logging. The Technical Review, 36(2): 4-14.
- Anderson, B. & Gianzero, S. 1983. Induction Sonde Response in Stratified Media. The Log Analyst, 24(1): 25-31.
- Anderson, B.; Barber, T. D.; Schaefer, R., 1987; Induction Logging: Evolution of a Technique. The Technical Review, 35(1): 35-41.
- Barber, T. D., 1985; Introduction to the Phasor Dual Induction Tool. Journal of Petroleum Technology, SPE, September, p. 1699-1706.
- Barber, T. D., 1988; Induction Vertical Resolution Enhancement: Physics and Limitations. In: SPWLA 29th Annual Logging Symposium, June, San Antonio. Proceedings... San Antonio, SPWLA, paper O.
- Bath, M. 1979. Spectral Analysis in Geophysics. New York, Elsevier. 314 p.
- Bradley, H. B. 1987. Petroleum Engineering Handbook. 2 ed. Richardson. SPE. 957 p.
- Brown, S.; Boyeldier, C.; Cheung, P.; Clavier, C.; Crary, S. 1987. Fracture Detection with Well Logs. The Technical Review, 35(1): 22-34.
- Cosmo, C.; Spalburg, M.; Looyestijn, W., 1991; Fast Deconvolution of Laterologs by Direct Inverse Filtering. In: SPWLA 32nd Annual Logging Symposium, June, Midland. Proceedings... SPWLA, paper R.
- Doll, H. G., 1949. Introduction to Induction Logging and Application to Wells Drilled with Oil Base Mud. Journal of Petroleum Technology, SPE, June, p. 148-162.
- Duesterhoeft, W. C. 1961. Propagation Effects in Induction Logging. Geophysics, 26(2): 192-204.

- Ellis, D. V. 1987. *Well Logging for Earth Scientists*. 2 ed. New York. Elsevier. 521 p.
- Flaum, C.; Galford, J.; Hastings, A. 1987. Enhancement Vertical Resolution Processing of Dual Detector Gamma-Gamma Density Logs. In: SPWLA 28th Annual Logging Symposium, June, London. Proceedings... , London, SPWLA, paper M.
- Foster, M. E. 1962. Optimum Inverse Filter Which Shorten the Spacing of Velocity Logs. *Geophysics*, 27(3): 317-326.
- Galford, J.; Flaum, C.; Gilchrist, W.; Duckett, S. 1986. Enhanced Resolution Processing Of Compensated Neutron Logs. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October, New Orleans Proceedings... New Orleans, SPE, paper 15541.
- Gianzero, S. & Anderson, B. 1982. A New Look at Skin Effect. *The Log Analyst*, 23(1):20-34.
- Hallemburg, J. K. 1984. *Geophysical Logging for Mineral and Engineering Applications*. Tulsa. PennWell Books. p. 9 - 50
- Hamming, R. W. 1983. *Digital Filters*. New York, Prentice-Hall Inc. p. 64 - 120.
- Hearst, J. R. 1985. *Well Logging for Physical Properties*. New York. MacGraw-Hill. p. 100 - 150.
- Kanasewich, E. R. 1975. *Time Sequence Analysis in Geophysics*. The University of Alberta Press. 364 p.
- Kerford, S. & Georgi, D. 1990. Application of Time-Series Analysis to Wireline Logs. *The Log Analyst*, 31(3) 150-157.
- Looyestijn, W. J. 1982. Deconvolution of Petrophysical Logs: Applications and Limitations. In: SPWLA 23th Annual Logging Symposium, June, Corpus Christi. Proceedings... , Corpus Christi, SPWLA, paper W.
- Lyle, W. & Willians, D. 1986. Deconvolution of Well Log Data, an Innovations Approach. In: SPWLA 27th Annual Logging Symposium, June, Houston. Proceedings... , Houston, SPWLA, paper O.
- 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... , SBGE, paper 2.
- Minette, D. C. 1990. Thin Bed Resolution Enhancement: Potential and Pitfalls. In: SPWLA 31st Annual Logging Symposium, June, Lafayette. Proceedings... , SPWLA, paper GG.

- Mitchell, W. K. & Nelson, R. J. 1990. Improved Vertical Resolution of Well Logs by Resolution Matching. In: SPWLA 31st Annual Logging Symposium, June, Lafayette. Proceedings... , SPWLA, paper JJ.
- Moran, J. H. & Kunz, K. S. 1962. Basic Theory of Induction Logging and Application to Study of Two-coil Sondes, *Geophysics*, 27(6): 829–858
- Press, W.; Flannery, B.; Teukolsky, S.; Vetterling, W. 1987. *Numerical Recipes*. 2 ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 720 p.
- Rabiner, L. 1975. *Theory and Application of Digital Signal Processing*. New York. Prentice–Hall, Inc. 317 p.
- Rosenfeld, A. & Kak, A. C. 1982. *Digital Picture Processing*. 2 ed. New York, Academic Press Inc. 290 p.
- Serra, O. 1984. *Fundamentals of Well Log Interpretation – The Acquisition of Logging Data*. Amsterdam. Elsevier. 423 p.
- Shen, L. C. 1988. Effects of Skin–effect Correction and Three–point Deconvolution on Induction Logs. In: SPWLA 29th Annual Logging Symposium, June, San Antonio. Proceedings... , SPWLA, paper M.
- Suau, J.; Albertelli, L.; Cigni, M.; Gragnani, U., 1984; Interpretation of Very Thin Gas Sands in Italy. In: SPWLA 31st Annual Logging Symposium, June, New Orleans. Proceedings... , New Orleans, SPWLA, paper A.
- Weaver, H. J. 1990. *Theory of Discrete and Continuous Fourier Analysis*. New York. John Wiley Sons. 307 p.
- Whitman, W.; Schon, J.; Towle, G.; Kim, J., 1990; An Automatic Inversion of Normal Resistivity Logs. *The Log Analyst*, 31(1): 10–19.

I - FLUXOGRAMA

