

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

APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE SÉRIES
TEMPORAIS EM PERFIS DE POÇO

TESE APRESENTADA POR
HAMILTON PEREIRA DA SILVA

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

Data de Aprovação : 17/08/1993

COMITÊ DE TESE:

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

Jadir G. Silva
Dr. Jadir da Conceição da Silva

Stefan M. Lüthi
Dr. Stefan Moritz Lüthi

BELÉM

1993

SILVA, Hamilton Pereira da. Aplicação de análise de séries temporais em perfis de poço. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1993. 102 p. il. Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1993.

1. COERÊNCIA – Perfis de poços. 2. RAZÃO SINAL-RUÍDO. 3. EXPECTRO DE POTÊNCIA. I. Título.

A Vitor Guilherme, Natalia,
Joanita, Hilton e Edineide.

AGRADECIMENTOS

A Henrique (*in memorium*) e Joanita Pereira da Silva, meus pais, e Hilton Pereira da Silva, meu irmão mais velho, por terem conseguido, com muita luta e abnegação, transformar uma criança, desenganada pela medicina aos onze meses de idade, no autor deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Michael Anthony Lovell, por sua paciência e fundamental contribuição na elaboração deste trabalho.

Aos doutores Jadir da Conceição da Silva e Stefan Moritz Lüthi pelas correções e sugestões quando da revisão deste trabalho.

Ao Dr. Carlos Alberto Mendonça e ao Prof. Carlos Augusto Gonçalves pelas sugestões dadas no sentido de aprimorar este trabalho.

Ao Dr. Carlos Alberto Dias, coordenador geral, por sua pessoal e decisiva contribuição para que os propósitos pretendidos fossem alcançados.

Ao convênio UFPA/PETROBRÁS/FADESP/CNPq/FINEP pelo suporte financeiro.

Aos professores do Núcleo de Pesquisa em Geofísica de Petróleo da Universidade Federal do Pará.

À PETROBRÁS por ter fornecido os dados reais.

Aos amigos Alexandre José Santos Ramos e José Agnelo Soares pelo apoio pessoal dado nos momentos mais difíceis.

Aos demais amigos de curso pela grande ajuda e amizade durante o período de convívio.

Aos amigos Francisco Tenório de Souza e José Camelo Maciel pelo constante incentivo.

A Edineide Angelita da Costa Silva, minha esposa, pelo incentivo cotidiano.

À senhora Bena Rodrigues, secretária da coordenação geral, por sua solicitude exemplar.

Àqueles funcionários do Núcleo de Pesquisa em Geofísica de Petróleo que forneceram condições favoráveis para a elaboração deste trabalho.

A Arquias Melo, Lúcia Recena e Renato Fernandes, por viabilizarem o deferimento dos meus dois pedidos de licença na EMTU/Recife.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	v
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 - INTRODUÇÃO	5
2 - METODOLOGIA	8
2.1 ALGUNS FUNDAMENTOS NECESSÁRIOS	8
2.1.1 A Transformada de Fourier	8
2.1.1.1 Frequência Nyquist	10
2.1.1.2 Subrotina de DFFT	10
2.1.2 Filtro Derivada	10
2.1.3 Espectro de Potência	11
2.2 PRÉ-PROCESSAMENTO	12
2.2.1 Retirada da Média	12
2.2.2 Retirada do Alinhamento	12
2.2.3 Aplicação do Ponderador Cossenoidal	14
2.2.4 Aplicação do Branqueamento Preliminar	16
2.2.4.1 Transformadas de Fourier das Seções	16
2.2.4.2 Determinação do Filtro Passa-Alta Ideal	17
2.2.4.3 Branqueamento Preliminar das Seções	18
2.3 JANELA HANNING	20
2.4 A FUNÇÃO COERÊNCIA	21
2.5 ESPECTRO DE FASE	22
2.6 INTERVALO DE CONFIANÇA	22
2.6.1 Cálculo do Valor Médio Teórico da Coerência	22
2.6.2 Determinação dos Intervalos de Confiança	23

2.7	FREQÜÊNCIA PARA UM NÍVEL DE CONFIANÇA DE 50%	27
2.8	CÁLCULO DA RESOLUÇÃO VERTICAL	29
2.9	RAZÃO SINAL-RUÍDO	30
2.10	ESPECTRO DE POTÊNCIA DO SINAL E DO RUÍDO	30
3	PRINCÍPIO DE OBTENÇÃO DE ALGUNS PERFIS	54
3.1	PERFIL DE DENSIDADE	54
3.2	PERFIL DE POROSIDADE NEUTRÔNICA	55
3.3	PERFIL DE RAIOS GAMA	55
3.4	PERFIL MICRO-ESFÉRICO	56
3.5	PERFIS DE INDUÇÃO	57
4	DADOS UTILIZADOS	58
4.1	ORIGEM DOS DADOS	58
4.2	PERFIS SELECIONADOS	58
4.3	OS POÇOS ESCOLHIDOS	59
4.3.1	Formato dos Arquivos	60
4.3.2	Poço A	60
4.3.3	Poço B	61
4.3.4	Poço C	61
4.3.5	Poço D	62
4.3.5.1	Perfis Normais	62
4.3.5.2	Perfis de Alta Resolução	63
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5.1	QUANTO À REPETIÇÃO DOS PERFIS SELECIONADOS	67
5.2	QUANTO À VELOCIDADE DE PERFILAGEM UTILIZADA	70
5.3	QUANTO À VARIAÇÃO DO INTERVALO DE AMOSTRAGEM	72
5.4	QUANTO À RESOLUÇÃO VERTICAL	74
5.5	QUANTO AOS POÇOS	75
5.6	QUANTO AO ESPECTRO DE FASE	77
5.7	QUANTO À RAZÃO SINAL-RUÍDO	77
5.8	QUANTO AOS ESPECTROS DE POTÊNCIA DO SINAL E DO RUÍDO	78
6	CONCLUSÃO	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

TABELAS

2.1	Forma Assumida pelo Expoente do Filtro Passa-Alta Modelado (EX), Segundo a Quantidade (N) de Amostras e o Tipo de Perfil Utilizados.	19
2.2	Valores Assumidos pelo Nível de Confiança de Acordo com a Quantidade (N) de Amostras Utilizadas.	26
2.3	Valores da Freqüência Máxima para um Nível de Confiança de 50% da Coerência.	28
2.4	Resolução Vertical de Alguns Perfis Utilizados.	29
4.1	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Poço A.	60
4.2	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Poço B.	61
4.3	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Poço C.	62
4.4	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado dos Perfis Normais do Poço D.	63
4.5	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Perfil (Digital) de Raios Gama de Alta Resolução (HGR) do Poço D.	64
4.6	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Perfil (Digital) de Porosidade de Alta Resolução (HNPO) do Poço D.	64
4.7	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Perfil (Digital) de Densidade de Alta Resolução (HRHOB) do Poço D.	65
4.8	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Perfil (Digitalizado) de Raios Gama de Alta Resolução (HGR05) do Poço D.	65
4.9	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Perfil (Digitalizado) de Porosidade de Alta Resolução (HNPO05) do Poço D.	66
4.10	Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Perfil (Digitalizado) de Densidade de Alta Resolução (HRHOB02) do Poço D.	66

FIGURAS

2.1	Seções principal e repetida do perfil de raios gama normal do poço A, pertencente à Bacia Potiguar emersa.	32
-----	--	----

2.2	Seção principal do perfil de raios gama normal (GR) do poço A sem a média.	33
2.3	(a) Seção principal do perfil micro-esférico (linha tracejada) do poço A, sem a média, e o respectivo alinhamento polinomial algébrico de primeiro grau (linha cheia).	34
2.3	(b) Seção principal do perfil micro-esférico (linha tracejada) do poço A, sem a média, e o respectivo alinhamento polinomial algébrico de segundo grau (linha cheia).	35
2.3	(c) Seção principal do perfil micro-esférico (linha tracejada) do poço A, sem a média, e o respectivo alinhamento polinomial algébrico de terceiro grau (linha cheia).	36
2.3	(d) Seção principal do perfil micro-esférico (linha tracejada) do poço A, sem a média, e o respectivo alinhamento polinomial algébrico de quarto grau (linha cheia).	37
2.4	Seção principal do perfil de raios gama normal do poço A sem o alinhamento polinomial algébrico de primeiro grau.	38
2.5	(a) A seção utilizada do perfil pode ser vista como o produto entre o sinal infinitamente longo (linha cheia) e a função retangular (linha tracejada); (b) ilustração do fenômeno de "leakage", no domínio da frequência, provocado pela aplicação da função retangular, no domínio do espaço.	39
2.6	(a) Função ponderadora no domínio do espaço e em relação à quantidade (N) de pontos; (b) espectro de amplitude da função ponderadora ($\Delta z = 0,20$ m).	40
2.7	Seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação da função ponderadora.	41
2.8	Partes real (a) e imaginária (b) da transformada de Fourier da seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação da função ponderadora.	42
2.9	Forma assumida, no domínio da frequência, pelo filtro passa-alta utilizado para o branqueamento preliminar dos perfis de raios gama dos poços A, B e D.	43
2.10	Partes real (a) e imaginária (b) da transformada de Fourier da seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação do filtro passa-alta, evidenciando a atenuação das frequências baixas.	44
2.11	(a) Janela Hanning, em função da quantidade (N) de pontos; (b) espectro de amplitude da janela Hanning ($\Delta z = 0,20$ m).	45

2.12	Seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação do filtro passa-alta modelado e no domínio do espaço.	46
2.13	Seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação da janela Hanning.	47
2.14	(a) Coerência para duas seções idênticas; (b) Coerência para duas seções muito diferentes entre si.	48
2.15	(a) Espectro de fase para duas seções idênticas e na mesma profundidade; (b) espectro de fase para duas seções muito diferentes entre si e na mesma profundidade; (c) espectro de fase para duas seções idênticas e em profundidades diferentes.	49
2.16	Coerência relativa às seções principal e repetida do perfil de raios gama normal do poço A, com a indicação da frequência máxima para um nível de confiança de 50% ($f_{50\%}$) e da região a ser ampliada (retângulo em linha cheia) para a ilustração do cálculo utilizado na obtenção desta frequência.	50
2.17	Retângulo ampliado da Figura 2.16 para auxiliar na compreensão do desenvolvimento teórico aplicado à obtenção da frequência máxima para um nível de confiança de 50%, com base nas relações geométricas entre o triângulo de vértices A, B e C e o triângulo de vértices A, b e d.	51
2.18	Razão sinal-ruído do perfil de raios gama do poço A.	52
2.19	Espectros de potência do sinal e do ruído da seção principal do perfil de raios gama do poço A.	53
5.1	Coerência para os perfis de resistividade (MSFL), porosidade neutônica (CNL) e raios gama (GR), obtidos com intervalo de amostragem de 0,20 m e velocidade de perfilagem de 550 m/h, evidenciando a boa repetição para o primeiro perfil (MSFL) e a proximidade qualitativa dos perfis radioativos (CNL e GR).	79
5.2	Coerência para os perfis de resistividade (MSFL, ILD e ILM), obtidos com intervalo de amostragem de 0,20 m e velocidade de perfilagem de 920 m/h, evidenciando a melhor repetição para os perfis de indução e o efeito nocivo da velocidade de perfilagem utilizada.	80
5.3	Coerência para os perfis de densidade normal e de alta resolução, obtidos, respectivamente, com velocidades de perfilagem de 550 m/h e 275 m/h, e mesmo intervalo de amostragem (0,20 m), evidenciando a melhor repetição para o perfil de densidade normal.	81

Figura 5.4	Coerência para os perfis de raios gama normal e de alta resolução, obtidos, respectivamente, com velocidades de perfilagem de 550 m/h e 275 m/h, e mesmo intervalo de amostragem (0,20 m), evidenciando a melhor repetição para o perfil de raios gama normal.	82
Figura 5.5	Coerência para os perfis de porosidade neutrônica normal e de alta resolução, obtidos, respectivamente, com velocidades de perfilagem de 550 m/h e 275 m/h, e mesmo intervalo de amostragem (0,20 m), evidenciando a melhor repetição para o perfil de porosidade neutrônica de alta resolução.	83
Figura 5.6	Coerência para os perfis de raios gama de alta resolução, obtidos com intervalos de amostragem de 0,20 m e 0,0508 m e mesma velocidade de perfilagem (275 m/h), evidenciando a repetição ligeiramente melhor para o perfil de raios gama com menor intervalo de amostragem (0,0508 m).	84
Figura 5.7	Coerência para os perfis de porosidade neutrônica de alta resolução, obtidos com intervalos de amostragem de 0,20 m e 0,0508 m e mesma velocidade de perfilagem (275 m/h), evidenciando a repetição ligeiramente melhor para o perfil de porosidade neutrônica com menor intervalo de amostragem (0,0508 m).	85
Figura 5.8	Coerência para os perfis de densidade de alta resolução, obtidos com intervalos de amostragem de 0,20 m e 0,0254 m e mesma velocidade de perfilagem (275 m/h), evidenciando a melhor repetição para o perfil de densidade com menor intervalo de amostragem (0,0254 m).	86
Figura 5.9	Coerência para os perfis de raios gama normais dos poços A, B e D, obtidos em condições de perfilagem idênticas e com a indicação das respectivas porosidades neutrônicas, evidenciando o efeito da porosidade sobre o perfil.	87
Figura 5.10	Coerência para os perfis de porosidade neutrônica normais dos poços A, B e D, obtidos em condições de perfilagem idênticas e com a indicação das respectivas porosidades neutrônicas, evidenciando o efeito da porosidade sobre o perfil.	88
Figura 5.11	Espectro de fase para o perfil de raios gama do poço C, evidenciando o deslocamento relativo existente entre as seções principal e repetida.	89
Figura 5.12	Superposição das seções principal e repetida do poço C, que confirma o deslocamento relativo entre ambas indicado pelo espectro de fase (Figura 5.11).	90
Figura 5.13	Razão sinal-ruído para os perfis de raios gama dos poços A, B e D.	91

5.14	Razão sinal-ruído para os perfis de porosidade neutrônica dos poços A, B e D.	92
5.15	Espectros de potência dos sinais das seções principal e repetida do perfil de raios gama do poço A.	93
5.16	Espectros de potência dos ruídos das seções principal e repetida do perfil de raios gama do poço A.	94

RESUMO

Esta tese descreve a aplicação de análise de séries temporais em perfis de poço. Através desta técnica é possível avaliar-se a repetição e a resolução vertical de perfis, e determinar-se o intervalo de amostragem e a velocidade de perfilagem ideais para diferentes perfis. A comparação entre três poços é também feita, baseada num mesmo tipo de perfil.

Para tanto, na seqüência utilizada, procurou-se manter num mesmo domínio os dados cuja quantidade total de amostras (N) por perfil não ultrapassou 2048. Desses dados, foram inicialmente retirados o valor médio das amostras e o alinhamento polinomial algébrico eventualmente nelas embutido. Em seguida, foi efetuada a aplicação do ponderador cossenoidal, do filtro passa-alta, da janela Hanning, do cálculo da função coerência, do espectro de fase, da razão sinal-ruído e dos espectros de potência do sinal e do ruído, nesta ordem.

Para a função coerência, fez-se necessário o cálculo dos níveis de confiança de 50%, 90% e 95%. O cálculo do primeiro nível teve por base a necessidade de se determinar a resolução vertical de alguns perfis, e dos demais, a fim de que fosse obtida uma informação referente à localização daqueles níveis para a coerência calculada.

Em relação ao espectro de fase, seu cálculo surgiu da necessidade de se obter uma informação adicional a respeito dos perfis manipulados, ou seja, o conhecimento da ocorrência ou não de deslocamento relativo de profundidade entre a seção principal e a seção repetida.

A razão sinal-ruído foi calculada no sentido de possibilitar a comparação, como elemento avaliador dos diversos tipos de perfis, com a coerência e o cálculo dos espectros de potência.

Os espectros de potência do sinal e do ruído foram calculados para se ter mais um parâmetro de avaliação da seção repetida, já que em tese, os espectros de potência do sinal e do ruído da seção repetida devem ser iguais aos respectivos espectros da seção principal.

Os dados utilizados na aplicação da metodologia proposta foram fornecidos pela PETROBRÁS e oriundos de quatro poços da Bacia Potiguar emersa. Por questões de sigilo empresarial, os poços foram identificados como poços A, B, C e D.

A avaliação da repetição entre diferentes tipos de perfis indica que, para o poço A, o perfil micro-esférico (MSFL) tem repetição melhor do que o perfil de porosidade neutrônica (CNL), o qual tem, por sua vez, repetição melhor do que o perfil de raios gama normal (GR).

Para os perfis do poço D, uma diminuição da velocidade de perfilagem de 550 m/h para 275 m/h é vantajosa apenas para o perfil de porosidade neutrônica. Já a velocidade de perfilagem de 920 m/h, utilizada na obtenção dos perfis do poço C, é totalmente inadequada para os perfis de resistividade (MSFL, ILD e ILM).

A diminuição do intervalo de amostragem de 0,20 m para 0,0508 m, nos perfis de raios gama e de porosidade neutrônica, e 0,0254 m para o perfil de densidade, apresenta bons resultados quando aplicada no poço D.

O cálculo da resolução vertical indica, para o perfil de porosidade neutrônica, uma superioridade qualitativa em relação ao perfil de raios gama normal, ambos pertencentes ao poço A. Para o poço C, o perfil micro-esférico apresenta uma resolução vertical na mesma ordem de grandeza da resolução do perfil de raios gama do poço B, o que evidencia ainda mais a inconveniência da velocidade de perfilagem utilizada no poço C. Já para o poço D, o cálculo da resolução vertical indica uma superioridade qualitativa do perfil de densidade de alta resolução em relação ao perfil de raios gama de alta resolução.

A comparação entre os poços A, B e D, levada a efeito através dos respectivos perfis de porosidade neutrônica normais, comprova que a presença de ruído aleatório, em geral, está diretamente ligada à porosidade da formação - uma maior porosidade indica uma presença maior de ruído e, por conseguinte, uma queda qualitativa no perfil obtido.

A análise do espectro de fase de cada perfil indica um deslocamento em profundidade, existente entre as seções principal e repetida de todos os perfis do poço C. E isto pôde ser confirmado com a posterior superposição das seções.

ABSTRACT

This thesis describes the application of time series analysis to wireline logs. Through this technique it is possible to evaluate both their repeatability and vertical resolution, and determine the optimum sampling interval and acquisition speed for different logs. A comparison between three wells is also made, based on the same type of log.

The sequence used, is to obtain data, in the same domain, for which the number of samples (N) does not exceed 2048. For these data the mean sample value and the algebraic polynomial are determined. The following were then applied, in order: cosine taper, high pass filter, Hanning window, the calculation of the coherence function, the phase spectra, and the signal to noise ratio of the power spectra for both the signal and the noise.

For the coherence function, it was necessary to calculate the level of confidence for 50% necessary to determine the vertical resolution of some logs. The others were calculated to provide information concerning the position of the levels of coherence calculated.

In relation to the phase spectra, its calculation suggests it is necessary to obtain additional information in respect of the processed logs, or in other words knowledge of any relative depth shifts made between the principal and repeat sections.

The signal to noise ratio was calculated to investigate the possibility of evaluating the different types of logs by making a comparison with the coherence and the calculated power spectra.

The power spectra of the signal and the noise were calculated to provide one additional parameter to evaluate the repeat section. In theory the power spectra of the signal and the noise of the repeat section should be equal to their respective spectra for the principal sections.

The data used in this work were provided by PETROBRAS and originated in four holes of the Potiguar Basin. These are referred to as Holes A, B, C, and D.

The evaluation of the repeatability between different types of logs indicates that, for Hole A, the microspherical log (MSFL) has better repeatability than the porosity log (CNL), and that this repeats better than the gamma ray log (GR).

For the logs run in Hole D, a decrease in the speed at which the logs are run, from 550 m/hr to 275 m/hr, is advantageous only for the neutron porosity log. The velocity of 920 m/hr used in Hole C is totally inadequate for the resistivity logs (MSFL, ILD, and ILM).

A decrease in the sampling interval from 0.2m to 0.0508m, for the gamma ray and neutron porosity logs, and to 0.0254m for the density log, gives good results when applied to Hole D.

The calculation of vertical resolution indicates, that the neutron porosity is of superior quality when compared with the natural gamma ray in Hole A. In hole C the microspherical log (MSFL) has a vertical resolution of the same order as the natural gamma ray log (GR) in Hole B. This confirms the inappropriate speed for the logs acquired in Hole C. For Hole D, the calculation of vertical resolution indicates a superior quality for the high resolution density log when compared with the high resolution gamma ray log.

The comparison between Holes A, B and D, uses the respective neutron porosity logs, confirming that the presence of noise, in general, is directly linked with the porosity of the formation - a higher porosity indicates more noise and consequently, a lower quality log is obtained.

Analysis of phase spectra of each log indicates a depth shift exists between the principal and repeat sections for all the logs of Hole C. This could be confirmed through superposition of the sections.

1 - INTRODUÇÃO

A análise de séries temporais tem sido tradicionalmente aplicada em ramos de estudo que vão da engenharia à geofísica, passando pela oceanografia e pela meteorologia. Nesta última, a aplicação é feita no estudo dos registros dos ventos; na oceanografia, a aplicação recai no estudo principalmente das correntes marinhas; e na engenharia, sua maior utilização é feita no estudo de sistemas de potência e sinais de telecomunicações (engenharia eletroeletrônica). Na geofísica, a análise de séries temporais vem sendo amplamente aplicada no estudo de problemas ligados à sísmica ou, mais especificamente, na análise e processamento de dados sísmicos.

No entanto, trabalhos recentes trazem a aplicação deste tipo de análise num outro ramo do estudo geofísico: a perfilagem de poço. Para que esta aplicação fosse possível, foi feita uma modificação quanto aos domínios utilizados, ou seja, enquanto que as aplicações tradicionais da análise de séries temporais, como a própria definição já o diz, utilizam os domínios do tempo e da frequência temporal, as aplicações ligadas à perfilagem utilizam os domínios do espaço e da frequência espacial. Esta modificação se fez necessária em vista do parâmetro do poço considerado independente ser a profundidade. As alterações que o poço venha a sofrer durante o transcorrer da coleta dos dados, em relação ao tempo, são hipoteticamente consideradas como desprezíveis quando comparadas com as alterações sofridas com relação à mudança de profundidade, mesmo que se saiba que isto não corresponde à realidade - sobretudo com respeito à condutividade na zona invadida.

Em perfilagem de poço, a análise de séries temporais representa um grande avanço, sobretudo porque fornece subsídios até então inexistentes para a avaliação da repetição e cálculo da resolução vertical dos perfis. Além disso, viabiliza a avaliação da utilização de diferentes intervalos de amostragem, de diferentes velocidades de perfilagem e a comparação entre poços e perfis de uma mesma companhia ou de companhias petrolíferas e/ou de perfilagem diferentes.

Com respeito à utilização de intervalos de amostragem e velocidades de perfilagem diferentes, a contribuição é realmente expressiva, já que, se anteriormente a análise era feita subjetivamente, atualmente se tem um parâmetro concreto para realizar tal estudo. Como intervalo de amostragem e velocidade de perfilagem menores implicam num aumento do volume de dados a ser processado e num maior tempo de utilização da sonda, torna-se então

imprescindível ter-se à disposição um parâmetro que realmente avalie, e porque não dizer, justifique, os resultados obtidos às custas do decorrente aumento no custo operacional.

Outro fator igualmente importante é a avaliação da repetição dos perfis, uma vez que a obtenção da seção repetida representa um custo adicional e o estudo dos dados obtidos através de um parâmetro concreto serve como alicerce para validar (ou invalidar) a obtenção desta seção.

Já o cálculo da resolução vertical é de suma importância quando o poço atravessa camadas finas. Este cálculo fornece a espessura mínima que uma camada deve ter para que seja detectada visualmente no perfil, levando-se em consideração fatores ligados intrinsecamente ao processo de obtenção dos dados, como velocidade da ferramenta e degradação causada por ruídos, por exemplo. Em outras palavras, o cálculo independe do conhecimento de fatores extrínsecos ao processo de obtenção dos dados, tais como as características da sonda.

A comparação entre poços de uma mesma companhia ou de companhias petrolíferas diferentes torna-se importante quando se tem perfis de poços que são aproximadamente semelhantes e cujo grau de semelhança deseja-se medir, o que é possível com a aplicação da análise de séries temporais.

Por sua vez, a comparação entre perfis de uma mesma companhia ou de companhias de perfilagem diferentes possibilita à companhia petrolífera obter um melhor direcionamento para o seu investimento. Isto, porque nem sempre o melhor resultado é dado pela técnica de custo mais elevado.

Além das contribuições mencionadas, esta técnica de análise está também sendo utilizada para otimizar o desenho de filtros, aprimorar a aquisição de parâmetros do poço e determinar os contatos geológicos caracterizados pelos diversos estratos transpassados pelos poços verticais, ou seja, com fins estratigráficos.

Entrementes, tendo em vista ser este um campo de aplicação recente, os trabalhos existentes formam um universo deveras pequeno se comparado com os da engenharia e da sísmica, por exemplo. DOVETON (1986) apresenta a aplicação de análise de séries temporais na determinação dos contatos geológicos existentes no calcário Viola, ao sul do Kansas (EUA). MATHIS & GEARHART (1989) utilizaram este tipo de análise para o cálculo da resolução vertical de perfis fotoelétricos (Pe) e de densidade (SLDT). GEORGI (1989) utilizou-a para a determinação da resolução vertical e quantificação da repetição de perfis de espectroscopia de raios gama induzidos ("Induced Gamma Ray Spectroscopy" - IGRS). KERFORD & GEORGI (1990) apresentaram-na direcionada à avaliação da repetição de perfis e da utilização de

intervalos de amostragem e velocidades de perfilagem diferentes. ANDRADE (1992) direcionou seu trabalho no sentido de identificar as interfaces entre camadas com propriedades petrofísicas contrastantes, por meio do processo de deconvolução de perfis.

Dentre as diversas aplicações citadas, selecionou-se com objetivos deste trabalho a avaliação da repetição de perfis de resistividade, de porosidade neutrônica e de raios gama, a avaliação da utilização de velocidades de perfilagem e intervalos de amostragem diferentes, o cálculo da resolução vertical de perfis radioativos, a comparação entre três poços da PETROBÁS e entre os sinais e os ruídos das seções principal e repetida do perfil de raios gama de um destes três poços. Para isso, no Capítulo 2 detalha-se o embasamento teórico da metodologia proposta; no Capítulo 3 apresentam-se os princípios de obtenção dos perfis utilizados neste estudo; no Capítulo 4 faz-se uma análise dos dados utilizados; no Capítulo 5 analisam-se os resultados obtidos; e, finalmente, no Capítulo 6 expõem-se as conclusões a respeito da aplicação de análise de séries temporais de um modo geral e com relação aos resultados obtidos.

2 - METODOLOGIA

A metodologia a ser utilizada é composta das seguintes partes: pré-processamento, aplicação da janela Hanning, cálculo da coerência e do espectro de fase, determinação dos níveis de confiança de 50%, 90% e 95% para a coerência, cálculo da razão sinal-ruído e dos espectros de potência do sinal e do ruído. O pré-processamento está dividido em: retirada do valor médio e do alinhamento¹(DUARTE, 1988) polinomial algébrico, aplicação do ponderador² cossenoidal e do branqueamento preliminar³.

2.1 ALGUNS FUNDAMENTOS NECESSÁRIOS

2.1.1 A Transformada de Fourier⁴

Calcular a transformada de uma determinada função é uma maneira de representá-la em outro domínio. Costuma-se definir como transformada direta, ou simplesmente transformada, a passagem da função do domínio do espaço para o domínio da frequência espacial (ou número de onda). O processo inverso, ou seja, a passagem da função do domínio da frequência espacial para o domínio do espaço, é denominado de transformada inversa.

Existem na literatura geofísica vários tipos de transformadas, sendo uma das mais utilizadas a transformada de Fourier (BRIGHAM, 1974), a qual tem como premissa fundamental o fato da função original e sua transformada serem periódicas em seus respectivos domínios.

Desse modo, tendo-se uma função $g(z)$ no domínio do espaço, absolutamente integrável, e que atenda às condições de Dirichlet (BUTKOV, 1988), a sua transformada de Fourier contínua, $G(f)$, é definida no domínio da frequência espacial por

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(z)e^{-j2\pi fz} dz, \quad j = \sqrt{-1}, \quad (2.1)$$

¹Termo correspondente a "trend", segundo a referência indicada.

²Termo correspondente a "taper", idem.

³Termo correspondente a "prewhitening", idem.

⁴Barão Jean-Batiste-Joseph Fourier (21 de março de 1768 - 16 de maio de 1830).

cuja transformada de Fourier contínua inversa, $g(z)$, é definida por

$$g(z) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi f z} df. \quad (2.2)$$

Agora, considerando-se que se precise trabalhar com uma função $g(k\Delta z)$, $k = 0, \dots, N-1$, consistindo de valores pontuais e equidistantes, por isso denominada de função discretizada, a sua transformada deve ser calculada por intermédio da versão discretizada da equação (2.1). Para isto adotamos as seguintes modificações

$$z \Rightarrow k\Delta z, \quad dz \Rightarrow \Delta z, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \Rightarrow \sum_{k=0}^{N-1}, \quad \sum_{n=0}^{N-1},$$

$$f \Rightarrow n\Delta f, \quad df \Rightarrow \Delta f, \quad \Delta f = \frac{1}{N\Delta z},$$

o que resulta em

$$f \times z = \frac{k \times n}{N}, \quad (2.3)$$

obtendo-se para a transformada discreta direta

$$G\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = \Delta z \sum_{k=0}^{N-1} g(k\Delta z) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.4)$$

e para a transformada discreta inversa

$$g(k\Delta z) = \frac{1}{N\Delta z} \sum_{n=0}^{N-1} G\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) e^{j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (2.5)$$

Como Δz significa apenas um fator de escala nas duas equações acima, ao se fazer $\Delta z = 1$ nos membros da esquerda, obtém-se para o par de transformadas

$$G\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} g(k\Delta z) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.6)$$

$$g(k\Delta z) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} G\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) e^{j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (2.7)$$

2.1.1.1 Freqüência Nyquist

O Teorema da Amostragem (BRIGHAM, 1974) indica que se $g(k\Delta z)$ é a versão discretizada da função contínua $g(z)$, esta última função é inteiramente obtida da sua transformada se esta for nula para frequências maiores do que uma frequência f_N , denominada de frequência Nyquist⁵ (CHATFIELD, 1980). O valor desta frequência é dado por

$$f_N = \frac{1}{2\Delta z}, \quad (2.8)$$

já que a condição necessária para que não ocorra “aliasing” (BRACEWELL, 1986; WEAVER, 1989) é que a maior frequência presente na transformada de uma função seja menor ou igual à metade do inverso do seu intervalo de amostragem.

2.1.1.2 Subrotina de DFFT

O cálculo computacional da transformada de Fourier discreta pode ser executado por intermédio da utilização da subrotina de DFFT (“Discrete Fast Fourier Transform”) contida em BRIGHAM (op. cit.), a qual fornece a parte referente às frequências negativas com um deslocamento (“shift”) equivalente a N pontos para a direita do eixo original, e exige que a quantidade de amostras (N) seja igual a uma das potência de dois (2, 4, 8,..., 2048, etc). Por causa deste deslocamento, a frequência Nyquist assume o valor

$$f_N = \frac{N}{2}. \quad (2.9)$$

2.1.2 Filtro Derivada

Para se demonstrar que a derivada no domínio do espaço corresponde a uma filtragem passa-alta no domínio da frequência, utiliza-se aqui a demonstração de HSU (1973). Supondo que $g(z)$ seja a função original, no domínio do espaço, derivável e com

$$\lim_{|z| \rightarrow \infty} g(z) = 0, \quad (2.10)$$

então, calculando-se a transformada de Fourier contínua, $G^0(f)$, para a sua derivada, $g'(z)$, tem-se

$$G^0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g'(z) e^{-j2\pi f z} dz. \quad (2.11)$$

⁵Harry Nyquist (1889-1976)

Aplicando-se o método de integração por partes (LEITHOLD, 1986), encontra-se

$$G^0(f) = j2\pi f \int_{-\infty}^{\infty} g(z) e^{-j2\pi f z} dz. \quad (2.12)$$

Este resultado, quando comparado com a equação (2.1), implica em

$$G^0(f) = j2\pi f G(f), \quad (2.13)$$

onde o fator $j2\pi f$ é, por definição, o filtro resultante, no domínio da frequência, da derivação efetuada no domínio do espaço e, conforme pode ser constatado, tem amplitude diretamente proporcional à frequência e a sua fase é constante e defasada de 90° , características correspondentes a um filtro passa-alta e que servem para encerrar a demonstração.

2.1.3 Espectro de Potência

O espectro de potência $P(f)$ de uma função $g(z)$ é definido como sendo a transformada de Fourier de sua autocorrelação. Existem dois métodos de cálculo do espectro de potência baseados nesta definição (OTNES & ENOCHSON, 1972): o método padrão, em que primeiro se calcula a autocorrelação e depois a sua transformada; e o método da transformada de Fourier direta, que utiliza o Teorema da Correlação (BRIGHAM, 1974)⁶. Este Teorema indica que a autocorrelação de uma função $g(z)$ no domínio do espaço equivale ao produto entre a transformada de Fourier da função, $G(f)$, e o seu complexo conjugado, $G^*(f)$, no domínio da frequência.

Se se tem uma função discreta x_i , $i = 0, \dots, N-1$, amostrada em intervalo constante Δz , a sua transformada de Fourier e o respectivo complexo conjugado definidos por X_n e X_n^* , $n = 0, \dots, N-1$, o seu espectro de potência P_n é obtido por

$$P_n = \frac{2\Delta z}{N} |X_n|^2, \quad n = 0, \dots, \frac{N+1}{2}, \quad (2.14)$$

onde $|X_n|^2 = X_n X_n^*$.

Para uma função x_i sem o valor médio, a sua autocorrelação é uma estimativa da sua autocovariância (OPPENHEIM & SHAFER, 1975). Logo, a transformada de Fourier inversa do espectro de potência pode ser utilizada como uma estimativa da autocovariância de x_i .

⁶Ver na página 128 da referência indicada.

2.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

2.2.1 Retirada da Média

Conforme indicado por HAMMING (1977), torna-se adequada a retirada da média dos dados para fins do cálculo do espectro de potência, uma vez que, segundo BRILLINGER & KRISHNAIAH (1990), se as estimativas espectrais forem obtidas diretamente dos dados brutos, o efeito de uma média μ , não nula, manifestar-se-á somente na frequência zero. Em séries infinitas, este efeito produzirá distorção em outras frequências. Assim, com o intuito de contornar este efeito possível sobre a frequência zero e para que a média possa ser considerada zero (BLAIS, 1988), o valor médio $\bar{g}$, utilizado como uma aproximação para μ , é estimado de acordo com a seguinte equação

$$\bar{g} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_i, \quad (2.15)$$

sendo retirado do perfil bruto, g_i , segundo a equação

$$g_{mi} = g_i - \bar{g}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (2.16)$$

De posse das seções principal e repetida (Figura 2.1), x_i e y_i , $i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, através da aplicação das equações acima, obtém-se para a retirada da média da seção principal,

$$x_{mi} = x_i - \bar{x}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (2.17)$$

e para a retirada da média da seção repetida,

$$y_{mi} = y_i - \bar{y}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (2.18)$$

A Figura 2.2 apresenta a seção principal do perfil de raios gama do poço A, sem a respectiva média.

2.2.2 Retirada do Alinhamento

De acordo com BRILLINGER & KRISHNAIAH (op. cit), dois métodos de retirada do alinhamento de séries temporais têm-se mostrados efetivos. Um deles, a diferenciação, é advogado por vários outros autores para a retirada de certos alinhamentos determinísticos e estocásticos. No outro, alinhamentos cíclicos são frequentemente removidos por filtragem

linear a fim de se evitar dificuldades inerentes à análise espectral de séries com picos espectrais acentuados. Assim, a retirada de senóides e cossenóides é um processo similar à retirada do alinhamento pela passagem dos dados através de um filtro passa-baixa, o que torna o resíduo uma versão passa-alta dos dados. Em geral, esta filtragem é uma alternativa promissora para a retirada de alinhamentos paramétricos quando não dispomos da forma funcional do alinhamento embutido nos dados. Sua utilização apresenta uma vantagem adicional - o fato do espectro original poder ser recuperado mais facilmente. Agora, uma importante limitação dessa utilização, como veremos na subseção procedente, é a perda inevitável de alguns dados no início e no final da seqüência de dados originais.

Ao se associar o parágrafo acima com a indicação contida em BLAIS (1988) de que o alinhamento de um processo estocástico pode ser modelado como um polinômio algébrico ou trigonométrico e as incógnitas representadas pelos coeficientes deste polinômio podem ser estimadas pela técnica dos mínimos-quadrados, pode ser utilizada a técnica de modelamento polinomial algébrico apresentada por OTNES & ENOCHSON (1972). Esta técnica consiste basicamente de ajustar-se a função g_i por um polinômio algébrico, na forma a seguir,

$$\tilde{g}_i = \sum_{k=0}^K c_k (i\Delta z)^k. \quad (2.19)$$

Este ajuste inicia com a definição da função auxiliar $Q(c)$, isto é,

$$Q(c) = \sum_{i=0}^{N-1} \left[g_i - \sum_{k=0}^K c_k (i\Delta z)^k \right]^2. \quad (2.20)$$

Com a utilização da técnica padrão de minimização de funções estabelecida pelo cálculo diferencial, calcula-se a derivada de $Q(c)$ em relação a um parâmetro específico c_h . Após se igualar a zero e rearranjar os termos, obtém-se

$$\sum_{k=0}^K c_k \sum_{i=0}^{N-1} (i\Delta z)^{k+h} = \sum_{i=0}^{N-1} g_i (i\Delta z)^h, \quad h = 0, 1, 2, \dots, K. \quad (2.21)$$

Levando-se em conta a simbologia adotada para as seções principal e repetida, sem a média, o sistema de equações (2.21) assume a seguinte forma para a seção principal

$$\sum_{k=0}^K c_k \sum_{i=0}^{N-1} (i\Delta z)^{k+h} = \sum_{i=0}^{N-1} x_{mi} (i\Delta z)^h, \quad h = 0, 1, 2, \dots, K, \quad (2.22)$$

e para a seção repetida,

$$\sum_{k=0}^K c_k \sum_{i=0}^{N-1} (i\Delta z)^{k+h} = \sum_{i=0}^{N-1} y_{mi} (i\Delta z)^h, \quad h = 0, 1, 2, \dots, K. \quad (2.23)$$

Com os coeficientes c_k conhecidos, e o auxílio da equação (2.19), encontram-se as seguintes formulações para a retirada do alinhamento polinomial da seção principal

$$x_{ai} = x_{mi} - \tilde{x}_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (2.24)$$

e da seção repetida,

$$y_{ai} = y_{mi} - \tilde{y}_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (2.25)$$

Ainda segundo OTNES & ENOCHSON (1972) são raras as soluções do sistema linear definido pela equação (2.21) para o parâmetro K maior do que 3 ou 4. Por este motivo, o valor assumido por K atingiu no máximo 4, ou seja, admitiu-se que os dados utilizados embutissem, quando isto ocorresse, um polinômio algébrico de no máximo quarto grau, o que resulta numa matriz sensibilidade de no máximo cinco linhas e seis colunas. E na resolução dessa matriz foi utilizado o método iterativo de Gauss-Seidel, cuja subrotina foi retirada de CRESCÊNCIO NETO (1979). A fim de eliminar qualquer dúvida a respeito da convergência do método e tendo em vista a necessidade da utilização de dupla precisão para os somatórios (OTNES & ENOCHSON, op. cit), a subrotina foi utilizada com cem mil iterações.

A Figura 2.3 mostra a superposição da seção principal do perfil micro-esférico (MSFL) do poço A, sem a média, e os polinômios de graus 1 (2.3a), 2 (2.3b), 3 (2.3c) e 4 (2.4d). Esta superposição, também feita para os demais perfis analisados, torna-se de suma importância na identificação do tipo de alinhamento contido por alguns dos perfis utilizados, uma vez que, nestes casos, é praticamente impossível a determinação do tipo exato de alinhamento presente, através da simples análise visual do perfil sem a média. Isto ocorre porque, às vezes, a presença do alinhamento é quase imperceptível, mesmo com a superposição, o que torna a definição da forma do alinhamento, nestes casos específicos, muito subjetiva.

É importante ressaltar que, caracterizado o tipo de alinhamento embutido por cada uma das seções dos perfis, foi efetuada a retirada do mesmo de acordo com as equações (2.24) e (2.25).

A Figura 2.4 ilustra a seção principal do perfil de raios gama do poço A, sem o alinhamento polinomial do primeiro grau (reta), o qual foi definido por intermédio da análise da mencionada superposição.

2.2.3 Aplicação do Ponderador Cossenoidal

A aplicação de um ponderador é simplesmente a aplicação de determinados pesos às amostras, com a finalidade de reduzir a distorção sofrida pela estimativa espectral. Com

pesos unitários, a situação é análoga a usarmos uma janela de Daniell (BLAIS, 1988), que resulta num “kernel” de Fejer (BRILLINGER & KRISHNAIAH, 1990), com lóbulos laterais significantes em relação à função espectral. Isto está demonstrado em PRIESTLEY (1981). Com as amostras apropriadamente ponderadas, o efeito destes lóbulos pode ser minimizado (BLAIS, op. cit.; BRILLINGER & KRISHNAIAH, op. cit.).

Nesta mesma linha de raciocínio, tem-se que a distorção da estimativa espectral obtida de uma série espacial bruta e de comprimento finito pode ser vista, segundo OTNES & ENOCHSON (1972) e HAMMING (1977), como sendo decorrente do produto, no domínio do espaço, entre uma função retangular (“box car”) e uma série espacial e de comprimento infinito (Figura 2.5a). Em razão da forma da função retangular apresentar descontinuidades nos dois extremos, ou seja, mudar bruscamente de 1 (um) para 0 (zero), esta distorção é composta pelos efeitos nocivos do fenômeno de Gibbs (BLINCHIKOFF & ZVEREV, 1976; PELED & LIU, 1976; HAMMING, op. cit.), no domínio do espaço, e dos lóbulos laterais (“leakage”), no domínio da frequência (BRIGHAM, 1974) (Figura 2.5b).

No sentido de minimizar estes efeitos, existe na bibliografia relativa ao estudo de análise espectral um número razoável de funções ponderadoras, estando a escolha da função ideal baseada nos objetivos que se queira atingir. Para a realização do presente trabalho, foram selecionadas inicialmente seis funções ponderadoras cossenoidais, retiradas de OTNES & ENOCHSON (op. cit.), BATH (1974), SCHWARTZ & SHAW (1975), PRIESTLEY (op. cit.), CHEN (1982) e BRILLINGER & KRISHNAIAH (op. cit.), cujos tamanhos dos lóbulos laterais, no domínio da frequência, foram analisados. Levando-se em consideração que quanto menores são os lóbulos laterais, maior é o poder de atenuação da função, e as palavras de BATH (op. cit.), isto é, “frequentemente é requerido que uma função ponderadora (ou janela de dados) seja adequadamente achatada na maior parte do sinal analisado (como uma janela retangular), porém, que existam ponderadores próximos aos seus dois extremos (como uma janela cossenoidal, por exemplo)”, optou-se por escolher aquele ponderador indicado por OTNES & ENOCHSON (op. cit.), que é expresso da seguinte forma

$$u_{\frac{T}{2}}^{(4)}(t) = \begin{cases} \cos^2(5\pi \frac{t}{T}), & -\frac{T}{2} \leq t \leq -\frac{4T}{10}, \\ 1, & -\frac{4T}{10} \leq t \leq \frac{4T}{10}, \\ \cos^2(5\pi \frac{t}{T}), & \frac{4T}{10} \leq t \leq \frac{T}{2}, \end{cases}$$

onde T é o comprimento ou duração do sinal analisado.

Como a profundidade z assume apenas valores positivos, a expressão acima pode ser reescrita da seguinte maneira,

$$u_{\frac{N-1}{2}}^{(4)}(k\Delta z) = \begin{cases} \cos^2[5\pi(\frac{k-\frac{N-1}{10}}{N-1})], & 0 \leq k \leq \frac{(N-1)}{10}, \\ 1, & \frac{(N-1)}{10} \leq k \leq \frac{9(N-1)}{10}, \\ \cos^2[5\pi(\frac{k+\frac{N-1}{10}}{N-1})], & \frac{9(N-1)}{10} \leq k \leq N-1. \end{cases}$$

A Figura 2.6a mostra a forma assumida pelo ponderador no domínio do espaço e a Figura 2.5b, no domínio da frequência espacial.

A ponderação dos perfis, sem o alinhamento polinomial, foi executada por meio do produto entre a expressão acima e, em acordo com a simbologia adotada para a seção principal, x_{ai} , e a seção repetida, y_{ai} . Logo, adotando-se a simbologia x_{pi} para a seção principal ponderada e y_{pi} para a seção repetida ponderada, a primeira é obtida por meio da expressão

$$x_{pi} = u_{\frac{N-1}{2}}^{(4)}(i\Delta z) \times x_{ai}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.26)$$

e a segunda,

$$y_{pi} = u_{\frac{N-1}{2}}^{(4)}(i\Delta z) \times y_{ai}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (2.27)$$

A Figura 2.7 mostra a seção principal do perfil de raios gama do poço A, sem o alinhamento polinomial e devidamente ponderada.

2.2.4 Aplicação do Branqueamento Preliminar

2.2.4.1 Transformadas de Fourier das Seções

O branqueamento preliminar das seções, como será visto adiante, corresponde à passagem de cada uma delas por um filtro passa-alta, realizada de duas maneiras distintas: se for escolhido o domínio do espaço, ela será obtida por intermédio da convolução entre a função correspondente ao filtro neste domínio e cada um dos perfis; se for escolhido o domínio da frequência, ela será obtida por meio do produto entre a transformada de cada um dos perfis e o módulo do filtro, já que esta operação equivale à convolução no domínio do espaço (PAPOULIS, 1962; HSU, 1973). Em razão da sua facilidade de execução, a segunda alternativa parece a mais adequada. Isto implica na necessidade de se calcular a transformada de cada uma das seções, o que foi feito com a utilização da subrotina de DFFT, já mencionada.

Como as seções representam funções reais, as transformadas das seções principal e repetida ponderadas, $X_p(\frac{n}{N\Delta z})$ e $Y_p(\frac{n}{N\Delta z})$, são complexas, com parte real par e parte imaginária ímpar,

$$X_p\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x_p(k\Delta z) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.28)$$

$$Y_p\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} y_p(k\Delta z) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (2.29)$$

A Figura 2.8 ilustra a transformada de Fourier discreta da seção principal do perfil de raios gama do poço A, após a ponderação.

2.2.4.2 Determinação do Filtro Passa-Alta Ideal

Os espectros mais difíceis de serem estimados são aqueles que contêm picos espectrais acentuados (PRIESTLEY, 1981). Picos acentuados tendem a complicar os procedimentos de estimativa espectral por implicarem numa faixa estreita para a resolução e, portanto, numa variância grande para esta estimativa (BLAIS, 1988). Supondo-se que a seqüência de dados observados tenha média zero, um filtro espectral pode ser desenhado para transformá-la noutra seqüência mais achatada (BLAIS, op. cit.; BRILLINGER & KRISHNAIAH, 1990) ou aproximadamente branca (PRIESTLEY, op. cit.).

Por outro lado, no sentido de reduzir o efeito decorrente dos lóbulos laterais no domínio da frequência, e com a atenuação das componentes espectrais de frequência baixa, antes do cálculo do espectro (BATH, 1974), é executado o branqueamento preliminar da seqüência de dados. Este branqueamento ajuda a melhorar a precisão das estimativas espectrais (BLAIS, op. cit.; PRIESTLEY, op. cit.) e representa a passagem da referida seqüência através de um filtro linear, nesse caso, um filtro passa-alta.

“A diferenciação de uma onda (ou seqüência de dados, processo, etc.) é equivalente a passá-la por um filtro cuja amplitude é diretamente proporcional à frequência e a fase é constante e defasada de 90°. Um efeito óbvio da diferenciação é o realce das frequências altas na onda; um outro efeito é a retirada de qualquer componente de frequência zero (d.c). Isto em si não tem efeito sobre ondas que já tenham valor médio zero, mas serve para retirar as distorções de qualquer onda observada que consistam de componentes alternantes superpostas às distorções de frequência zero” (EVENDEN et al., 1970).

Modelamentos de filtro passa-alta são encontrados em JENKINS & WATTS (1968), BATH (op. cit.) e SCHWARTZ & SHAW (1975) que, embora apresentando notações

analíticas diferentes, representam filtros semelhantes. Em razão de sua formulação ser a mais simples, decidiu-se inicialmente pela aplicação do modelo indicado por JENKINS & WATTS (1968), o qual não forneceu resultados satisfatórios, visto que as frequências baixas não foram adequadamente atenuadas. Resultado semelhante foi obtido com a aplicação do filtro derivada, forçando o modelamento de um novo filtro.

Levando-se em consideração a indicação contida em LEITE (1991) a respeito da existência de filtros exponenciais, o filtro modelado assume a seguinte forma no domínio da frequência

$$F(n) = \frac{n}{F(N-1)} \times e^{EX}, \quad 0 \leq n \leq N-1. \quad (2.30)$$

O parâmetro EX é dimensionado de acordo com a quantidade (N) de amostras componentes do espectro a ser filtrado e o tipo de perfil. Como a quantidade de amostras tem um mínimo de 194 e um máximo de 1852 amostras e a subrotina de DFFT exige que se deva trabalhar sempre aproximando a quantidade de amostras - acrescentando zeros após o última amostra - para a potência de dois imediatamente superior ao seu valor, surgiu a necessidade de se dimensionar EX para 256, 512, 1024 e 2048 amostras.

Quanto ao tipo de perfil, o fator que multiplica n foi dimensionado por tentativa e erro - após a escolha de um valor aleatório para o qual a coerência não apresentava descontinuidade (valor infinito) na frequência mínima, este valor era gradativamente aumentado até que a mencionada descontinuidade se fizesse presente, o que determinava como valor ideal para o filtro o valor imediatamente anterior (ou menor).

Assim, EX teve de assumir as formas alternativas indicadas na Tabela 2.1, em função da quantidade (N) de amostras e do tipo de perfil utilizados.

A Figura 2.9 mostra a forma assumida pelo filtro na filtragem da seção principal do perfil de raios gama do poço A, após a aplicação do ponderador.

2.2.4.3 Branqueamento Preliminar das Seções

Por reduzir-se a uma simples operação de multiplicação no domínio da frequência, entre o filtro e o espectro da seção a ser preliminarmente branqueada, o branqueamento preliminar dos perfis foi executado no domínio da frequência.

Tendo em vista que a subrotina de DFFT fornece a parte da transformada correspondente às frequências negativas deslocada, ou seja, situada à direita da parte correspondente às

freqüências positivas, a equação do módulo do filtro assume a seguinte forma

$$F\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = \begin{cases} \frac{n}{F\left(\frac{N/2-1}{N\Delta z}\right)} \times e^{EX}, & 0 \leq n \leq N/2 - 1, \\ F\left(\frac{N-1-n}{N\Delta z}\right), & N/2 \leq n \leq N - 1. \end{cases}$$

Logo, a seção principal preliminarmente branqueada, $X_b\left(\frac{n}{N\Delta z}\right)$, no domínio da freqüência é obtida por (Figura 2.10)

$$X_b\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = F\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) \times X_p\left(\frac{n}{N\Delta z}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (2.31)$$

e a seção repetida preliminarmente branqueada, $Y_b\left(\frac{n}{N\Delta z}\right)$, também no domínio da freqüência, é obtida por

$$Y_b\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = F\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) \times Y_p\left(\frac{n}{N\Delta z}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (2.32)$$

Tabela 2.1 - Forma Assumida pelo Expoente do Filtro Passa-Alta Modelado (EX), Segundo a Quantidade (N) de Amostras e o Tipo de Perfil Utilizados.

Perfil	Tipo	N	EX
Raios Gama	Normal (GR)	256	$0,1000 \times n$
		512	$0,0540 \times n$
	Alta Resolução (HGR05)	1024	$0,0270 \times n$
Porosidade	Neutrônica (NPHI)	256	$0,0900 \times n$
		512	$0,0500 \times n$
	Alta Resolução (HNPO05)	1024	$0,0250 \times n$
Densidade	Normal (RHOB)	256	$0,0700 \times n$
		512	$0,0350 \times n$
	Alta Resolução (HRHOB02)	2048	$0,0078 \times n$
Resistividade	MSFL, ILD, ILM	256	$0,0900 \times n$
	MSFL, ILD	512	$0,0430 \times n$

2.3 JANELA HANNING

Existe um compromisso entre a resolução da estimativa do espectro e a sua variância. Para que se obtenha uma diminuição na variância de um processo, tem-se que sacrificar a sua resolução. Dessa forma, deve-se decidir o quanto se deve ou quer sacrificar a resolução, por meio da suavização do espectro, a fim de que se tenha um limite de variância aceitável.

Levando-se em consideração que a janela Hanning fornece um limite aceitável de suavização da transformada de Fourier discreta para as finalidades deste trabalho, por intermédio da desejada diminuição da variância dos espectros por serem estimados, utiliza-se o suavizador definido pela equação a seguir, conforme indicado em BRIGHAM (1974) e OPPENHEIM & SHAFER (1975) (Figura 2.11),

$$w(k\Delta z) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi k}{N-1} \right) \right], \quad 0 \leq k \leq N-1. \quad (2.33)$$

O módulo da transformada de Fourier da equação acima é dado por

$$|W(f)| = \frac{1}{4} \left[\frac{2 \operatorname{sen}[\pi f(N-1)]}{\pi f} + \frac{\operatorname{sen}[\pi(f - \frac{1}{N-1})(N-1)]}{\pi(f - \frac{1}{N-1})} + \frac{\operatorname{sen}[\pi(f + \frac{1}{N-1})(N-1)]}{\pi(f + \frac{1}{N-1})} \right] \quad (2.34)$$

A equação acima representa a soma de três funções "sinc" ($\operatorname{sen}(x)/x$) deslocadas entre si, o que impõe o cancelamento recíproco dos lóbulos laterais das três funções ao se utilizar um intervalo de aplicação da janela, $N\Delta z$, grande. Quando este intervalo se torna muito pequeno, $W(f)$ torna-se independente de f , o que corresponde a uma resolução baixa e estabilidade estatística alta. Inversamente, um intervalo $N\Delta z$ grande conduz a uma resolução alta e estabilidade estatística baixa (BATH, 1974; CHEN, 1982).

De modo inverso ao branqueamento preliminar, a aplicação da janela Hanning pode ser feita de duas maneiras: a primeira, por meio do produto entre $w(z)$ e cada uma das seções; a segunda, por meio da convolução entre $W(f)$ e a transformadas de Fourier discreta de cada uma das seções. O produto a ser efetuado no domínio do espaço parece mais adequado em razão da sua simplicidade. Desse modo, para dar aos dados até agora manipulados um nível de variância aceitável, torna-se imperativo retorná-los ao domínio do espaço (Figura 2.12). Tal retorno é feito obtendo-se as transformadas de Fourier inversas das equações (2.31) e (2.32), representadas por $x_b(k\Delta z)$ e $y_b(k\Delta z)$, respectivamente,

$$x_b(k\Delta z) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_b \left(\frac{n}{N\Delta z} \right) e^{j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.35)$$

$$y_b(k\Delta z) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Y_b\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) e^{j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (2.36)$$

Com o suavizador e as seções num mesmo domínio, obtém-se a suavização da seção principal (Figura 2.13)

$$x_w(k\Delta z) = w(k\Delta z) \times x_b(k\Delta z), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.37)$$

e também a suavização da seção repetida,

$$y_w(k\Delta z) = w(k\Delta z) \times y_b(k\Delta z), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (2.38)$$

2.4 A FUNÇÃO COERÊNCIA

A função coerência tem como expressão para o cálculo do seu valor a raiz quadrada positiva da equação indicada a seguir (KERFORD & GEORGI, 1990)

$$C^2(f) = \frac{|\langle X(f)Y^*(f) \rangle|^2}{\langle X(f)X^*(f) \rangle \langle Y(f)Y^*(f) \rangle} \quad (2.39)$$

onde, enfatizamos que $f(\frac{n}{N\Delta z})$ é a frequência espacial, com $n = 0, \pm 1, \dots, \pm(\frac{N}{2} - 1)$; Δz é o intervalo de amostragem e N é a quantidade de amostras. $X(f)$ e $Y(f)$ representam as transformadas das seções principal e repetida, previamente processadas, e $X^*(f)$ e $Y^*(f)$ representam as respectivas funções discretas conjugadas. O sinal " $\langle \rangle$ " representa o valor médio das funções nele contidas (MARQUES, 1992), que, em razão da quantidade (N) de amostras não ultrapassar 2048, teve a sua utilização dispensada no presente trabalho.

Partindo-se do princípio de que as seções a serem utilizadas no cálculo da coerência são aquelas oriundas da aplicação da janela Hanning, isto é, $x_w(k\Delta z)$ e $y_w(k\Delta z)$, então, considerando-se a equação (2.6), tem-se a seguinte formulação para suas transformadas,

$$X_w\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x_w(k\Delta z) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.40)$$

$$Y_w\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} y_w(k\Delta z) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.41)$$

e para as respectivas funções discretas conjugadas das transformadas acima,

$$X_w^*\left(\frac{n}{N\Delta z}\right) = \left[\sum_{k=0}^{N-1} x_w(k\Delta z) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \right]^*, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.42)$$

$$Y_w^* \left(\frac{n}{N\Delta z} \right) = \left[\sum_{k=0}^{N-1} y_w(k\Delta z) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \right]^*, \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2.43)$$

Logo, de acordo com as definições acima e levando-se em consideração o Teorema da Correlação Discreta (BRIGHAM, 1974), os produtos $X_w(\frac{n}{N\Delta z})Y_w^*(\frac{n}{N\Delta z})$, $X_w(\frac{n}{N\Delta z})X_w^*(\frac{n}{N\Delta z})$ e $Y_w(\frac{n}{N\Delta z})Y_w^*(\frac{n}{N\Delta z})$ representam a correlação cruzada complexa entre $y_w(k\Delta z)$ e $x_w(k\Delta z)$ e as autocorrelações de $x_w(k\Delta z)$ e $y_w(k\Delta z)$, nesta ordem e no domínio da frequência. Em decorrência disto, a equação (2.39) representa a medida do grau de similaridade entre as seções principal e repetida. À medida que as seções se tornam similares, o valor da coerência aproxima-se de um; caso contrário, ou seja, quanto mais as duas seções se tornam díspares, mais o valor da coerência se aproxima de zero (Figura 2.14).

2.5 ESPECTRO DE FASE

A correlação cruzada complexa pode ser definida, de acordo com KERFORD & GEORGI (1990), pela seguinte equação

$$X(f)Y^*(f) = CO(f) + jQ(f) \quad (2.44)$$

Logo, o espectro de fase $\Phi(f)$ pode ser calculado por meio dos parâmetros $CO(f)$ e $Q(f)$, conforme indica a equação

$$\Phi(f) = \arctan \left[\frac{Q(f)}{CO(f)} \right] \quad (2.45)$$

O comportamento de $\Phi(f)$ nos fornece subsídios complementares sobre as seções em análise. Para seções idênticas e na mesma profundidade, o seu valor é 0° ; para seções muito diferentes e na mesma profundidade, o seu valor oscila alternadamente em torno de zero; para seções idênticas e profundidades relativas diferentes, o valor do seu módulo aumenta linearmente com a frequência (Figura 2.15).

2.6 INTERVALO DE CONFIANÇA

2.6.1 Cálculo do Valor Médio Teórico da Coerência

Segundo Bendat & Piersol⁷ apud KERFORD & GEORGI (op. cit.), o valor médio teórico da coerência entre duas seções estatisticamente independentes entre si é obtido por meio da

⁷Bendat, J. S., & Piersol, A. G., 1971. *Random data: analysis and measurement procedures*. New York, John Wiley & Sons 406p.

seguinte equação

$$E(C(f)) = \tanh \left[\frac{1}{(\lambda - 2)} \right], \quad (2.46)$$

onde o valor do parâmetro λ é estimado da seguinte forma:

$$\lambda \simeq 2 \times \text{componentes espectrais suavizadas} \times \text{partes componentes do espectro} \quad (2.47)$$

Visto que no presente trabalho não é necessário seccionar o espectro, conforme indicado anteriormente, tem-se dispensada a aplicação da técnica da média das amostras ("ensemble averaging technique"). Assim, o fator assume a expressão

$$\lambda \simeq 2 \times N \times 1, \quad (2.48)$$

já que N representa o número de componentes espectrais suavizadas e trabalha-se com um espectro único, sem seccionamento.

2.6.2 Determinação dos Intervalos de Confiança

Para a determinação dos intervalos de confiança da coerência ou de qualquer um outro parâmetro, necessita-se do conhecimento prévio da forma da distribuição que a coerência ou o parâmetro assume.

Entretanto, a indicação de que a coerência assume um determinado tipo de distribuição só pode ser efetuada para uma coerência cujo valor esteja situado no intervalo $[0; 0,5]$. Neste intervalo, e apenas nele, a coerência apresenta-se normalmente distribuída, o que torna válida a utilização da equação (2.46) para o cálculo dos níveis de confiança que aí se situem, Carl Michael O'Brien (informação verbal⁸).

Então, para a determinação dos intervalos de confiança, deve-se supor inicialmente que eles estejam situados no intervalo $[0; 0,5]$, o que possibilita a adoção da distribuição normal, para efeito de cálculo. Caso algum desses níveis de confiança calculados extrapole o intervalo limite, deve ser considerado como estatisticamente inconsistente, uma vez que este resultado não coaduna com a hipótese inicial.

Por outro lado, como poderá ser visto mais adiante, é necessário que pelo menos o nível de confiança de 50% seja estatisticamente consistente, pois, dele depende o cálculo da resolução

⁸Baseada em Granger, C. W. J. & Hughes, A. O., 1968. *Spectral analysis of short series - a simulation study*. J. R. Statistic Society A, 131:83-99.

vertical do perfil. Os níveis de confiança de 90% e 95% têm apenas papel informativo, ou seja, servem principalmente para dar uma idéia aproximada daqueles níveis, não implicando, portanto, numa consistência estatística igual àquela exigida para o nível de confiança de 50%.

Sob este aspecto, mesmo que um dos outros dois níveis de confiança ocorra fora do intervalo desejado, isto não os invalida, seja considerando-se o parágrafo anterior, seja considerando-se as principais razões contidas em GREEN & MARGERISON (1978). Razões estas que induzem a considerar a distribuição do valor médio teórico da coerência como sendo uma distribuição normal - qualquer que seja o tipo de distribuição que este valor assuma - no intervalo acima de 0,5, de acordo com os parágrafos a seguir:

i) “a distribuição normal, na prática, torna-se apropriada (no mínimo como uma boa aproximação em relação à distribuição verdadeira) para muitos tipos de medidas físicas e outros tipos de dados”;

ii) “a distribuição normal e várias outras distribuições dela originadas ou a ela, de alguma maneira, relacionadas, têm sido inteiramente estudadas e tabuladas, sendo muito conveniente, quando os dados podem ser supostos normais, o uso da teoria e tabelas existentes”;

iii) “muitas técnicas estatísticas baseadas na distribuição normal são estatisticamente robustas, isto é, permanecem aproximadamente corretas para desvios razoáveis da normalidade. Assim, para muitos propósitos, pequeno erro é cometido ao se supor a normalidade, desde que o desvio em relação à normalidade não seja demasiadamente grande”;

iv) “por causa do Teorema do Limite Central e teoremas relacionados, uma grande maioria dos dados usados em inferência estatística é aproximadamente distribuída de maneira normal para amostras com tamanho grande, seja qual for a distribuição original dos dados”, desde que esta distribuição admita uma média.

Segundo ainda GREEN & MARGERISON (op. cit), o Teorema do Limite Central estabelece que, se $X_1, X_2, \dots, X_n$ são identicamente distribuídos com média μ e variância σ^2 finitas, então a distribuição de $\sum X_i$ tende a ser normal como $N(n\mu, n\sigma^2)$, quando n tende para o infinito; ou, equivalentemente, a distribuição de $\bar{X}$ tende a ser normal como $N(\mu, \sigma^2/n)$, com n tendendo ao infinito.

No que se refere ao tamanho do número de amostras a ser considerado como grande, os citados autores admitem como regra geral, na estimativa do intervalo de confiança para a média de uma distribuição qualquer, com variância conhecida e o número de amostras n grande, que um número mínimo de 50 amostras pode ser considerado como um número grande⁹.

⁹Ver na página 97 da referência indicada.

Seguindo este mesmo raciocínio, OTNES & ENOCHSON (1972) utilizam os parágrafos ii) e iv) acima, o último associado ao fato de que “dados filtrados tendem a ser normalmente distribuídos”¹⁰, para justificar a hipótese de normalidade feita, mesmo sendo o resultado final obtido totalmente incoerente com a realidade (a existência de uma pequena probabilidade estatística de que seja possível ocorrer uma medida de comprimento negativa)¹¹.

Levando-se em conta toda esta gama de justificativas para a validade dos níveis de confiança a serem calculados, utiliza-se, para a obtenção destes, a metodologia contida em JENKINS & WATTS (1968). De acordo com estes autores, o parâmetro $\overline{C}_{12}(f)$, obtido por meio da mudança de escala indicada a seguir

$$\overline{C}_{12}(f) = \operatorname{arctanh}[|\overline{\kappa}_{12}(f)|], \quad (2.49)$$

onde $\overline{\kappa}_{12}(f)$ é a coerência suavizada e tem variância independente da frequência e dada por

$$\operatorname{Var}[\overline{C}_{12}(f)] \approx \frac{I}{2T}. \quad (2.50)$$

Em vista desta mencionada independência com relação à frequência, o intervalo de confiança pode ser representado por um intervalo constante, na escala adotada.

Dessa forma, o intervalo de confiança de $100(1-\alpha)\%$ para $\overline{C}_{12}(f)$ resulta em

$$\overline{C}_{12}(f) \pm \eta(1 - \frac{\alpha}{2})\sqrt{\frac{I}{2T}}, \quad (2.51)$$

onde $\eta(1 - \frac{\alpha}{2})$ é o valor da distribuição normal, tendo sido retirado da tabela contida em DUDEVICZ & MISHRA (1988) em função do fator situado entre os parênteses. T representa o comprimento da seção do perfil. Conforme será visto posteriormente, o conhecimento do seu valor tornou-se dispensável. E I é, segundo o Teorema de Paserval (HSU, 1973), a potência relativa ao suavizador utilizado e é obtido analiticamente por

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} w^2(t)dt. \quad (2.52)$$

Levando-se em consideração que a janela foi aplicada sobre o espectro total, de acordo com a equação (2.33), ao se substituir a expressão contínua de janela Hanning na equação acima, adotando como limite inferior do seu intervalo de aplicação o valor 0 (zero), e limite superior T , chega-se ao seguinte resultado

$$I = \frac{3T}{8}. \quad (2.53)$$

¹⁰Ver na página 8 da referência indicada.

¹¹Ver Exemplo 3, na página 7 da referência indicada.

De acordo com JENKINS & WATTS (1968), tem-se a seguinte definição para o grau de liberdade do suavizador (ν)

$$\nu = \frac{2T}{I}. \quad (2.54)$$

Levando-se o valor fornecido pela equação (2.53) na equação (2.54), por se tratar de um número inteiro, obtém-se $\nu = 5$.

Relembrando que na subseção anterior trabalhou-se com o valor médio teórico da coerência suavizada, então, fazendo-se $\bar{\kappa}_{12}(f) = E(C(f))$, o intervalo de confiança resultante torna-se totalmente independente da frequência e assume, na escala indicada pela equação (2.49), a seguinte forma

$$\frac{1}{\lambda - 2} \pm \frac{\eta(1 - \frac{\alpha}{2})}{\sqrt{5}}. \quad (2.55)$$

Por se trabalhar apenas com valores positivos, a utilização do intervalo indicado pela equação (2.55) foi feita tomando-se apenas os valores relativos ao sinal positivo, com posterior retorno à escala original, na qual, conforme visto anteriormente, a coerência também independe da frequência.

Assim sendo, como o intervalos de confiança de 50% para o valor médio teórico da coerência atingiu no máximo 0,2968540 (Tabela 2.2), para 256 amostras, e este valor é menor do que 0,5, tem-se confirmada a consistência estatística necessária para a determinação das resoluções verticais dos perfis.

Os demais intervalos de confiança (90% e 95%), embora não tendo ocorrido situação idêntica e pelos motivos já expostos, não deixam de ser válidos.

Tabela 2.2 - Valores Assumidos pelo Nível de Confiança de Acordo com a Quantidade (N) de Amostras Utilizadas.

N	Nível de 50%	Nível de 90%	Nível de 95%
256	0,2968540	0,6263525	0,7056668
512	0,2959580	0,6257552	0,7051733
1024	0,2955111	0,6254571	0,7049270
2048	0,2952879	0,6253082	0,7048040

2.7 FREQUÊNCIA PARA UM NÍVEL DE CONFIANÇA DE 50%

A frequência máxima para um nível de confiança de 50% da coerência é definida como o valor assumido pela frequência no ponto de interceptação da curva da coerência com a reta que define o nível de confiança de 50% do valor médio teórico da coerência entre duas seções estatisticamente independentes, e a partir do qual o valor da coerência fica abaixo ou oscila em torno desta reta (Figura 2.16).

Como dificilmente um valor da coerência coincidirá exatamente com a reta definidora do nível de confiança de 50%, e tendo em vista que os valores da coerência imediatamente acima e abaixo daquele nível definem uma reta, então, o valor correspondente à frequência relativa ao ponto de interceptação de ambas as retas pode ser obtido por meio do triângulo retângulo de vértices A , B e C e do triângulo retângulo de vértices A , b e d (Figura 2.17).

A geometria elementar indica que

$$\frac{\overline{db}}{\overline{CB}} = \frac{\overline{bA}}{\overline{BA}}. \quad (2.56)$$

O segmento $\overline{AC}$ é definido pela curva da coerência, com o vértice A sendo representado pelo ponto (frequência, coerência) imediatamente acima e o vértice C sendo representado pelo ponto imediatamente abaixo do nível de confiança de 50%. O segmento $\overline{db}$ representa um valor constante para a coerência. Então, levando-se ainda em conta o perpendicularismo existente entre os segmentos de reta $\overline{AB}$ e $\overline{CB}$, pode-se determinar o comprimento do segmento $\overline{db}$, o qual, ao ser subtraído da frequência correspondente ao vértice A , que é a mesma dos vértices b (triângulo menor) e B (triângulo maior), fornece a frequência correspondente ao vértice d (triângulo menor). Esta frequência é relativa ao nível de confiança de 50% para o valor médio teórico da função coerência e, portanto, imprescindível.

Para ilustrar o cálculo da frequência máxima correspondente ao nível de confiança de 50%, apresenta-se a seguir, com o auxílio da Figura 2.17, o cálculo da frequência máxima relativa ao perfil de raios gama do poço A, efetuado com 512 amostras. De acordo com a simbologia indicada naquela Figura, os vértices dos dois triângulos retângulos, cujos valores são previamente conhecidos, assumem os seguintes valores em função da frequência e da coerência

$$A = (2,0507812; 0,3509797),$$

$$B = (2,0507812; 0,2698383),$$

$$C = (2,0410156; 0,2698383),$$

$$e \quad b = (2,0507812; 0,2959580).$$

Para os parâmetros acima, temos que

$$\overline{BA} = A - B = 0,0811414,$$

$$\overline{CB} = B - C = 0,0097656,$$

$$e \quad \overline{bA} = A - b = 0,0550217.$$

Como foi visto anteriormente, o segmento de reta $\overline{db}$ é dado por

$$\overline{db} = (\overline{bA}/\overline{BA}) \times \overline{CB} \implies \overline{db} = 0,066220.$$

Como

$$d = b - \overline{db} \implies d = 2,0441592.$$

Logo, a frequência máxima para um nível de confiança de 50% da coerência do perfil de raios gama do poço A assume o valor de 2,0441592 (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Valores da Frequência Máxima para um Nível de Confiança de 50% da Coerência.

Poço	Perfil	Frequência (ciclos/m)
A	GR	2,0442
	NPHI	2,4024
B	GR	2,3032
C	MSFL	2,3724
D	HGR05	2,9177
D	HRHOB02	5,6118

2.8 CÁLCULO DA RESOLUÇÃO VERTICAL

Em perfilagem de poço, definimos como resolução vertical do perfil a espessura mínima que uma camada geológica deve ter para que seja plenamente identificada por meio da análise visual do perfil. Esta identificação depende de dois fatores principais: aqueles inerentes às características intrínsecas da ferramenta utilizada e aqueles relacionados com as características sistemáticas dos processos de utilização da ferramenta, como ambiente de perfilagem, velocidade da sonda e intervalo de amostragem, por exemplo. Enquanto os primeiros fornecem uma resolução vertical teórica ou nominal; os últimos fornecem uma resolução vertical operacional ou real. Ocorrendo comumente como vínculo óbvio entre as duas, o fato da primeira jamais ser maior do que a segunda. Daí, originar-se o interesse do cálculo da resolução vertical que um determinado perfil fornece, levando-se em consideração as condições operacionais às quais a ferramenta foi submetida.

As condições operacionais consideradas importantes aqui são primordialmente o intervalo de amostragem e a velocidade de perfilagem, uma vez que estes dois fatores são plenamente controláveis e desempenham papel importante na obtenção de perfis, como os perfis radioativos, por exemplo. A análise da resolução, fornecida pela variação destes parâmetros isolados, fornece as condições mais favoráveis de utilização da ferramenta a fim de que se tenha um melhor rendimento desta em termos de custo e precisão dos dados, visto que, antagonicamente, o processo de menor custo nem sempre é o mais impreciso.

Enfim, considerando-se os resultados até aqui obtidos e de posse do valor da frequência máxima para um nível de confiança de 50% da coerência ($f_{50\%}$), pode-se calcular a resolução vertical (RV) do perfil analisado como sendo (Tabela 2.4)

$$RV = \frac{1}{2f_{50\%}}. \quad (2.57)$$

Tabela 2.4 - Resolução Vertical de Alguns Perfis Utilizados.

Poço	Perfil	Resolução (m)
A	GR	0,245
	NPHI	0,208
B	GR	0,217
C	MSFL	0,211
D	HGR05	0,171
D	HRHOB02	0,089

2.9 RAZÃO SINAL-RUÍDO

Para um grau de liberdade (λ) grande, o módulo da coerência ($C(f)$) relaciona-se com a razão sinal-ruído ($S/R(f)$) por meio da equação (KERFORD & GEORGI, 1990)

$$S/R(f) = \frac{C(f)}{1 - C(f)}. \quad (2.58)$$

Conforme visto, para seções principal e repetida coincidentes, a coerência assume valor unitário. Neste caso, a razão sinal-ruído assume valor infinito. Quando a coerência diminui, diminui também a razão sinal-ruído, implicando o aumento no módulo do ruído. Isto permite a utilização de $S/R(f)$ como mais um parâmetro de avaliação de perfis de poço. Os perfis de resistividade e sônico apresentam uma razão sinal-ruído elevada. O mesmo não ocorre com os perfis de decaimento radioativo (raios gama, porosidade neutrônica, etc.), que apresentam a razão sinal-ruído baixa.

A Figura 2.18 ilustra a razão sinal-ruído da seção principal do perfil de raios gama do poço A.

2.10 ESPECTRO DE POTÊNCIA DO SINAL E DO RUÍDO

A razão sinal-ruído pode ser utilizada para decompor os espectros de potência das seções principal ($X(f)X^*(f)$) e repetida ($Y(f)Y^*(f)$) nos respectivos espectros de potência do sinal ($S(f)S^*(f)$) e do ruído ($R(f)R^*(f)$) (GEORGI, 1989).

Para o espectro de potência de uma seção qualquer ($V(f)V^*(f)$), define-se a razão sinal-ruído como sendo

$$S/R(f) = \frac{S(f)S^*(f)}{R(f)R^*(f)}. \quad (2.59)$$

Admitindo-se que o sinal e o ruído sejam estatisticamente independentes entre si, ou seja,

$$\pm 2S(f)S^*(f)R(f)R^*(f) = 0, \quad (2.60)$$

o espectro de potência da seção assume a seguinte forma

$$V(f)V^*(f) = S(f)S^*(f) + R(f)R^*(f), \quad (2.61)$$

o que fornece

$$S(f)S^*(f) = V(f)V^*(f) - R(f)R^*(f). \quad (2.62)$$

Substituindo-se o espectro de potência do sinal na equação (2.59) pela expressão da equação (2.62), resulta em

$$S/R(f) = \frac{V(f)V^*(f) - R(f)R^*(f)}{R(f)R^*(f)}. \quad (2.63)$$

Rearranjando-se a equação (2.63), encontra-se para o espectro de potência do ruído a seguinte expressão

$$R(f)R^*(f) = \frac{V(f)V^*(f)}{S/R(f) + 1}. \quad (2.64)$$

Com o valor do espectro de potência do ruído conhecido, o valor do espectro de potência do sinal pode ser obtido por meio da equação (2.62).

No cálculo dos espectros de potência do sinal e do ruído para cada uma das seções é esperado que os resultados sejam aproximadamente semelhantes. Isto porque, embora seja condição ideal o sinal e o ruído presentes em cada uma das seções serem os mesmos, na prática é quase certo que ocorram pequenas diferenças.

A Figura 2.19 ilustra os espectros de potência do sinal e do ruído da seção principal do perfil de raios gama do poço A, onde se omitiu, por razões óbvias, a ilustração do valor infinito encontrado na frequência inicial.

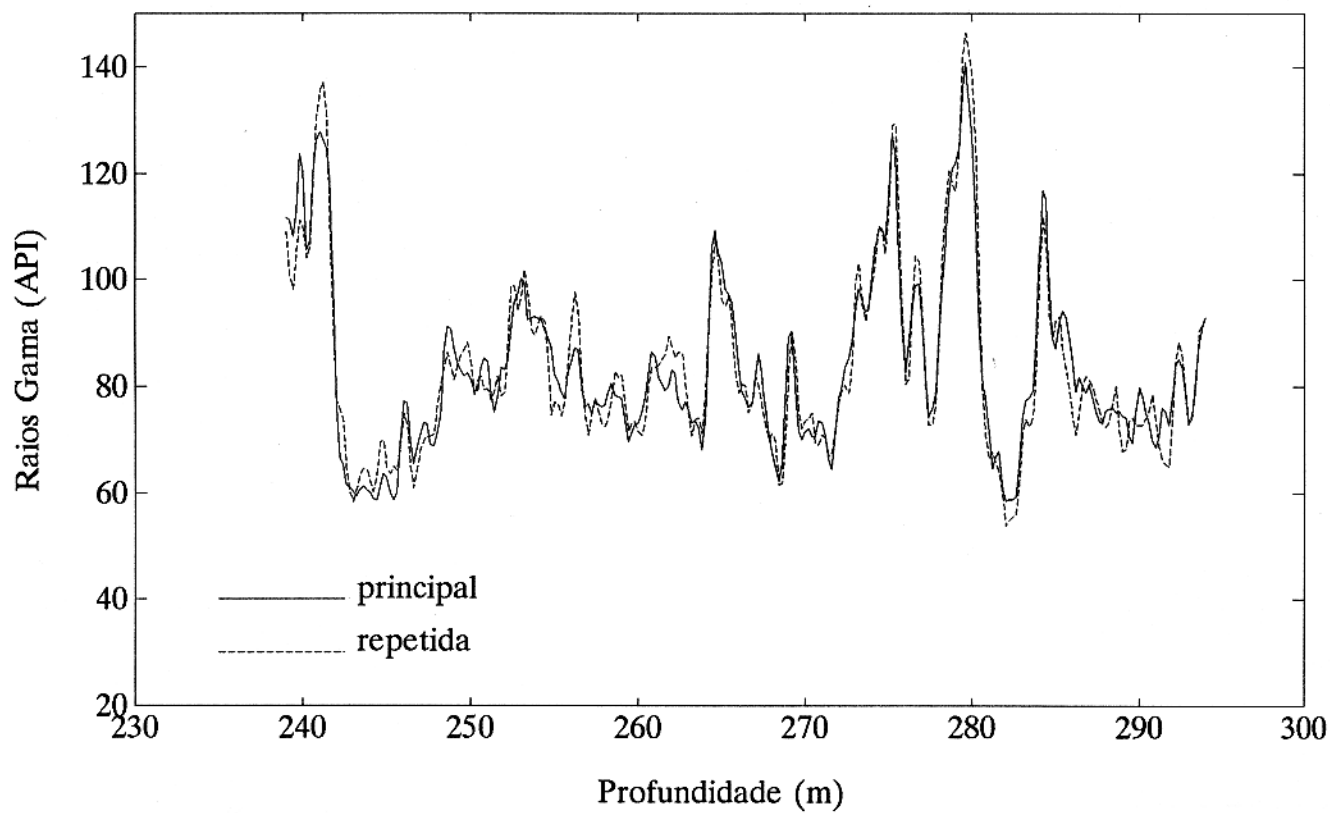


Figura 2.1 - Seções principal e repetida do perfil de raios gama normal do poço A, pertencente à Bacia Potiguar emersa.

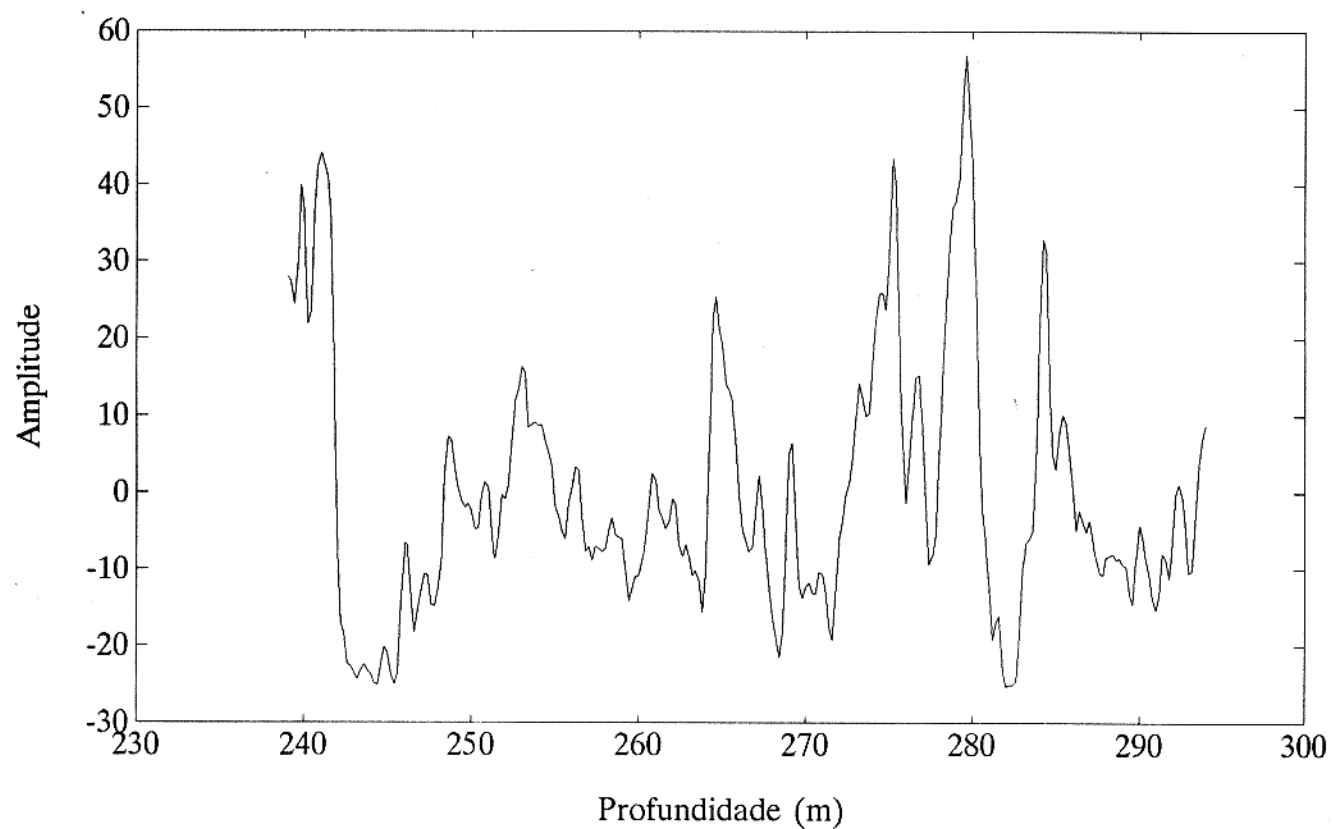


Figura 2.2 - Seção principal do perfil de raios gama normal (GR) do poço A sem a média.

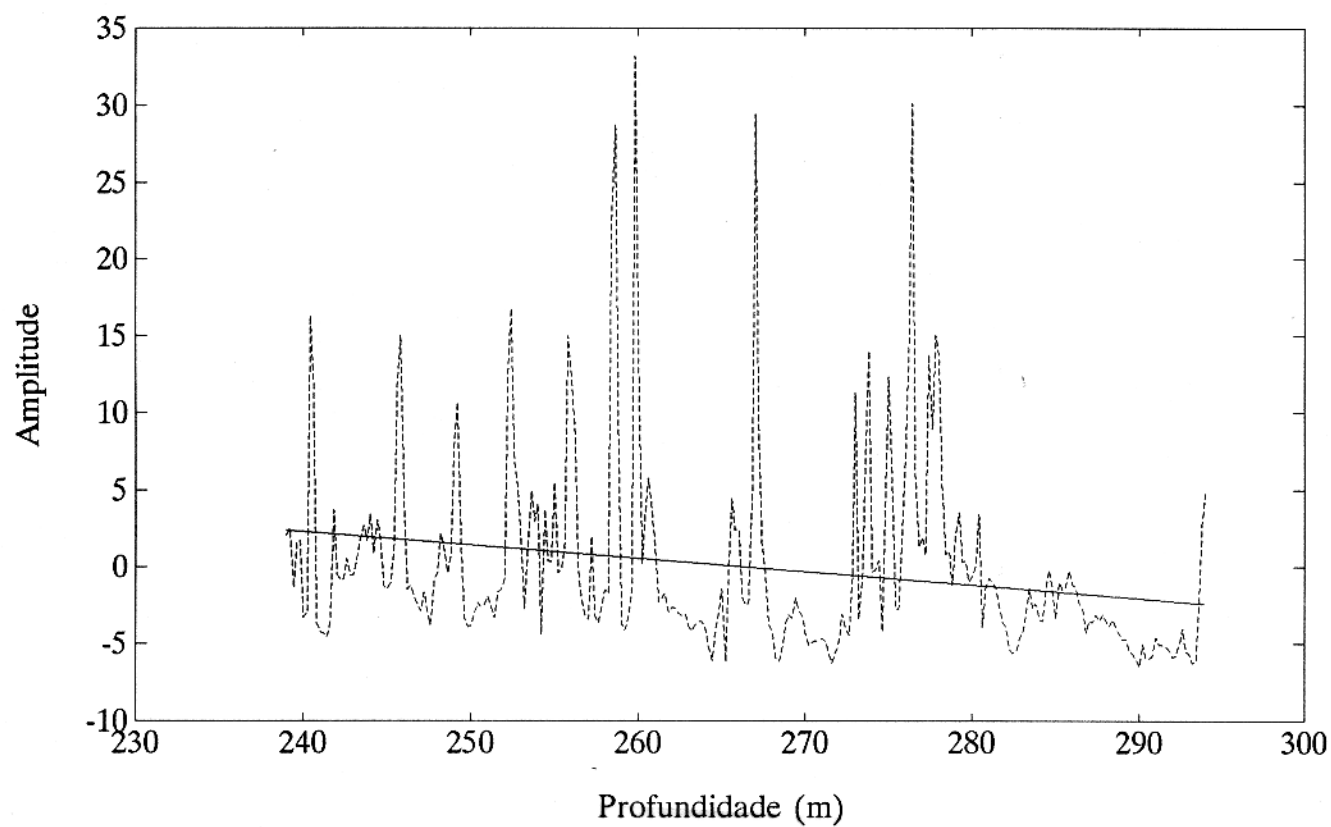


Figura 2.3 - (a) Seção principal do perfil micro-esférico (linha tracejada) do poço A, sem a média, e o respectivo alinhamento polinomial algébrico de primeiro grau (linha cheia).

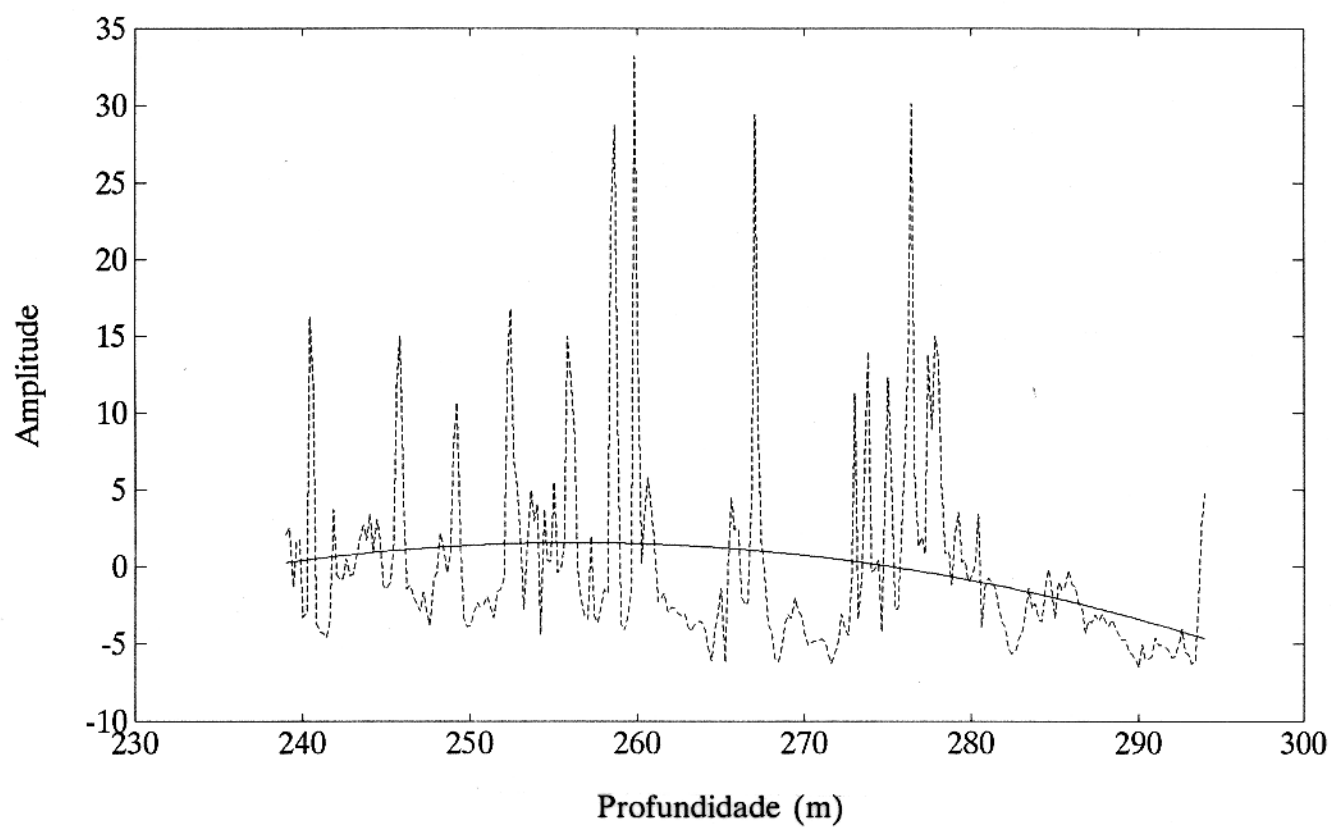


Figura 2.3 - (b) Seção principal do perfil micro-esférico (linha tracejada) do poço A, sem a média, e o respectivo alinhamento polinomial algébrico de segundo grau (linha cheia).

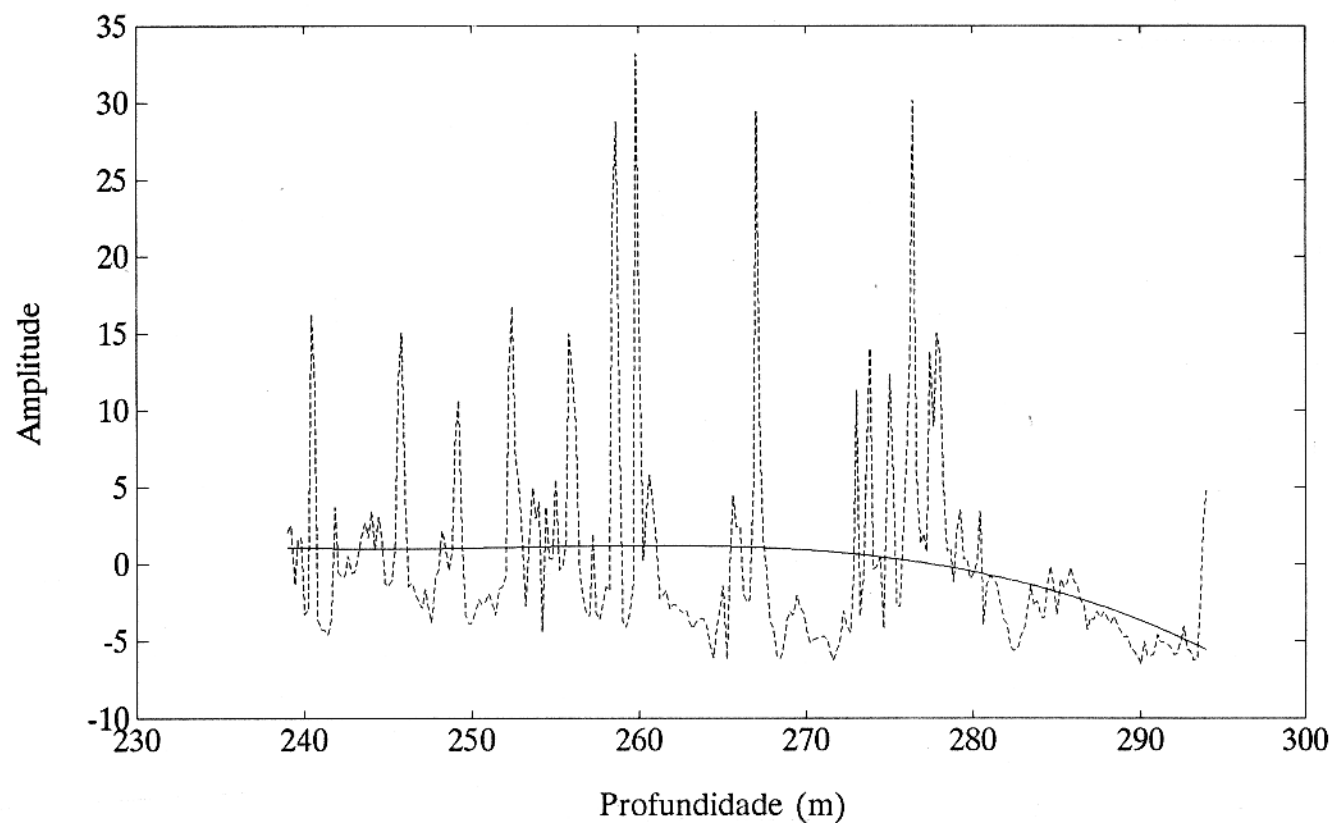


Figura 2.3 - (c) Seção principal do perfil micro-esférico (linha tracejada) do poço A, sem a média, e o respectivo alinhamento polinomial algébrico de terceiro grau (linha cheia).

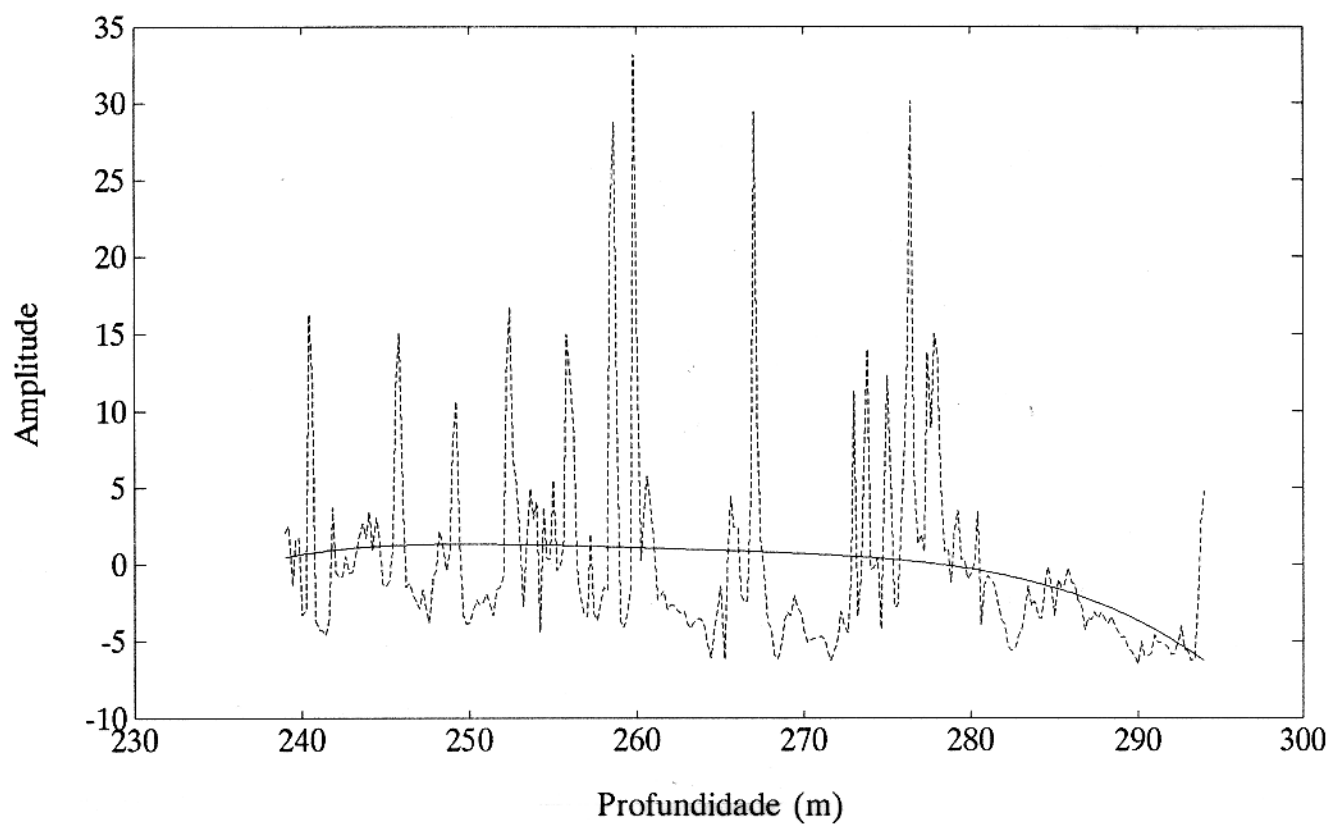


Figura 2.3 - (d) Seção principal do perfil micro-esférico (linha tracejada) do poço A, sem a média, e o respectivo alinhamento polinomial algébrico de quarto grau (linha cheia).

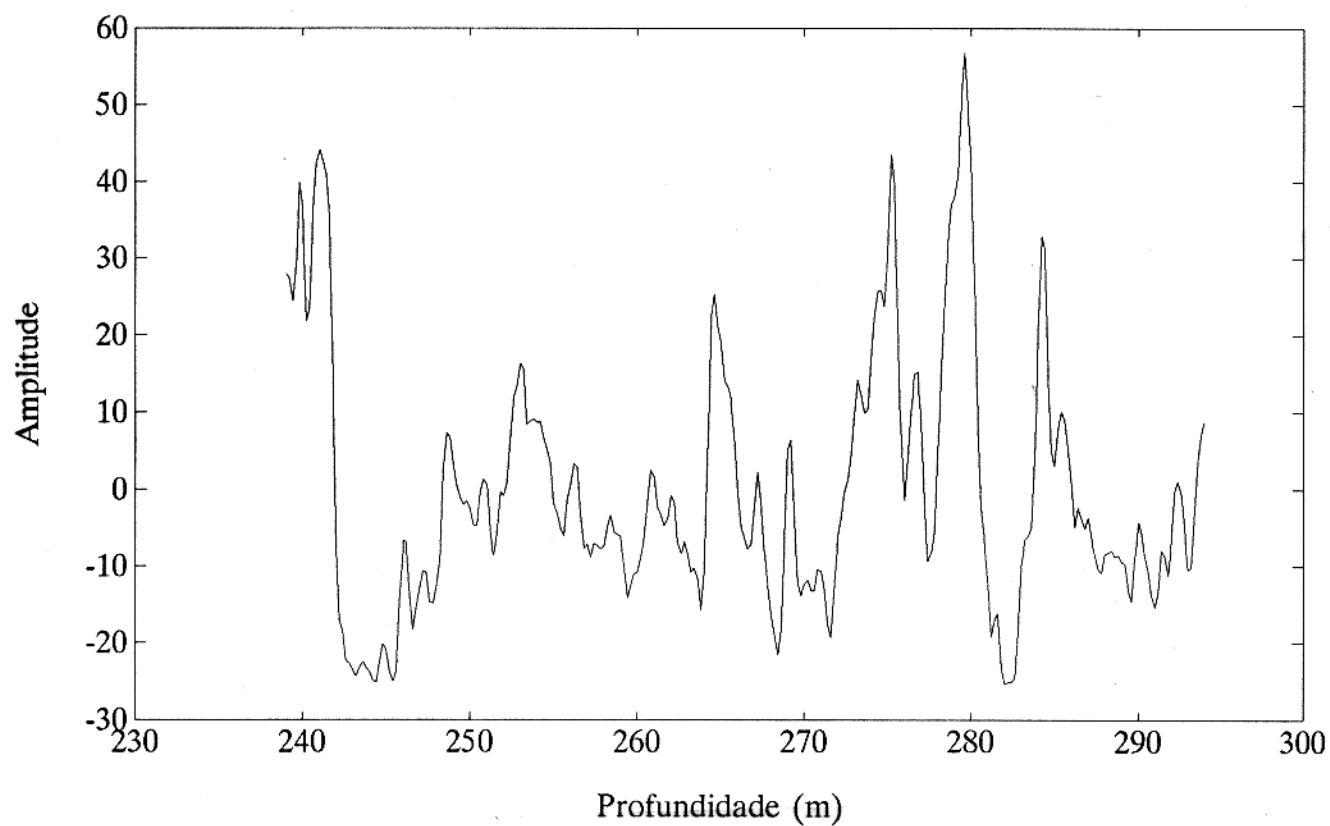


Figura 2.4 - Seção principal do perfil de raios gama normal do poço A sem o alinhamento polinomial algébrico de primeiro grau.

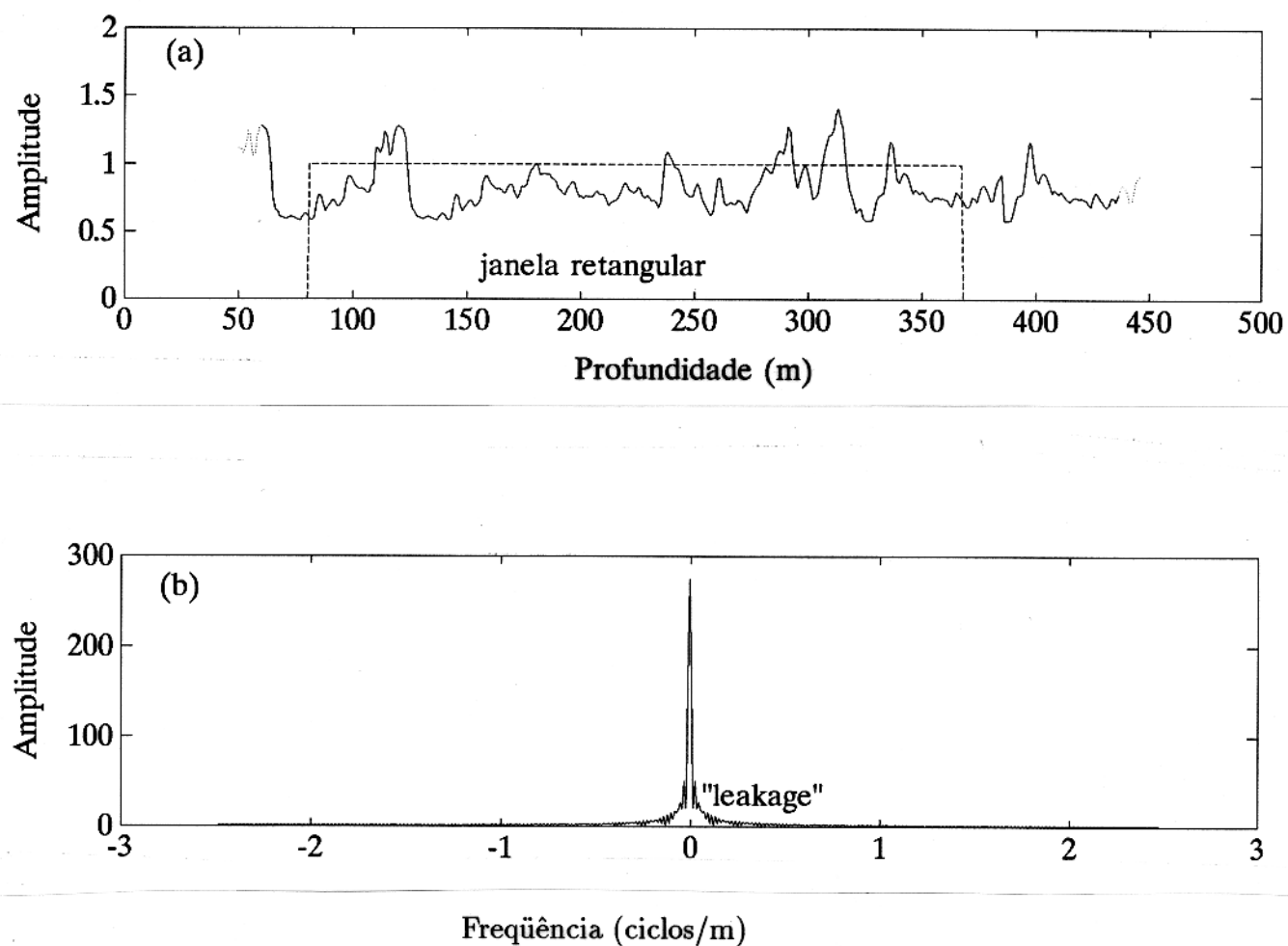


Figura 2.5 - (a) A seção utilizada do perfil pode ser vista como o produto entre o sinal infinitamente longo (linha cheia) e a função retangular (linha tracejada); (b) ilustração do fenômeno de "leakage", no domínio da frequência, provocado pela aplicação da função retangular, no domínio do espaço.

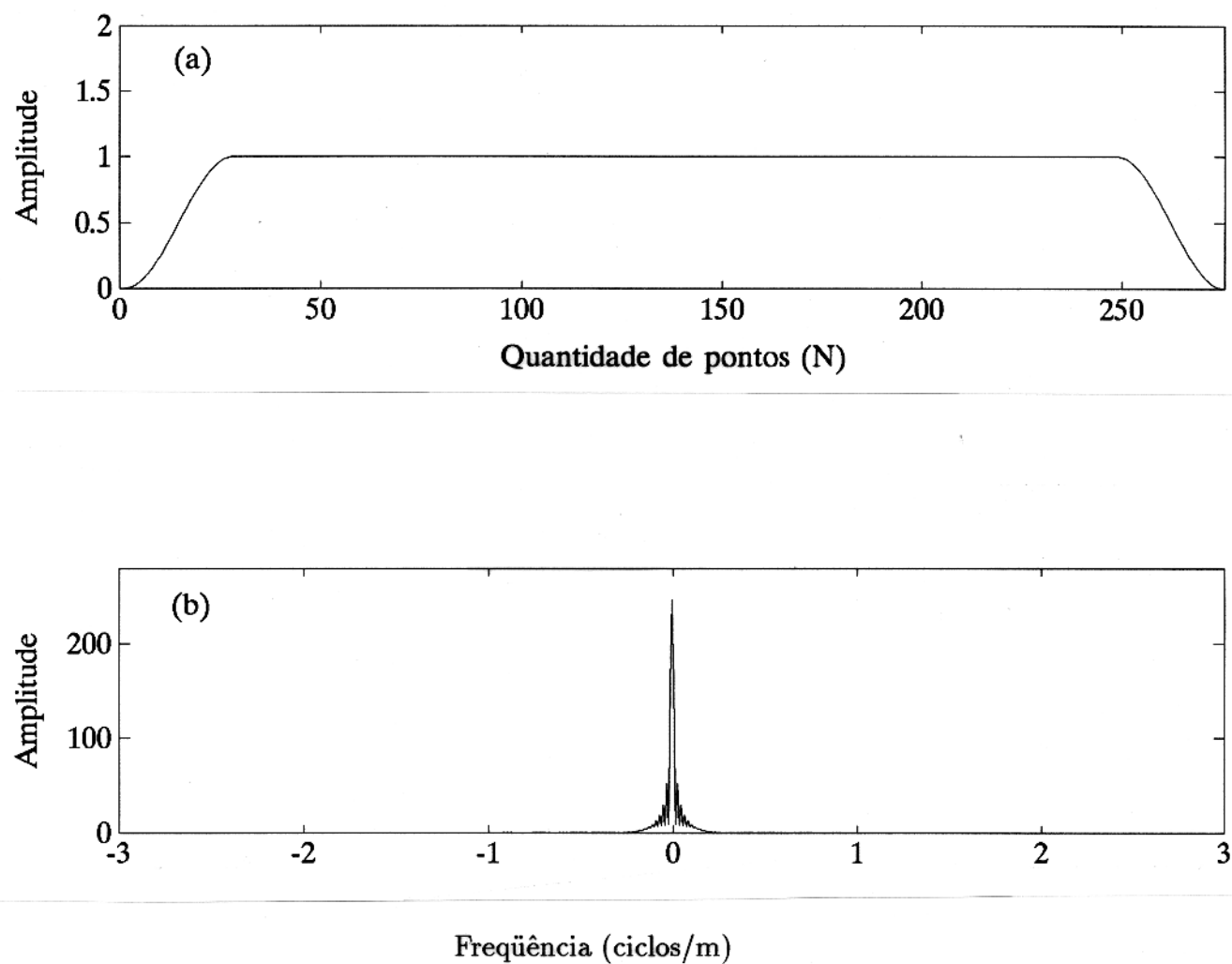


Figura 2.6 - (a) Função ponderadora no domínio do espaço e em relação à quantidade (N) de pontos; (b) espectro de amplitude da função ponderadora ($\Delta z = 0,20$ m).

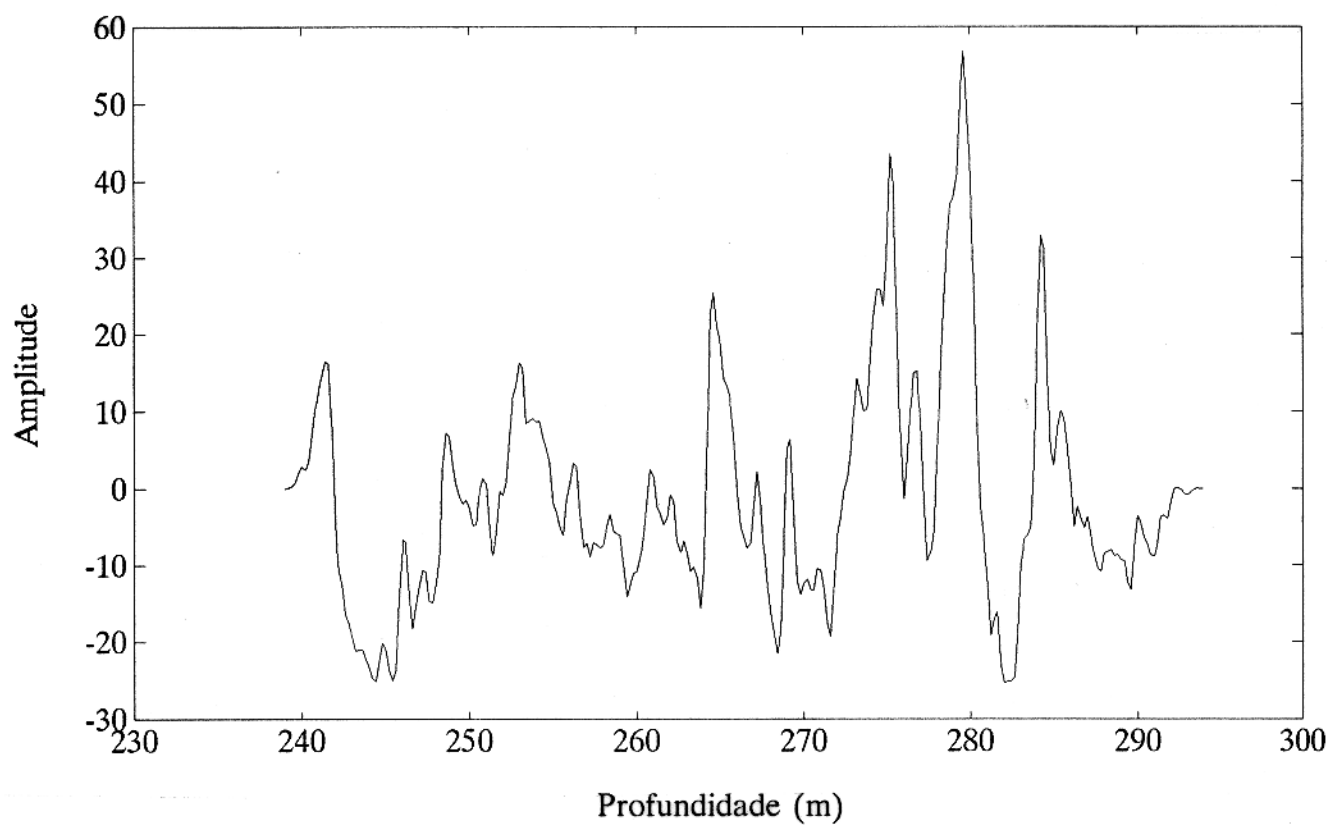


Figura 2.7 - Seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação da função ponderadora.

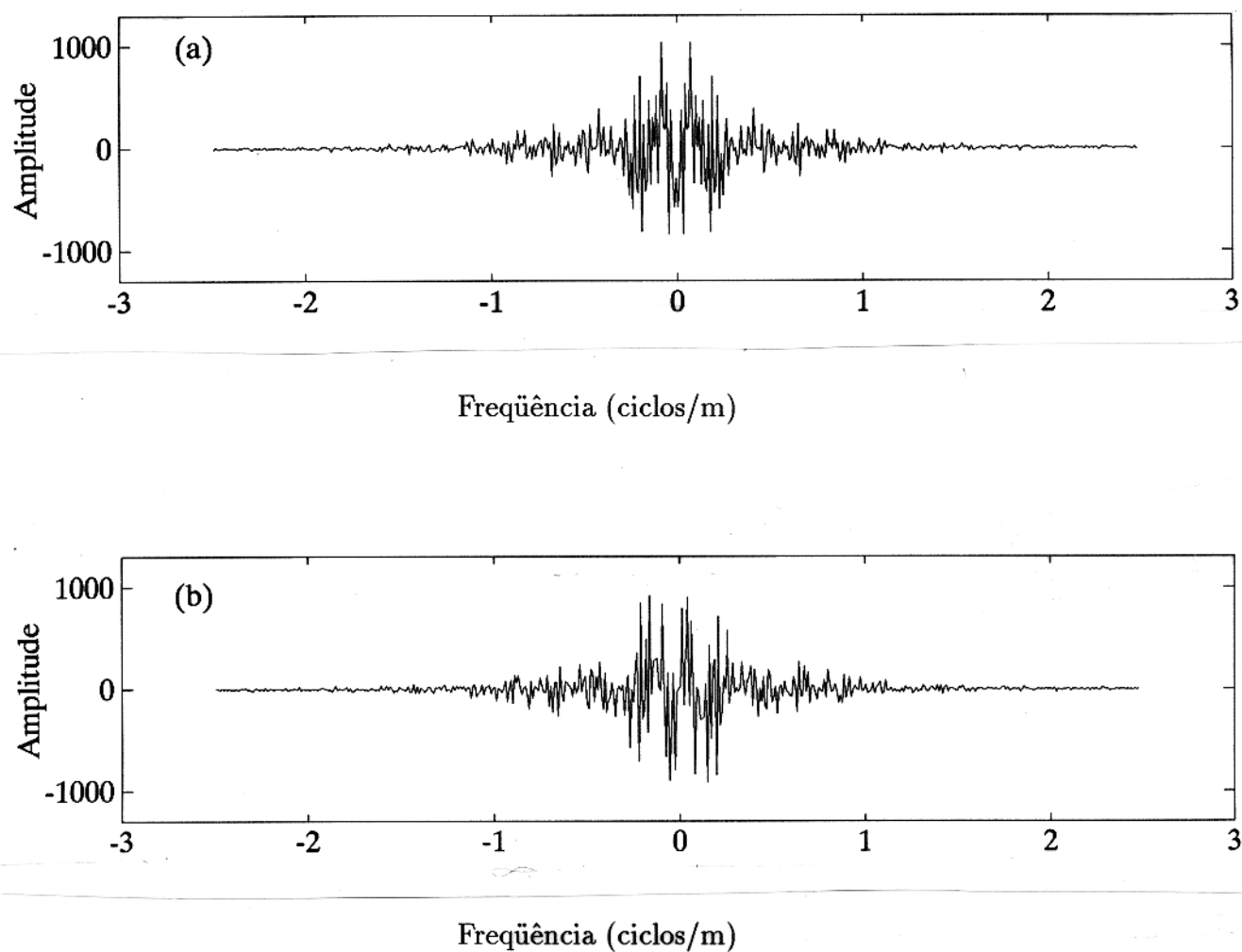


Figura 2.8 - Partes real (a) e imaginária (b) da transformada de Fourier da seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação da função ponderadora.

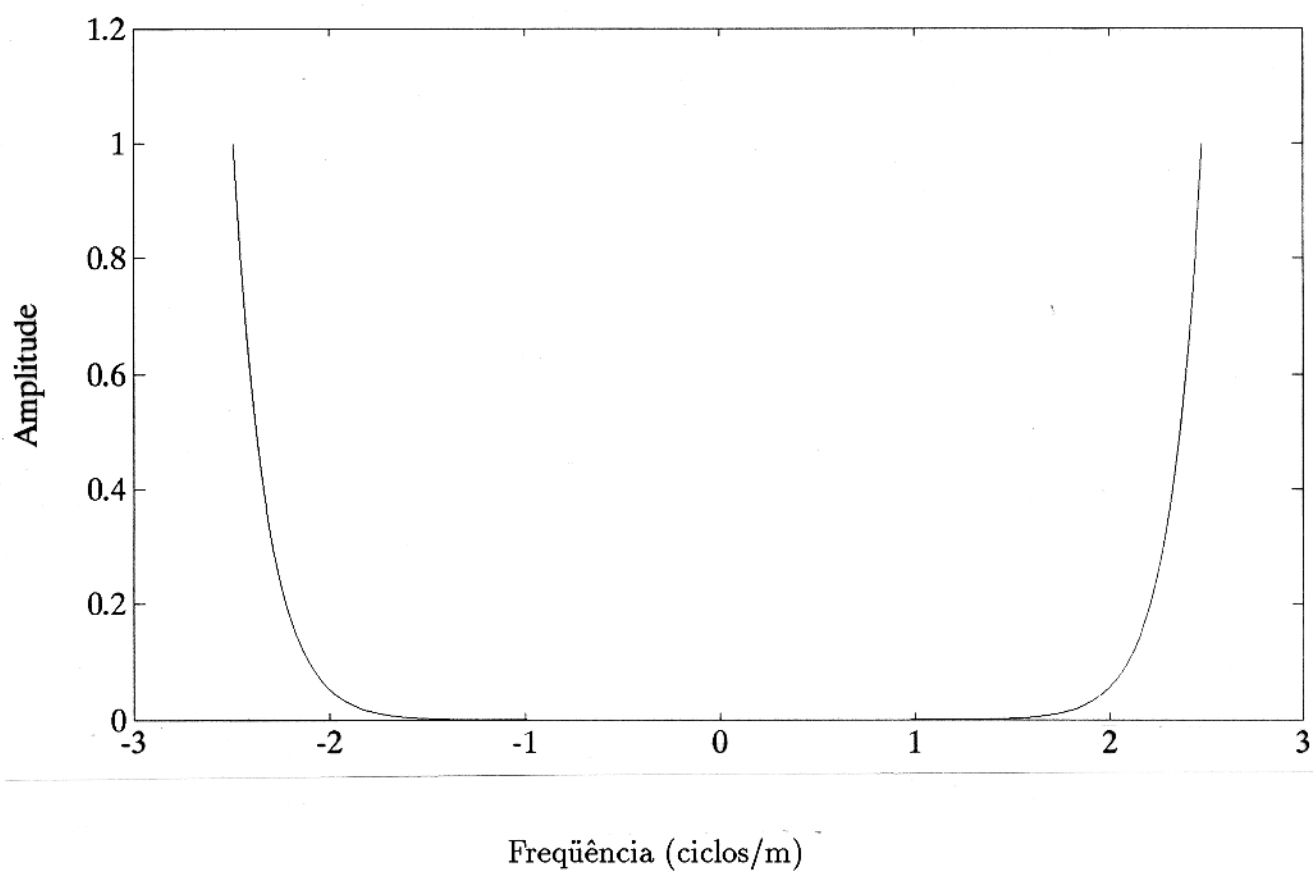


Figura 2.9 - Forma assumida, no domínio da frequência, pelo filtro passa-alta utilizado para o branqueamento preliminar dos perfis de raios gama dos poços A, B e D.

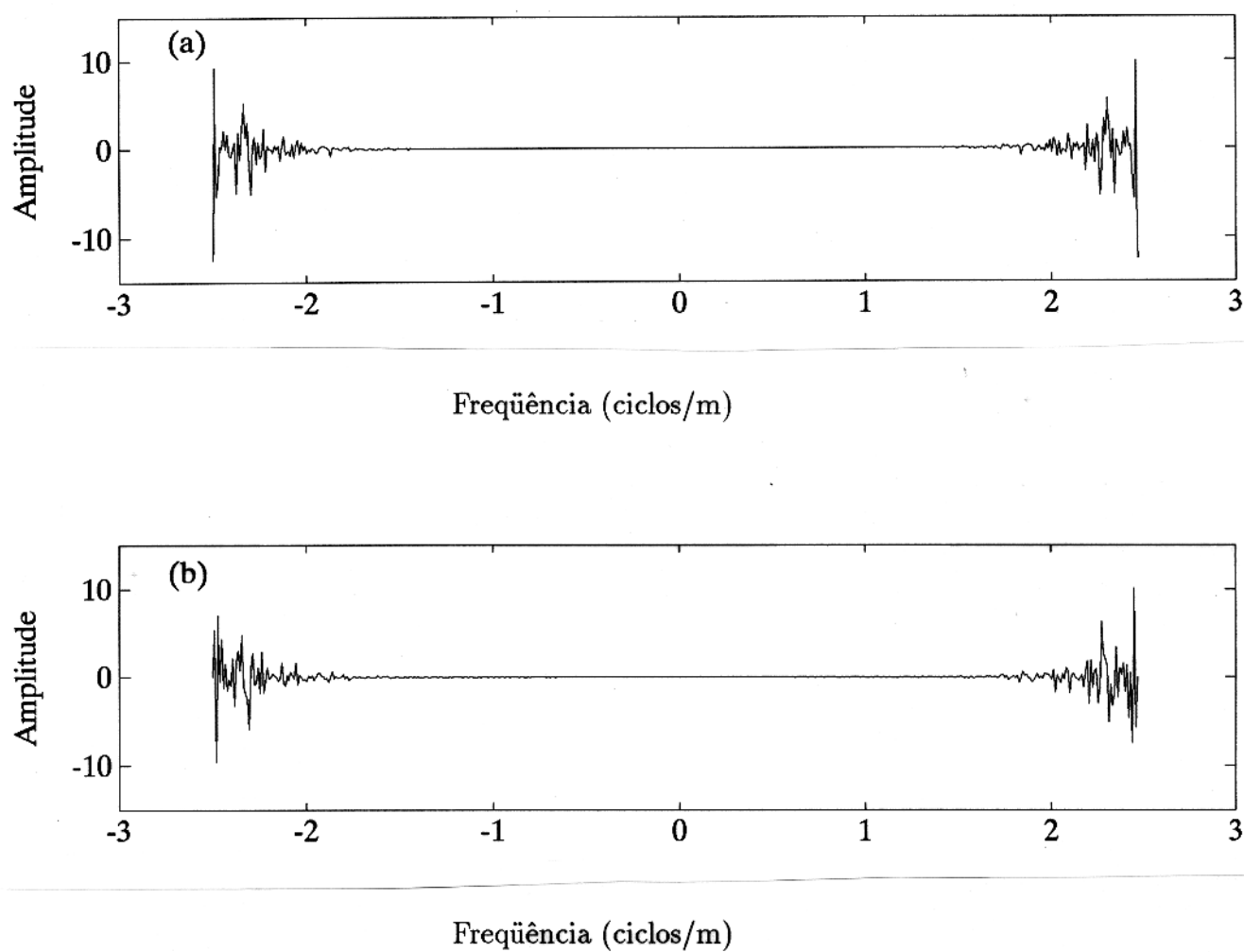


Figura 2.10 - Partes real (a) e imaginária (b) da transformada de Fourier da seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação do filtro passa-alta, evidenciando a atenuação das frequências baixas.

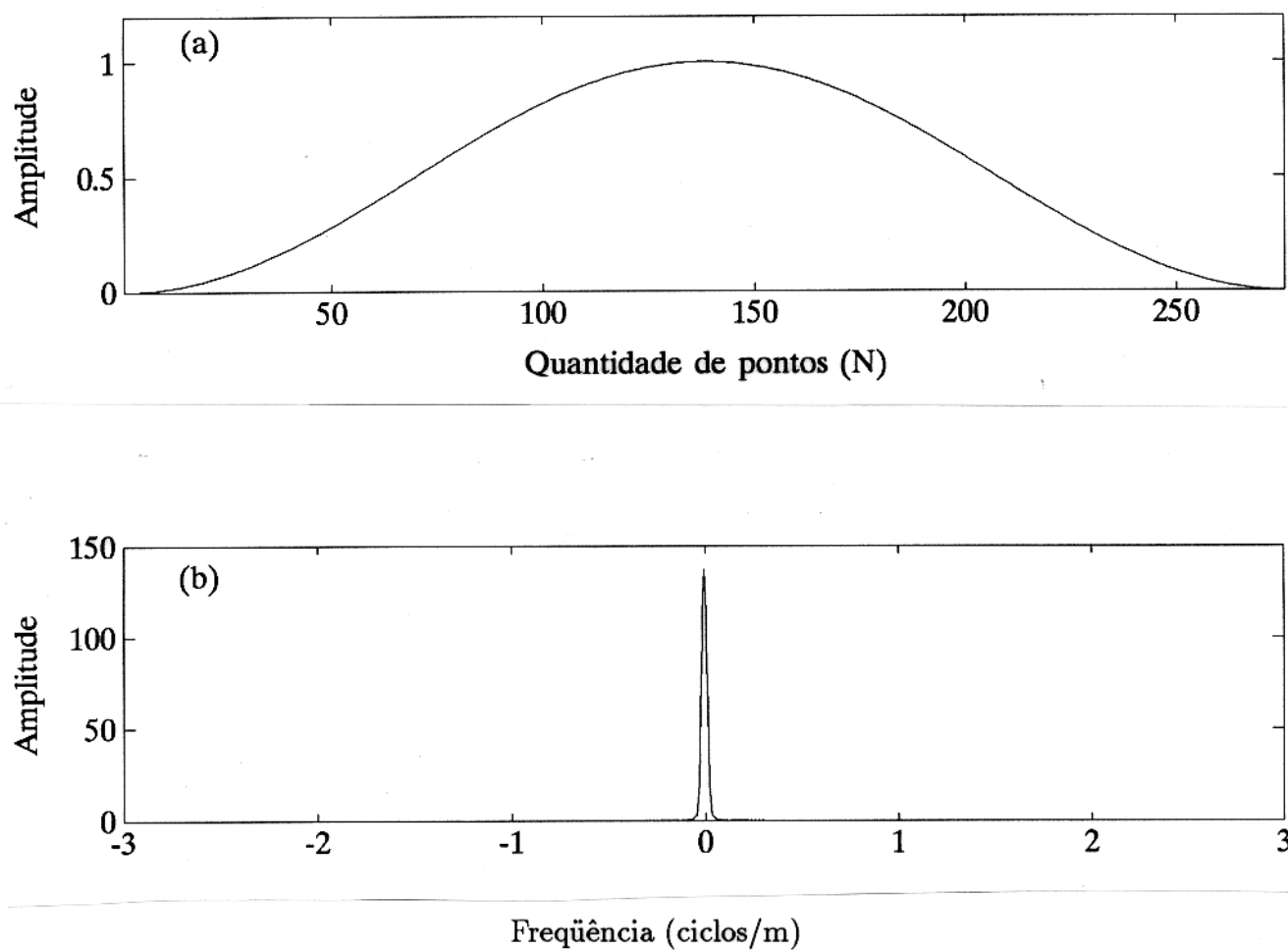


Figura 2.11 - (a) Janela Hanning, em função da quantidade (N) de pontos; (b) espectro de amplitude da janela Hanning ($\Delta z = 0,20$ m).

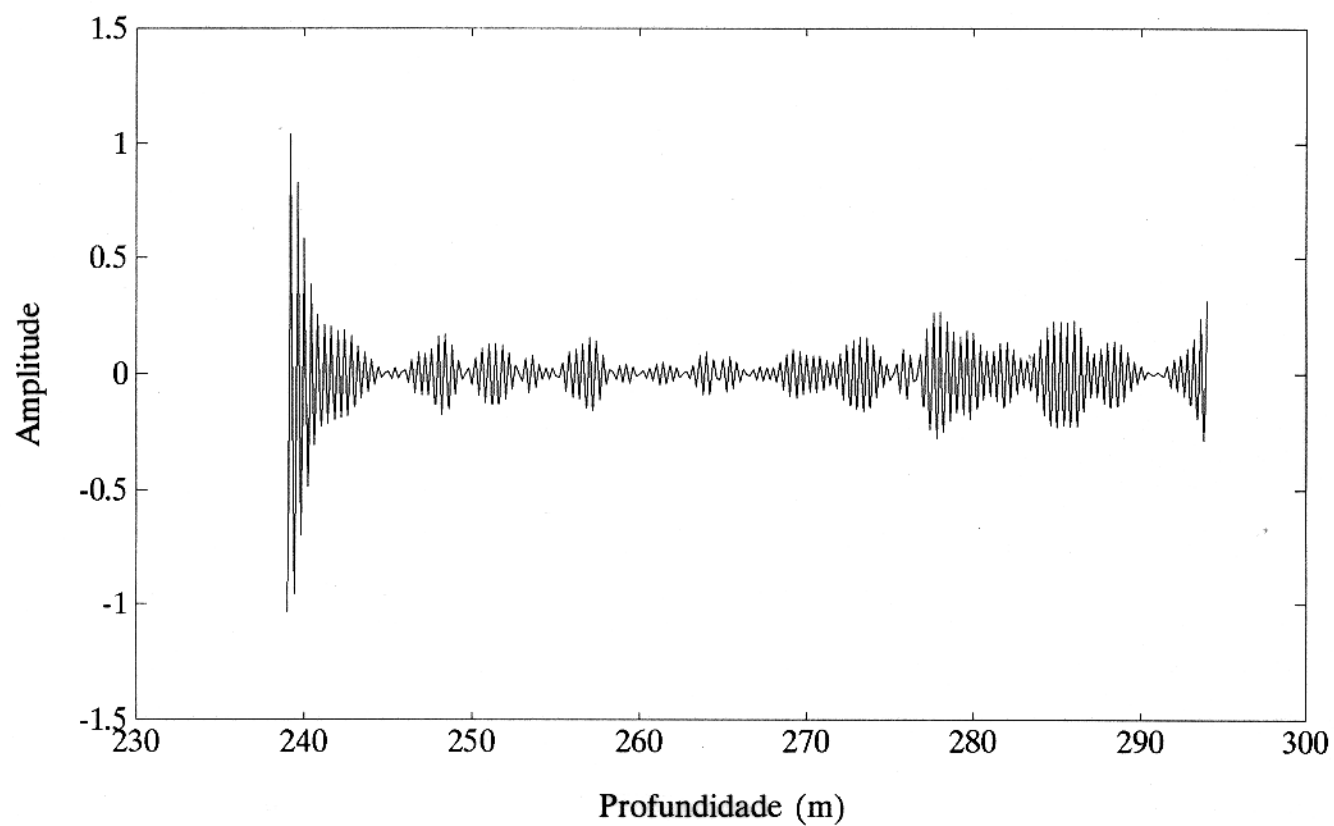


Figura 2.12 - Seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação do filtro passa-alta modelado e no domínio do espaço.

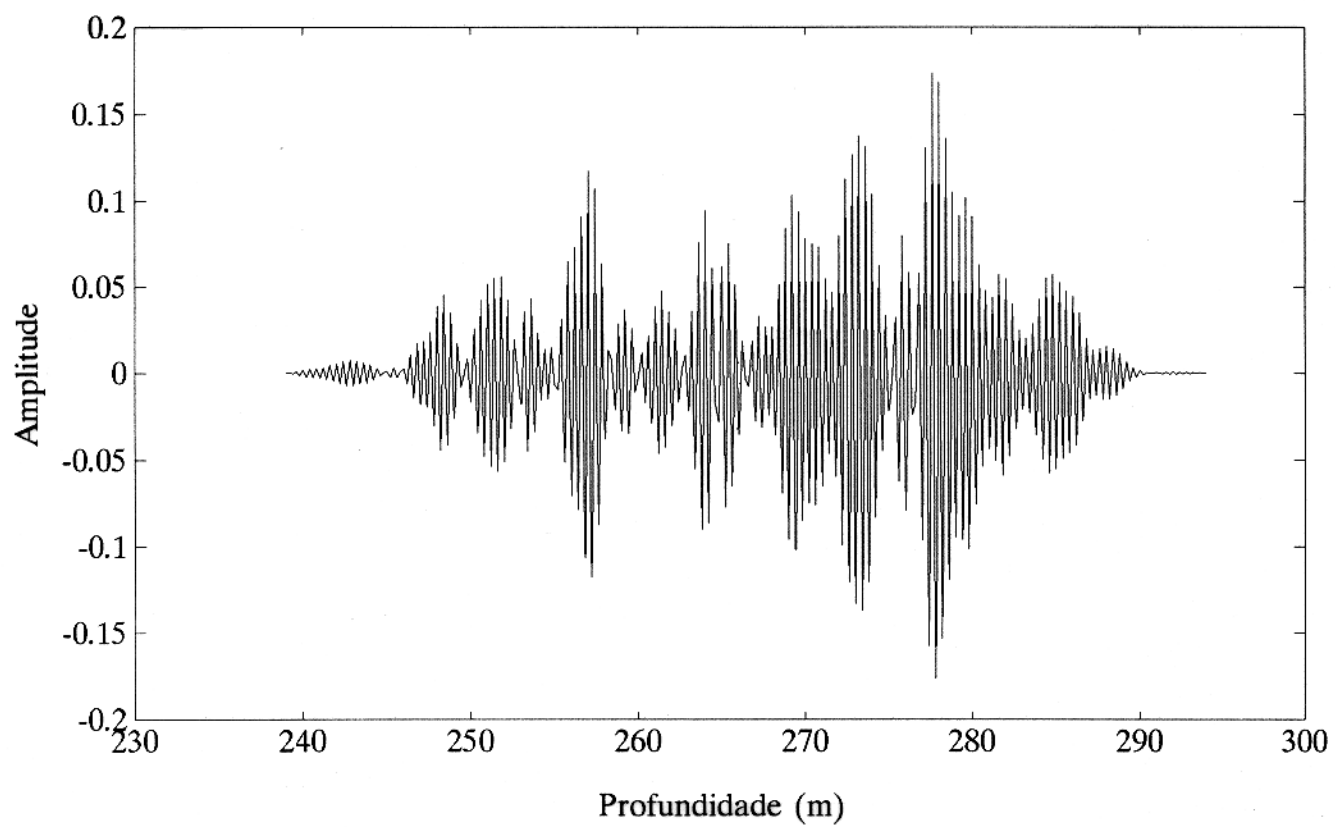


Figura 2.13 - Seção principal do perfil de raios gama normal do poço A, após a aplicação da janela Hanning.

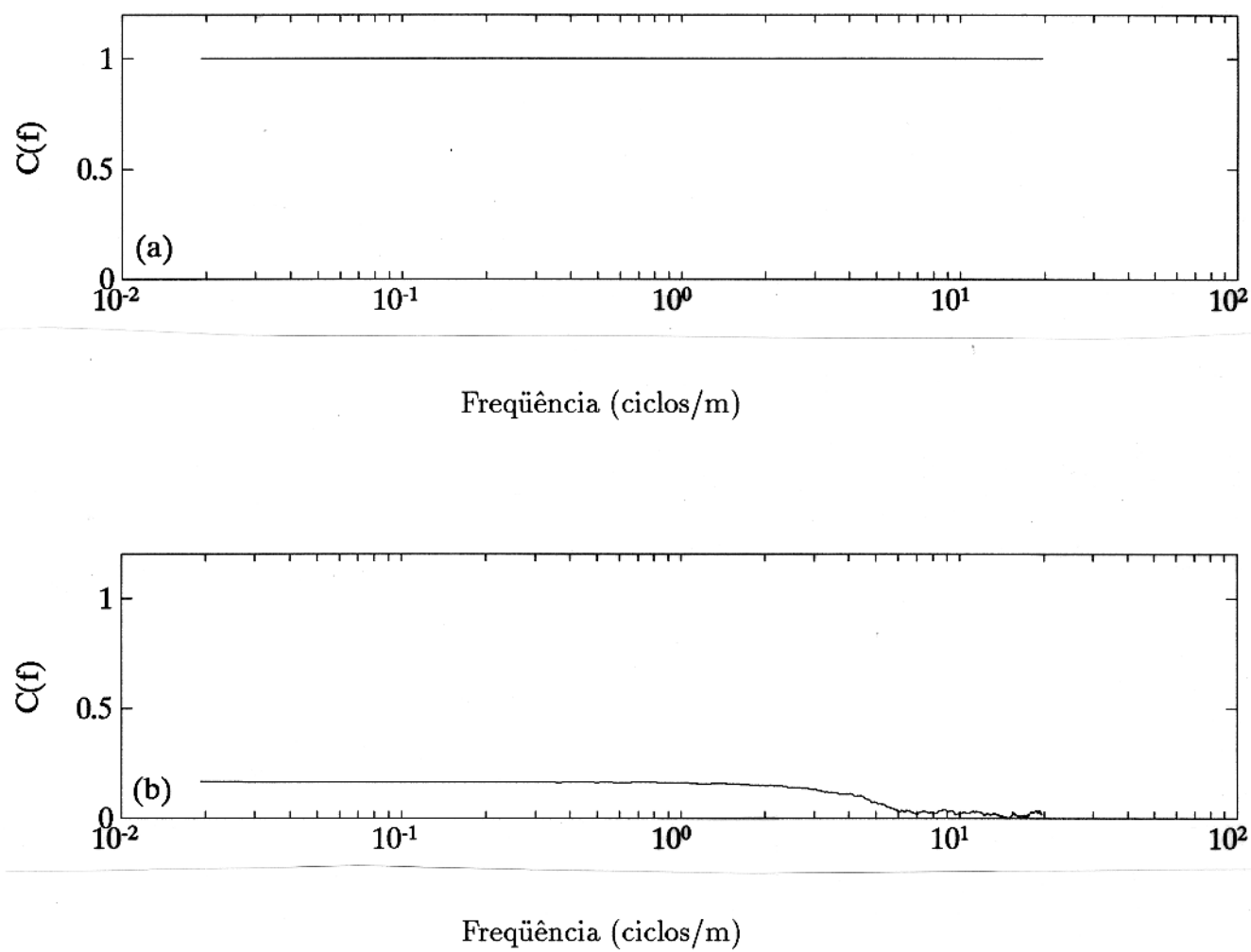


Figura 2.14 - (a) Coerência para duas seções idênticas; (b) Coerência para duas seções muito diferentes entre si.

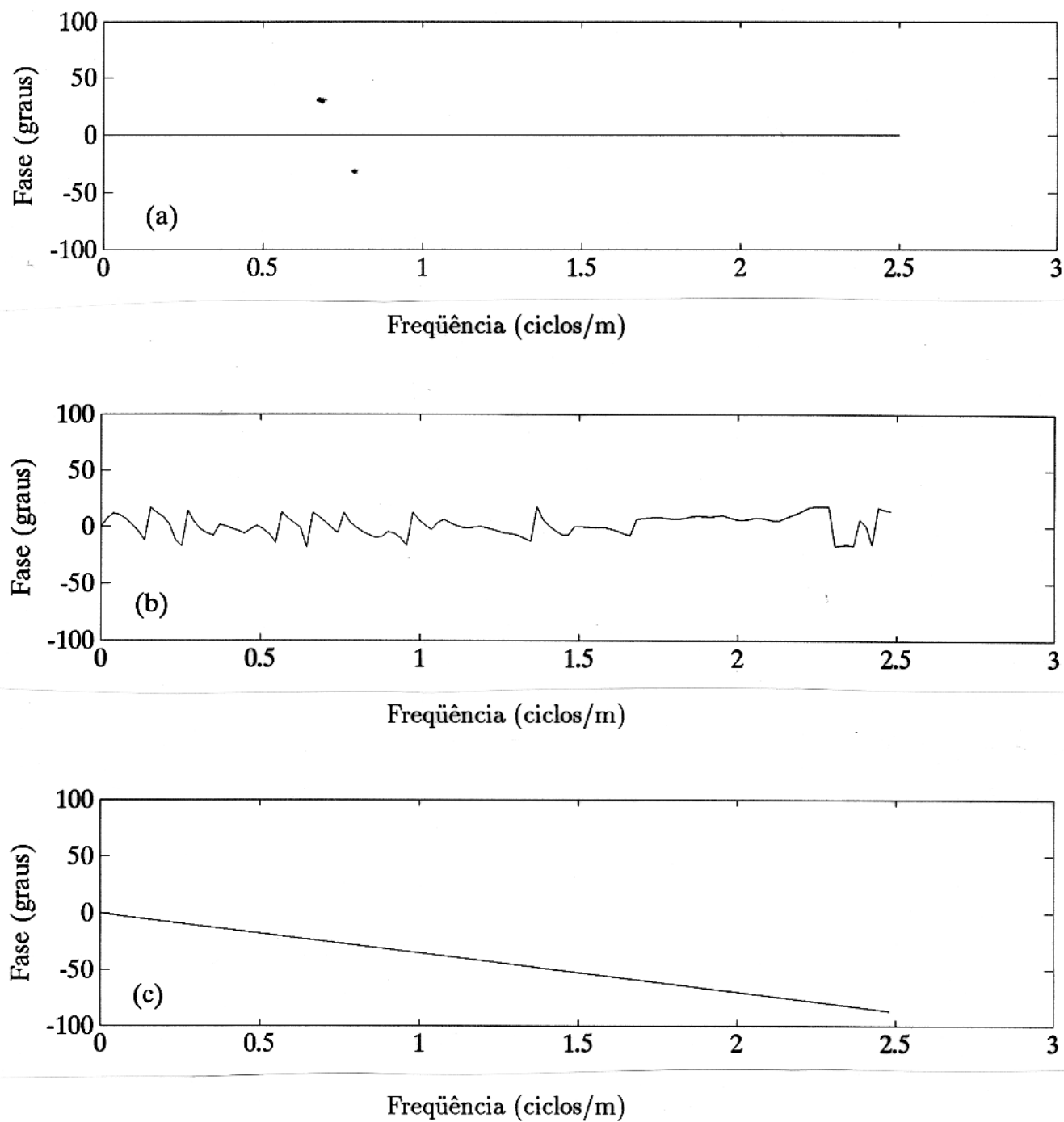


Figura 2.15 - (a) Espectro de fase para duas seções idênticas e na mesma profundidade; (b) espectro de fase para duas seções muito diferentes entre si e na mesma profundidade; (c) espectro de fase para duas seções idênticas e em profundidades diferentes.

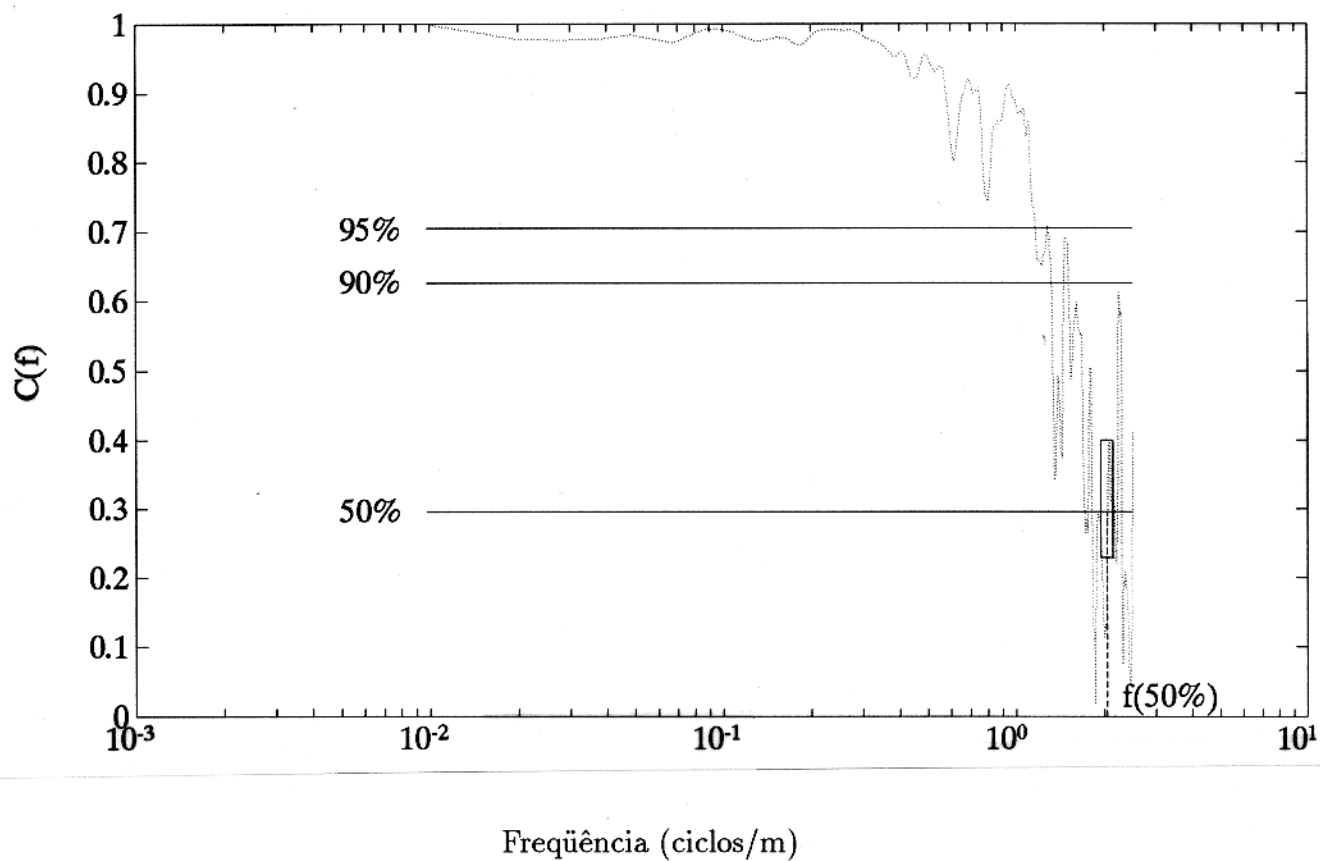


Figura 2.16 - Coerência relativa às seções principal e repetida do perfil de raios gama normal do poço A, com a indicação da frequência máxima para um nível de confiança de 50% ($f_{50\%}$) e da região a ser ampliada (retângulo em linha cheia) para a ilustração do cálculo utilizado na obtenção desta frequência.

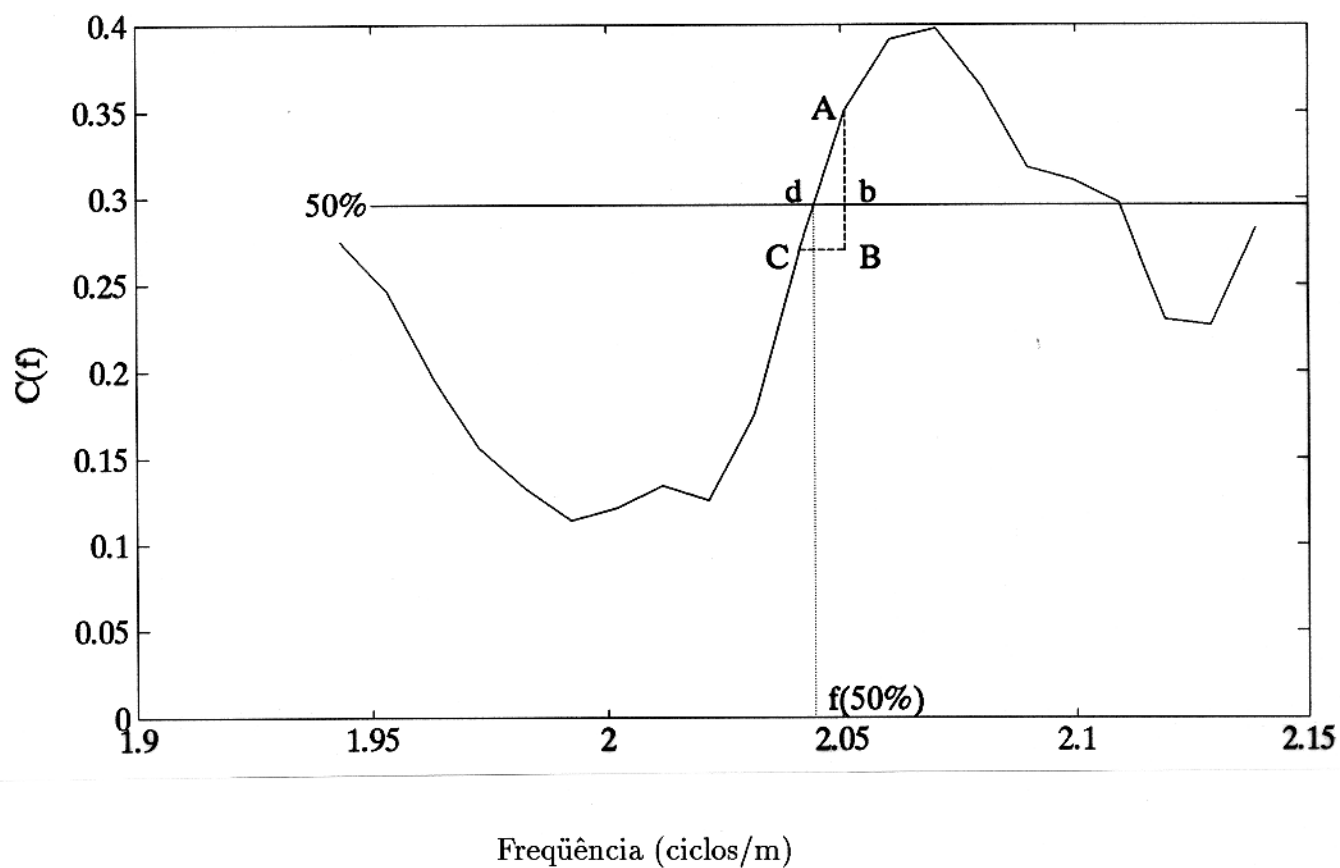


Figura 2.17 - Retângulo ampliado da Figura 2.16 para auxiliar na compreensão do desenvolvimento teórico aplicado à obtenção da frequência máxima para um nível de confiança de 50%, com base nas relações geométricas entre o triângulo de vértices A, B e C e o triângulo de vértices A, b e d.

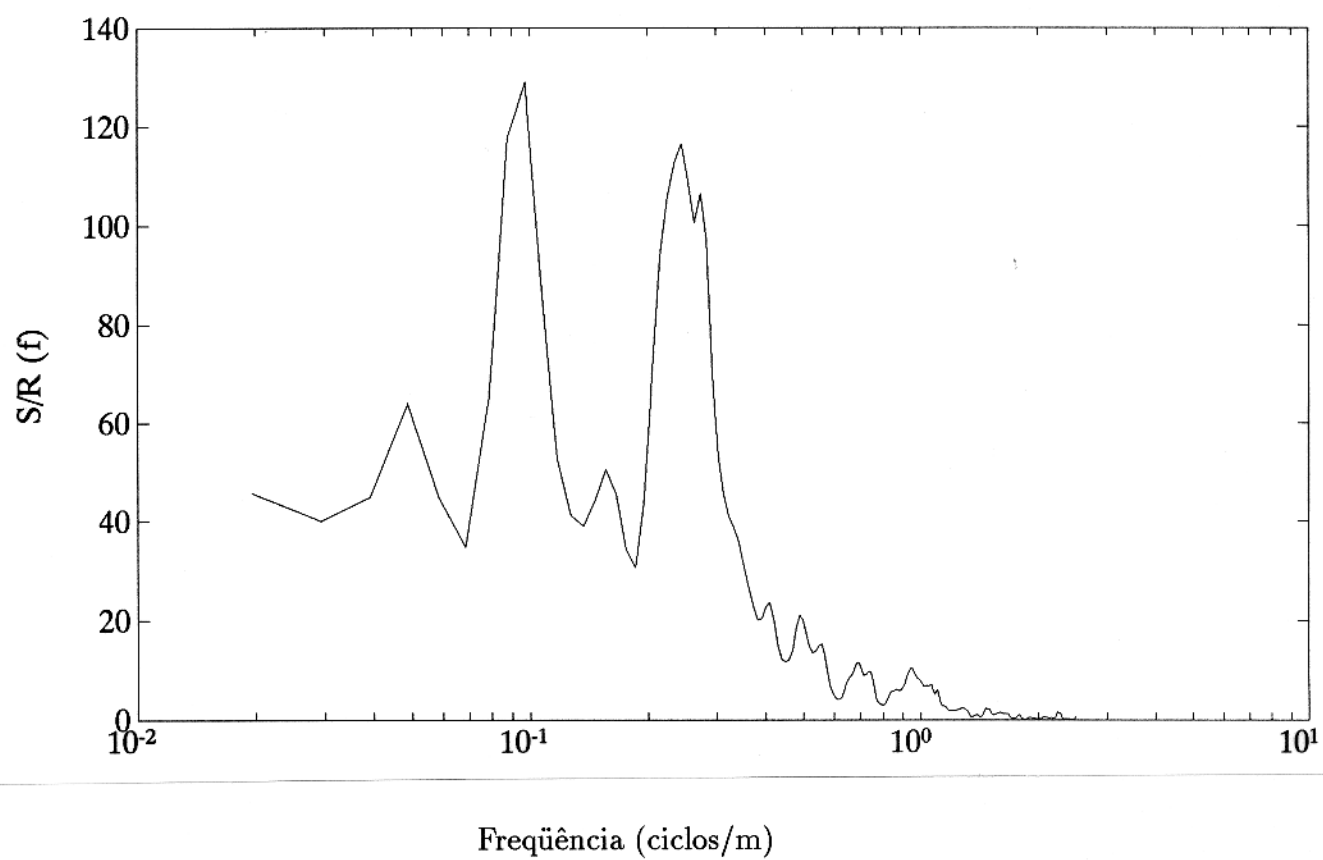


Figura 2.18 - Razão sinal-ruído do perfil de raios gama do poço A.

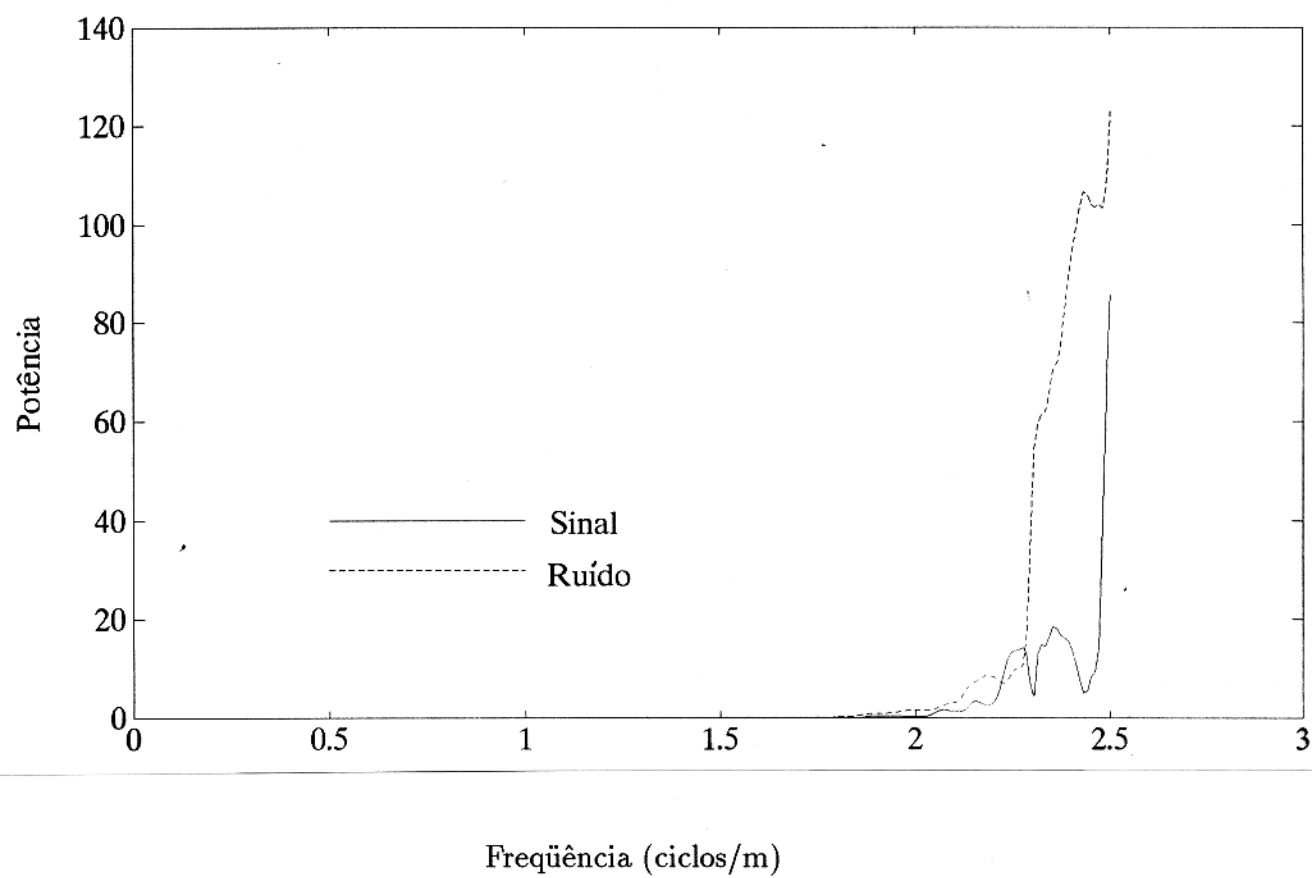


Figura 2.19 - Espectros de potência do sinal e do ruído da seção principal do perfil de raios gama do poço A.

3 - PRINCÍPIO DE OBTENÇÃO DE ALGUNS PERFIS

3.1 PERFIL DE DENSIDADE

A ferramenta ("Litho-Density Tool" - LDT) utilizada na obtenção do perfil de densidade é, basicamente, composta por uma fonte de Césio-137 de 1,5 a 2,0 curie de atividade, que emite um fluxo constante e colimado de raios gama com energia cinética de 662 KeV. Ela ainda consta de um detector próximo ("short-spacing detector"), ou seja, um cintilômetro específico, para registrar o espectro radioativo referente ao efeito Compton e um detector afastado ("long-spacing detector"), idêntico ao anterior, com capacidade para registrar o espectro radioativo referente ao efeito Compton com nível de energia cinética entre 180 e 540 KeV e que, em razão de conter uma janela de berílio, está também capacitado para registrar os raios gama cuja energia cinética esteja entre 40 e 80 KeV, correspondendo portanto ao efeito fotoelétrico (SERRA, 1984; NERY, 1990).

Quando os raios gama emitidos pela fonte de Césio-137 atingem a formação, interagem com os elétrons dos átomos ali presentes. Após sucessivas colisões, estes raios gama perdem parte de sua energia cinética, o que caracteriza o efeito Compton (O'BRIEN, 1992). Ao alcançarem um nível de energia tal que possibilite a sua absorção total por parte do átomo, gerando por parte deste a liberação de elétron e de radiação característica, temos caracterizado o denominado efeito fotoelétrico (MORSE, 1977a).

Como resultado da ocorrência desse processo como um todo, em um ponto situado a uma determinada distância da fonte, os raios gama remanescentes da formação podem ter uma energia variando de 662 KeV, correspondendo aos raios gama que não sofreram colisão, até um valor próximo de zero, para aqueles que sofreram inúmeras colisões. Os raios gama com nível de energia entre 180 e 540 KeV estão, de acordo com a teoria do efeito Compton, diretamente relacionados à densidade eletrônica (ρ_e) da formação e são registrados em ambos os detectores existentes. Por sua vez, os raios gama com nível de energia entre 40 e 80 KeV estão relacionados tanto com a densidade eletrônica quanto com o índice de absorção fotoelétrica (P_e), e são registrados pelo detector afastado.

Os raios gama registrados na região de altas energias do espectro, onde se observa a

predominância do efeito Compton, dão, por intermédio de sua taxa de contagem, a principal informação a respeito da densidade eletrônica da formação. Esta densidade está relacionada exponencialmente com a atenuação dos raios gama e guarda uma relação de proporção direta com a densidade volumétrica da formação ρ_b (ELLIS, 1987; ELLIS, 1990; LUTHI, 1992).

3.2 PERFIL DE POROSIDADE NEUTRÔNICA

O perfil de porosidade neutrônica ("Compensated Neutron Log - CNL") é uma medida do índice aparente de hidrogênio da formação e portanto, do seu conteúdo de fluidos. O seu princípio de medida baseia-se no fato de que nêutrons com energia cinética entre 4 e 6 MeV são emitidos continuamente por uma fonte isotópica de Amerício-Berílio a uma velocidade inicial de cerca de 10.000 km/s. Por causa do seu elevado poder de penetração, os nêutrons interagem elástica e inelasticamente com a formação e o próprio poço. A vida destes nêutrons é composta por quatro fases distintas, a saber: fase rápida ("fast"), fase de freiamento ("slowing down"), fase de difusão ("diffusion") e fase de captura ("capture") (SERRA, 1984).

Na fase de freiamento, ao atingir uma velocidade média de cerca de 2200 m/s, o nêutron adquire uma energia cinética de cerca de 0,025 eV a 25°C, equivalente à energia de vibração dos átomos em equilíbrio térmico e sendo por isto denominados de nêutrons termais (EISBERG & RESNICK, 1979). A densidade desses nêutrons nas vizinhanças do detector é que fundamenta o princípio de obtenção do perfil de porosidade neutrônica; isto é, os nêutrons termais que não sofreram captura por parte da formação são detectados pela ferramenta através de detectores compostos por Hélio-3 (He^3), em virtude deste isótopo apresentar uma seção de choque ("capture cross-section") grande no nível de energia termal e praticamente desprezível em níveis de energia mais elevados.

Dessa forma, após um complexo processo de detecção de nêutrons, cuja descrição foge aos objetivos deste trabalho, tem-se finalmente a informação a respeito dos espaços vazios da formação preenchidos com elementos ricos em hidrogênio (água, petróleo ou gás), ou seja, a respeito da porosidade (LINK, 1987) da formação, sendo ela geralmente fornecida na forma percentual.

3.3 PERFIL DE RAIOS GAMA

Existem na natureza isótopos que são naturalmente radioativos, ou seja, isótopos que espontaneamente se transformam em outros e, durante o processo de transformação, emitem

algumas formas de partículas e energia (MORSE, 1977b; O'BRIEN, 1992).

Como a Terra tem cerca de quatro bilhões e meio de anos, torna-se evidente que apenas os isótopos com tempo de vida $\approx$ tempo compreendido entre a primeira transformação e sua extinção total - desta ordem de grandeza devem ser os mais adequados para fins de pesquisa.

Dentre os isótopos naturalmente radioativos com tempo de vida daquela ordem de grandeza e que, além de liberarem partículas do tipo alfa e beta e energia, produzem uma quantidade apreciável de raios gama, estão o Potássio-40 (^{40}K), o Tório-232 (^{232}Th) e o Urânio-238 (^{238}U). Estes isótopos ocorrem predominantemente em folhelhos, argilas, sais potássicos, fosfatos, arenitos, conglomerados, siltitos, areias ricas em minerais feldspáticos e micáceos, zircão, monazita, carbonatos e rochas ígneas ácidas (granito, sienito e riolito).

As principais partículas produzidas em função da radioatividade natural de certos isótopos são, conforme citado anteriormente, as partículas alfa, beta e gama. Dentre as três, em razão do seu elevado poder de penetração em relação às outras duas, a "partícula" gama, que também pode ser considerada como uma onda eletromagnética semelhante à luz visível ou aos raios-X, serve de base para importantes técnicas de obtenção de perfis de poço.

A medição da radiação gama natural pode ser feita por intermédio de um tubo Geiger-Mueller, uma câmara de ionização ou um cintilômetro. A resposta da ferramenta é uma função da concentração total por peso dos elementos radioativos contidos na formação e da própria densidade desta. O perfil assim obtido, associado com o perfil do potencial espontâneo (SP), pode, além de fornecer a indicação da presença ou não de folhelho, auxiliar no cálculo do volume de folhelho (V_{sh}) presente na formação.

3.4 PERFIL MICRO-ESFÉRICO

O perfil micro-esférico ("Micro-Spherically Focused Log - MSFL") tem como princípio a medida da diferença de potencial elétrico entre duas superfícies equipotenciais aproximadamente esféricas, concêntricas e criadas por duas fontes de corrente distintas, I_0 e I_a . A superfície equipotencial externa está associada à corrente I_0 e, por ser maior, abrange a região da formação da qual se obtém a estimativa da resistividade.

Pela Lei de Ohm (HAYT JR., 1983), a intensidade da corrente elétrica (I_0) é inversamente proporcional à resistência (R) do material por ela atravessado e ambas estão vinculadas por meio da diferença de potencial elétrico (ΔV), medido entre duas superfícies desse material,

ou seja,

$$R = \frac{\Delta V}{I_0}. \quad (3.1)$$

Em razão das dimensões da área da formação abrangida pela superfície equipotencial externa e do princípio que rege a sua obtenção, o perfil micro-esférico, dentre uma grande gama de perfis, é o que melhor fornece a resistividade da zona lavada (R_{xo}) (SCHLUMBERGER, 1974; LUTHI, 1991).

3.5 PERFIS DE INDUÇÃO

Os perfis de dupla indução ("Dual Induction Log - DIL") têm um princípio de obtenção mais sofisticado em relação aos perfis micro-esféricos. Um oscilador produz uma corrente alternada de frequência e amplitude constantes numa bobina emissora. Esta corrente resulta na criação de um campo eletromagnético, o qual, por sua vez, induz "loops" de corrente na formação em volta da ferramenta (efeito Foucault). Cada um desses "loops" gera seu próprio campo eletromagnético. O campo eletromagnético total, representado pela soma dos campos individuais de cada "loop", é então detectado por uma bobina receptora, na forma de uma força eletromotriz, cuja intensidade é diretamente proporcional ao fluxo magnético, oriundo do campo eletromagnético total. Visto que as correntes de Foucault induzidas na formação são diretamente proporcionais à sua condutividade, a intensidade da força eletromotriz gerada na bobina receptora guarda também uma condição de proporcionalidade. Logo, isto fornece a informação necessária em relação à resistividade da formação através da sua recíproca, a condutividade. Esta informação estabelece a forma final do perfil de dupla indução, quer dizer, a forma do perfil de indução (de raio de investigação) médio (ILM) e do um perfil de indução (de raio de investigação) profundo (ILD).

4 - DADOS UTILIZADOS

4.1 ORIGEM DOS DADOS

Os perfis utilizados neste trabalho foram fornecidos pela PETROBRÁS (Petróleo Brasileiro S/A) e são oriundos de quatro poços que, por questões de sigilo empresarial, são designados apenas como poços A, B, C e D. Estes poços pertencem todos à Bacia Potiguar emersa, a qual apresenta grande variação litológica e ainda o aparecimento de camadas finas ("thin beds"), superfícies erosivas e estruturas como bioturbações, estratificações e concentrações de componentes argilosos (ZANINI & CORSINO, 1990).

Dos caracteres acima mencionados, o que deve ser realmente expressivo é a existência de camadas finas, tendo em vista que um dos objetivos deste trabalho é a determinação da resolução vertical do perfil ou a determinação da espessura mínima que cada camada deve ter para que seja possível a sua identificação por meio da análise do perfil.

4.2 PERFIS SELECIONADOS

Dentre a grande quantidade de perfis disponíveis, dois fatores ditaram a seleção dos perfis a serem utilizados na aplicação da metodologia proposta. O primeiro foi a existência da seção repetida, já que em geral esta seção é obtida apenas nos poços portadores de regiões críticas. O segundo foi o fato do perfil selecionado constar em pelo menos dois dos quatro poços utilizados. Esta última condição foi importante, tendo em vista a possibilidade de comparação entre os poços com mesmo tipo de perfil e cujas velocidades de perfilagem e intervalos de amostragem fossem iguais.

Além disso, foi levado em consideração também o fato de que no conjunto de perfis selecionados constarem as cópias de perfis fornecidas junto com os dados digitais. Isto foi importante porque, em caso de necessidade, torna exequível a digitalização daqueles perfis cujos dados digitais, por algum motivo, apresentassem algum tipo de problema.

De acordo com estes critérios, foram escolhidos quatro tipos genéricos de perfil, assim definidos: perfil de densidade (LDL), de porosidade neutrônica (CNL), de raios gama (GR) e de resistividade (MSFL, ILD e ILM).

4.3 OS POÇOS ESCOLHIDOS

Os poços fornecidos pela PETROBRÁS foram todos eles utilizados no sentido de, posteriormente, serem selecionados os resultados mais expressivos e cujas informações complementares - como porosidade média, testemunhos, etc. - fossem de obtenção exequível.

Com referência aos dados complementares e de importância crucial para o que se almeja obter, os intervalos de amostragem já vinham indicados no arquivo de dados e as velocidades de perfilagem foram todas elas calculadas com o auxílio das cópias recebidas juntamente com os dados digitais.

Haja vista a inexistência dos perfis de alta resolução com intervalo de amostragem menor que 0,20 m na forma digital e considerando-se que, de acordo com formulário anexo aos dados digitais, os perfis de raios gama e de porosidade neutrônica de alta resolução são obtidos com intervalo de amostragem de 0,0508 m e o perfil de densidade de alta resolução é obtido com intervalo de amostragem de 0,0254 m, foi efetuada a digitalização destes três perfis com os respectivos intervalos de amostragem. Logo, os perfis identificados por HGR05 e HNPO05 foram digitalizados com um intervalo de amostragem de 0,0508 m e o perfil identificado por HRHOB02, com um intervalo de amostragem de 0,0254 m.

A seleção do intervalo do poço a ser utilizado seguiu uma metodologia criteriosa. Inicialmente foi feita a escolha do trecho da seção repetida onde todos os perfis escolhidos (LDL, GR, MSFL, CNL, ILM e ILD) apresentavam valores diferentes de zero, sendo descartados também os trechos iniciais de leitura, representados por valores constantes. De posse do trecho selecionado da seção repetida, foi escolhido na seção principal o trecho correspondente em profundidade. No caso do trecho selecionado da seção principal ter alguma parte contendo valores indicativos de ausência (nulos) ou de início (repetidos) de leitura, esta parte contendo tais valores foi descartada, sendo igualmente descartada a parte correspondente em profundidade no trecho da seção repetida previamente selecionado.

Nesta fase não se mostrou de maior relevância a análise sobre um possível deslocamento relativo, em profundidade, entre os trechos selecionados das seções principal e repetida, uma vez que isto pudesse ser constatado por intermédio da análise do espectro de fase e, com a superposição posterior das duas seções, o resultado obtido fosse passível ou não de confirmação.

4.3.1 Formato dos Arquivos

No que diz respeito ao formato dos arquivos, todos eles têm o formato NC(2X, F8.3), onde NC é o numero de colunas que consta no arquivo; colunas estas que são devidamente identificadas em cada uma das subseções a seguir.

4.3.2 Poço A

O poço A teve selecionados os perfis de densidade (LDL), porosidade neutrônica (CNL), raios gama (GR) e micro-esférico (MSFL). A Tabela 4.1 contém os principais parâmetros a respeito do intervalo selecionado (extensão, porosidade neutrônica média, etc.) e dos perfis (velocidade de perfilagem, intervalo de amostragem, etc.).

O arquivo contendo o intervalo selecionado da seção principal recebeu a denominação de *pam.dm* e o arquivo contendo o trecho selecionado da seção repetida foi denominado de *par.dr*.

Dessa forma, para o poço A, temos que os seus arquivos são matrizes com 276 linhas e 6 colunas, as quais representam os seguintes parâmetros: coluna 1 - vetor referente ao intervalo de profundidade, coluna 2 - vetor referente ao perfil micro-esférico MSFL, coluna 3 - vetor referente ao perfil de densidade RHOB; coluna 4 - vetor referente ao perfil de porosidade neutrônica NPHI; coluna 5 - vetor referente ao perfil de porosidade neutrônica corrigida NPOR; coluna 6 - vetor referente ao perfil de raios gama GR.

Tabela 4.1 - Parâmetros Relativos ao Trecho Selecionado do Poço A.

Intervalo de amostragem	0,20 m ¹²
Velocidade de perfilagem	550 m/h
Profundidade mínima	239,000 m
Profundidade máxima	294,000 m
Quantidade de amostras	276
Porosidade neutrônica média	26%

¹²Intervalo de amostragem padrão utilizado pela PETROBRÁS na obtenção dos perfis normais dos poços utilizados neste trabalho, segundo formulário fornecido pela empresa junto com os dados digitais.

4.3.3 Poço B

O poço B teve selecionados os perfis de densidade (LDL), porosidade neutrônica (CNL), raios gama (GR), micro-esférico (MSFL) e de indução profundo (ILD). O perfil de indução profundo também foi selecionado a fim de possibilitar a comparação com o micro-esférico (MSFL), já que, sendo ambos perfis de resistividade com princípios de obtenção diferentes, vem a ser interessante tal comparação. Os principais parâmetros do intervalo selecionado e dos perfis estão indicados na Tabela 4.2.

O arquivo contendo o trecho selecionado da seção principal recebeu, seguindo a nomenclatura adotada, a denominação de *pbm.dm* e o arquivo contendo o trecho da seção repetida foi denominado de *pbr.dr*. Em ambos, a disposição dos perfis obedece àquela apresentada pelos arquivos do poço A, com o acréscimo, à esquerda e em cada um dos arquivos, da coluna referente ao perfil de indução profundo (ILD). Assim, ambos os arquivos são matrizes com 290 linhas e 7 colunas, estas últimas identificadas por profundidade, RHOB, NPHI, NPOR, GR e ILD.

Tabela 4.2 - Parâmetros Relativos ao Trecho Selecionado do Poço B.

Intervalo de amostragem	0,20 m
Velocidade de perfilagem	550 m/h
Profundidade mínima	717,200 m
Profundidade máxima	775,000 m
Quantidade de amostras	290
Porosidade neutrônica média	27%

4.3.4 Poço C

O poço C teve selecionados os perfis de densidade (LDL), porosidade neutrônica (CNL), raios gama (GR), micro-esférico (MSFL), indução profundo (ILD) e indução médio (ILM). O perfil de indução médio foi escolhido por possibilitar uma comparação com os outros dois perfis de resistividade, neste caso, o micro-esférico e o de indução profundo. Os principais parâmetros do intervalo selecionado e dos perfis estão indicados na Tabela 4.3.

O arquivo contendo o trecho selecionado da seção principal recebeu a denominação de *pcm.dm* e o arquivo contendo o trecho da seção repetida foi denominado de *pcr.dr*. Em ambos, a disposição dos perfis é a mesma adotada para os outros dois poços, tendo ocorrido

o acréscimo de uma oitava coluna, à esquerda e em cada um dos arquivos; coluna esta correspondente ao perfil de indução médio (ILM). Dessa forma, os dois arquivos são matrizes com 199 linhas e 8 colunas, sendo estas últimas identificadas por profundidade, RHOB, NPHI, NPOR, GR, ILD e ILM.

Tabela 4.3 - Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Poço C.

Intervalo de amostragem	0,20 m
Velocidade de perfilagem	920 m/h
Profundidade mínima	759,000 m
Profundidade máxima	798,600 m
Quantidade de amostras	199
Porosidade neutrônica média	22%

4.3.5 Poço D

O poço D foi o único cujas cópias de perfis de alta resolução continham a seção repetida. A falta de dados digitais dos perfis de alta resolução, para todos os quatro poços, com um intervalo de amostragem menor que 0,20 m, forçou a já mencionada digitalização dos perfis de raios gama (HGR05) e de porosidade neutrônica (HNPO05) de alta resolução, com um intervalo de amostragem de 0,0508 m, e de densidade de alta resolução (HRHOB02), com um intervalo de amostragem de 0,0254 m. Estes intervalos, de acordo com formulário recebido junto com os dados digitais, são os mais comumente utilizados pela PETROBRÁS na obtenção desses tipos de perfil na Bacia Potiguar.

4.3.5.1 Perfis Normais

O poço D teve seleccionados os perfis de densidade (LDL), porosidade neutrônica (CNL), raios gama (GR) e indução profundo (ILD). Em relação aos demais poços, faz-se nítida a ausência do MSFL, e em relação ao poço C, a ausência do ILM. Os principais parâmetros do intervalo seleccionado e dos perfis estão indicados na Tabela 4.4.

O arquivo contendo o trecho seleccionado da seção principal foi identificado por *pdm.dm* e o arquivo contendo o trecho seleccionado da seção repetida foi denominado de *pdr.dr*. Por causa da falta dos dois perfis de resistividade (MSFL e ILM) e considerando a quantidade de pontos amostrados, ambos os arquivos assumem a forma de matrizes com 313 linhas e 6 colunas; colunas estas que obedecem a seguinte disposição: coluna 1 - vetor referente à

profundidade, coluna 2 - vetor referente ao perfil de densidade (RHOB), coluna 3 - vetor referente ao perfil NPHI, coluna 4 - vetor referente ao perfil NPOR, coluna 5 - vetor referente ao perfil de raios gama (GR) e coluna 6 - vetor referente ao perfil de indução profundo (ILD).

Tabela 4.4 - Parâmetros Relativos ao Trecho Selecionado dos Perfis Normais do Poço D.

Intervalo de amostragem	0,20 m
Velocidade de perfilagem	550 m/h
Profundidade mínima	1058,200 m
Profundidade máxima	1120,600 m
Quantidade de amostras	313
Porosidade Neutrônica Média	24%

4.3.5.2 Perfis de Alta Resolução

Os perfis de alta resolução fornecidos por parte da PETROBRÁS, na forma digital, tinham todos eles intervalo de amostragem de 0,20 m.

Conforme citado anteriormente, um dos objetivos deste trabalho é a comparação da utilização de intervalos de amostragem diferentes. Como os perfis de alta resolução selecionados para tal comparação são obtidos com intervalos de amostragem de 0,0508 m e 0,0254 m, então foi executada a digitalização dos três perfis (HGR05, HNPOR05 e HRHOB02) onde, enfatizando-se uma vez mais, tais intervalos foram utilizados de acordo com informações contidas em formulário recebido junto com os disquetes que continham os dados digitais.

Quanto à disposição dos perfis, esta é diferente em relação àquela assumida pelos arquivos dos perfis normais, ou seja, os dados de ambas as seções foram guardados num mesmo arquivo, cuja disposição das colunas obedece o seguinte critério: coluna 1 - vetor correspondente à profundidade, coluna 2 - vetor pertinente aos dados da seção principal, e coluna 3 - vetor pertinente aos dados da seção repetida.

O arquivo contendo os intervalos selecionados das seções principal e repetida do perfil de raios gama de alta resolução, com um intervalo de amostragem de 0,20 m (HGR), foi denominado de *hgrd.dat* e assume a forma de uma matriz com 194 linhas e, de acordo com o parágrafo antecedente a este, 3 colunas. Os principais parâmetros do intervalo selecionado e do perfil encontram-se indicados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros Relativos ao Trecho Selecionado do Perfil (Digital) de Raios Gama de Alta Resolução (HGR) do Poço D.

Intervalo de amostragem	0,20 m
Velocidade de perfilagem	275 m/h
Profundidade mínima	1058,200 m
Profundidade máxima	1096,800 m
Quantidade de amostras	194

O arquivo contendo os intervalos selecionados das seções principal e repetida do perfil de porosidade neutrônica de alta resolução, com um intervalo de amostragem de 0,20 m (HNPO), foi denominado de *hnpod.dat* e adquire a forma de uma matriz com 213 linhas e também 3 colunas. Os principais parâmetros do intervalo selecionado e do perfil encontram-se indicados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Parâmetros Relativos ao Trecho Selecionado do Perfil (Digital) de Porosidade de Alta Resolução (HNPO) do Poço D.

Intervalo de amostragem	0,20 m
Velocidade de perfilagem	275 m/h
Profundidade mínima	1058,200 m
Profundidade máxima	1100,600 m
Quantidade de amostras	213

O arquivo contendo os intervalos selecionados das seções principal e repetida do perfil de densidade de alta resolução, com um intervalo de amostragem de 0,20 m (HRHOB), foi denominado de *hrhobd.dat* e tem a forma de uma matriz com 242 linhas e, obviamente, 3 colunas. Os principais parâmetros do intervalo selecionado e do perfil de raios gama encontram-se indicados na Tabela 4.7.

Os arquivos contendo os intervalos selecionados das seções principal e repetida, obtidas por meio da digitalização das cópias de perfil e pertinentes ao perfil de raios gama de alta resolução, receberam, respectivamente, as denominações de *hgr05m.dm* e *hgr05r.dr* e assumem a forma de matrizes com 766 linhas e 2 colunas. A primeira coluna representa o vetor relativo à profundidade, e a segunda coluna, o vetor relativo à seção a que se refere o arquivo, ou seja, à seção principal, no primeiro arquivo, e à seção repetida, no segundo arquivo. A Tabela 4.8 contém os principais dados a respeito do intervalo selecionado e do perfil.

Tabela 4.7 - Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Perfil (Digital) de Densidade de Alta Resolução (HRHOB) do Poço D.

Intervalo de amostragem	0,20 m
Velocidade de perfilagem	275 m/h
Profundidade mínima	1058,200 m
Profundidade máxima	1106,400 m
Quantidade de amostras	242

Os arquivos contendo os intervalos seleccionados das seções principal e repetida, obtidas por meio da digitalização das cópias de perfil e pertinentes ao perfil de porosidade neutrônica de alta resolução, receberam, respectivamente, as denominações de *hnpo05m.dm* e *hnpo05r.dr* e assumem a forma de matrizes com 825 linhas e 2 colunas; com a disposição das colunas obedecendo ao mesmo critério adotado para o perfil de raios gama de alta resolução. A Tabela 4.9 contém os principais dados a respeito do intervalo seleccionado e do perfil.

Tabela 4.8 - Parâmetros Relativos ao Trecho Seleccionado do Perfil (Digitalizado) de Raios Gama de Alta Resolução (HGR05) do Poço D.

Intervalo de amostragem	0,0508 m
Velocidade de perfilagem	275 m/h
Profundidade mínima	1058,200 m
Profundidade máxima	1097,000 m
Quantidade de amostras	766

Os arquivos contendo os intervalos seleccionados das seções principal e repetida, obtidas por meio da digitalização das cópias de perfil e pertinentes ao perfil de densidade de alta resolução, receberam, respectivamente, as denominações de *hrhob02m.dm* e *hrhob02r.dr*, assumindo a forma de matrizes com 1852 linhas e 2 colunas; colunas estas cuja disposição segue o mesmo critério até aqui adotado para os dois perfis anteriores. A Tabela 4.10 contém os principais dados a respeito do intervalo seleccionado e do perfil.

Tabela 4.9 - Parâmetros Relativos ao Trecho Selecionado do Perfil (Digitalizado) de Porosidade de Alta Resolução (HNPO05) do Poço D.

Intervalo de amostragem	0,0508 m
Velocidade de perfilagem	275 m/h
Profundidade mínima	1058,200 m
Profundidade máxima	1100,000 m
Quantidade de amostras	825

Tabela 4.10 - Parâmetros Relativos ao Trecho Selecionado do Perfil (Digitalizado) de Densidade de Alta Resolução (HRHOB02) do Poço D.

Intervalo de amostragem	0,0254 m
Velocidade de perfilagem	275 m/h
Profundidade mínima	1058,200 m
Profundidade máxima	1105,200 m
Quantidade de amostras	1852

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise a ser feita a seguir tem por base a adoção de um critério geral que é a utilização dos resultados sob a forma de gráficos, cujo conteúdo, para cada um dos itens a serem avaliados (repetição, velocidade de perfilagem, intervalo de amostragem, etc.), seguiu parâmetros de uniformidade entre os dados analisados, definidos da seguinte forma:

- Para a avaliação dos resultados quanto à repetição, foram utilizados perfis de um mesmo poço, com mesmo intervalo de amostragem e mesma velocidade de perfilagem.
- Para a avaliação do intervalo de amostragem, foram utilizados os resultados pertinentes aos perfis de alta resolução com dois intervalos de amostragem diferentes, ou seja, permanecendo constante a velocidade de perfilagem (275 m/h), o tipo de perfil (LDL, CNL e GR) e o poço gerador deste (poço D).
- Para a avaliação da velocidade de perfilagem, foram utilizados os resultados pertinentes aos perfis normal e de alta resolução, com mesmo intervalo de amostragem, mesmo filtro (ou quantidade de pontos) e pertencentes ao mesmo poço (poço D).
- Para a comparação entre os poços, recorreu-se aos resultados fornecidos pelo mesmo tipo de perfil, com mesmo intervalo de amostragem, mesma velocidade de perfilagem e mesmo filtro (512 pontos).
- Para a avaliação quanto à resolução vertical, foram utilizados os resultados pertinentes ao mesmo tipo de perfil, independentemente dos demais parâmetros.

Uma exceção foi feita quando da avaliação da repetição em relação aos perfis de resistividade do poço C. Os resultados foram os únicos obtidos com a aplicação do filtro dimensionado para 256 pontos (vide Tabela 2.1), logo, apesar de serem diferentes perfis de resistividade (MSFL, ILD e ILM), todos foram submetidos à mesma filtragem ($EX = 0,0900 \times n$).

5.1 QUANTO À REPETIÇÃO DOS PERFIS SELECIONADOS

De acordo com o princípio de obtenção de cada perfil, é evidente o aumento da sensibilidade à presença do ruído aleatório quando colocamos em seqüência os perfis de resistividade,

de porosidade neutrônica e de raios gama. Isto acontece por serem os perfis de resistividade obtidos como uma forma de leitura direta da condutividade da formação; o perfil de porosidade neutrônica estar ligado a uma radioatividade, digamos, induzida; e o perfil de raios gama estar baseado numa radioatividade natural e, por isto mesmo, mais sujeito à influência do ruído aleatório.

Em vista disto, podemos ver que, pela análise da Figura 5.1, o perfil micro-esférico apresenta uma boa repetição na faixa de frequência abaixo de 1,3 ciclos/m. Para limites acima desta faixa, a repetição torna-se no mínimo regular, ou com o nível do sinal bem acima do nível de confiança de 95%.

O perfil de porosidade neutrônica apresenta boa repetição na faixa de frequência abaixo de cerca de 0,3 ciclos/m. Para frequências acima deste valor e menor do que 1,9 ciclos/m, sua repetição torna-se regular e o sinal ainda se situa acima do nível de confiança de 95%. Porém, para valores da frequência acima de 1,9 ciclos/m a coerência qualitativamente decai, não sendo mais possível definir o que é sinal ou o que é ruído, e, por este motivo, torna-se inadequado falar-se a respeito de repetição para frequências acima de cerca de 2,2 ciclos/m.

O perfil de raios gama apresenta boa repetição na faixa de frequência inferior a cerca de 0,3 ciclos/m. A partir deste limite e até aproximadamente 1,1 ciclos/m, a repetição detém um nível de regularidade. Contudo, no intervalo de 1,1 ciclos/m até cerca de 2,0 ciclos/m, a coerência se situa acima do nível de confiança de 50%, o que indica a supremacia do sinal em relação ao ruído aleatório. O mesmo não ocorre para os níveis de frequência acima de 2,0 ciclos/m, ou seja, a partir deste valor de frequência, a coerência oscila em torno do nível de confiança de 50%, indicando a impossibilidade de definição para a presença do sinal e, como decorrência, tornando inadequado falar-se sobre repetição à esta altura.

Ao se considerar a análise acima, observa-se que o resultado obtido está de acordo com o teoricamente esperado, isto é, o perfil de resistividade ter melhor repetição do que o perfil de porosidade neutrônica, e este, por sua vez, ter melhor repetição do que o perfil de raios gama. Este resultado coaduna com os resultados apresentados em trabalho já existente (KERFORD & GEORGI, 1990).

Agora, com relação aos perfis de resistividade propriamente ditos, em função de possuírem um princípio de obtenção mais sofisticado, é esperado que os perfis de indução apresentem um nível de ruído menor do que, por exemplo, o perfil micro-esférico. Um fator que serve para alicerçar esta comparação é a presença de eletrodos apenas no perfil de micro-resistividade, ou seja, por não utilizar eletrodos na sua constituição, a ferramenta de indução detém assim uma fonte a menos de ruídos, à presença dos quais, por conseguinte, não estarão sujeitos os dados por ela gerados.

Assim, é esperado que os perfis de indução tenham uma repetição melhor do que a do perfil micro-esférico. Entretanto, em relação aos perfis de indução em si, qual dos dois perfis deve, teoricamente, deter uma melhor repetição ? De acordo com a extensão da área abrangida pelo perfil, o que implica numa quantidade maior de fontes de ruído, temos que a repetição do perfil de indução médio deve ser melhor, mesmo que seja pequena a diferença, do que a repetição do perfil de indução profundo.

Sob este ponto de vista, os resultados ilustrados na Figura 5.2 confirmam o que foi exposto: a análise da Figura indica uma repetição muito boa para os perfis de indução até cerca de 0,5 ciclos/m, o mesmo não ocorrendo com o perfil micro-esférico, que tem uma boa repetição apenas até cerca de 0,2 ciclos/m. Para uma frequência máxima de cerca de 1,9 ciclos/m a repetição do perfil micro-esférico mantém-se apenas num nível de regularidade e, no intervalo de 1,9 ciclos/m a cerca de 2,1 ciclos/m, há ainda a predominância do sinal em relação ao ruído aleatório. Esta predominância não está mais presente na faixa de frequência acima de cerca de 2,4 ciclos/m (ver Tabela 2.3), pois, a coerência tende a oscilar em torno do nível de confiança de 50% e, com isto, chega a fornecer uma resolução vertical de 0,211 m.

O perfil de indução profundo apresenta boa repetição até cerca de 1,2 ciclos/m, situando-se a sua coerência acima do nível de confiança de 95%, até cerca de 1,9 ciclos/m. Para as frequências mais altas, a coerência, apesar de em um ponto situar-se abaixo do nível de confiança de 50%, tende a manter-se um pouco acima deste nível, o que indica a predominância do sinal sobre o ruído aleatório no restante do espectro de frequência analisado.

O perfil de indução médio tem boa repetição até o limite de aproximadamente 1,1 ciclos/m e sua coerência mantém-se acima do nível de confiança de 95% até cerca de 2,0 ciclos/m. Da mesma maneira como ocorre com o perfil de indução profundo, há a predominância do sinal por todo o espectro de frequência analisado, haja visto a coerência situar-se no mínimo entre os níveis de confiança de 90% e 50%, sem jamais ocorrer valores abaixo deste último nível e estarem as componentes de frequências mais altas, mais próximas do nível de confiança de 50%.

Dessa forma, temos confirmado o fato da repetição do perfil de indução médio ser qualitativamente melhor do que a repetição do perfil de indução profundo, e a repetição deste último perfil ter melhor qualidade do que a repetição do perfil micro-esférico.

Todavia, um fato que chama a atenção é que, de um modo geral, as repetições dos três perfis analisados estão muito aquém do esperado, pois, de acordo com o resultado obtido para o perfil micro-esférico do poço A, ilustrado na Figura 5.1, todos os três deveriam apresentar uma coerência acima do nível de confiança de 95%. Por que isto não ocorre ? Ora, um fator que deve servir como justificativa para uma repetição fora dos níveis normais para os

três perfis em questão é a velocidade de perfilagem utilizada. A velocidade de perfilagem de 920 m/h é totalmente inadequada para a obtenção de tais perfis no poço C ou, para esta velocidade, a presença do ruído está acima dos níveis normalmente encontrados em perfis de resistividade obtidos com velocidade de perfilagem menor (veja, por exemplo, o perfil micro-esférico do poço A).

5.2 QUANTO À VELOCIDADE DE PERFILAGEM UTILIZADA

Tendo em vista a estatística presente na obtenção dos perfis, isto nos leva a considerar, na avaliação dos resultados obtidos com a variação da velocidade de perfilagem, apenas os perfis que são obtidos por meio da contagem estatística da radiação gama natural e da radiação gama induzida, mesmo que se saiba que tal variação de velocidade também tem seus efeitos nos demais perfis, como o perfil de resistividade, por exemplo. Contudo, levando-se em consideração os princípios de obtenção dos perfis, está claro que os efeitos da variação da velocidade de perfilagem devem ser muito mais nocivos aos perfis radioativos. Isto ocorre porque, nestes perfis, cada amostra representa uma média da contagem de radiação em volta do ponto considerado. Como uma menor velocidade da ferramenta implica obrigatoriamente numa maior contagem da radiação emanada da formação, isto assegura uma menor instabilidade estatística para a amostra aí obtida, quando comparada com outra amostra resultante de uma velocidade de perfilagem maior.

A Figura 5.3 contém os resultados obtidos com a utilização de duas velocidades. O perfil de densidade normal foi obtido com velocidade de perfilagem considerada normal ou cerca de 550 m/h, enquanto que o perfil de densidade de alta resolução foi adquirido com velocidade de perfilagem correspondente à metade da velocidade de perfilagem anterior, cerca de 275 m/h.

Para o perfil de densidade normal, a repetição é boa até cerca de 0,9 ciclos/m e regular desde esta frequência até cerca de 2,2 ciclos/m. Fato realmente importante a ser levado em consideração é a coerência situar-se no mínimo entre os níveis de confiança de 95% e 90%, inclusive na frequência máxima ou 2,5 ciclos/m.

Já o perfil de densidade de alta resolução apresenta uma boa repetição também até cerca de 0,9 ciclos/m. O intervalo no qual a repetição apresenta um nível de regularidade é menor do que o intervalo relativo ao perfil normal, indo desde um pouco acima dos 0,9 ciclos/m até cerca de 1,6 ciclos/m. A coerência mantém-se acima do nível de confiança de 95% até aproximadamente 1,9 ciclos/m e decai vertiginosamente para um nível situado entre os níveis de confiança de 90% e 50% nas frequências maiores. As componentes de frequências mais

elevadas contêm uma tendência para a coerência estabilizar-se em torno do nível de confiança de 90%, um nível que pode ser considerado como ótimo, uma vez que se trata de um perfil radioativo.

A Figura 5.4 apresenta os resultados da utilização de duas velocidades de perfilagem (275 e 550 m/h) para os perfis de raios gama.

O perfil obtido com velocidade normal (GR) tem uma boa repetição para frequências menores do que 0,5 ciclos/m. Para frequências que vão desde 0,5 ciclos/m até cerca de 1,8 ciclos/m, pode-se admitir um certo grau de regularidade na repetição. A partir deste último valor da frequência, a maior parte da coerência tende a se situar entre os níveis de confiança de 90% e 50%, sendo este nível mínimo ultrapassado ligeiramente em cerca de 2,0 ciclos/m e 2,3 ciclos/m. Porém, é importante frisar a tendência da coerência permanecer um pouco abaixo do nível de confiança de 90% nas frequências mais elevadas, indicando uma presença marcante do sinal.

Enquanto isto, o perfil de raios gama obtido com velocidade menor praticamente tem o mesmo comportamento quanto à repetição do perfil normal. Excetuam-se apenas o fato da sua coerência atingir um valor abaixo do nível de confiança de 95% nas frequências maiores do que 2,0 ciclos/m e a nítida tendência que ela apresenta em permanecer em torno de um valor em média muito próximo do nível de confiança de 50%, nas frequências mais elevadas. Esta última característica é importantíssima na comparação entre os dois resultados obtidos com a variação da velocidade de perfilagem, pois, quando ela é considerada, torna-se evidente que nos perfis normais a componente do sinal restante nas frequências mais altas é consideravelmente maior do que a componente do sinal restante do perfil de alta resolução.

A Figura 5.5 serve para se avaliar os resultados relativos aos perfis de porosidade neutrônica normal, obtido com velocidade de 550 m/h, e porosidade neutrônica de alta resolução, obtido com velocidade de 275 m/h.

O perfil de porosidade neutrônica normal tem uma ótima repetibilidade até cerca de 0,3 ciclos/m. A partir desta frequência e até aproximadamente 1,7 ciclos/m, podemos considerar a repetição como sendo boa. Para frequências maiores, é nítida a predominância do sinal na faixa situada entre os níveis de confiança de 90% e 50% para o intervalo de frequência que se inicia em torno de 1,9 ciclos/m e termina em torno de 2,3 ciclos/m. Frequências acima deste intervalo indicam que a parte predominante ainda corresponde ao sinal, por isto a coerência tende a se situar entre os níveis de confiança mais elevados, ou seja, 95% e 90%.

O perfil de porosidade neutrônica de alta resolução, por sua vez, detém uma repetição a ser considerada de ótima a muito boa no limite de aproximadamente 2,1 ciclos/m. No

intervalo de cerca de 2,2 ciclos/m até cerca de 2,4 ciclos/m, isto é, numa faixa de apenas 0,2 ciclos/m, a coerência tem seu valor predominantemente situado entre os níveis de confiança de 90% e 50%. Para a faixa correspondente ao limite superior do espectro de frequência utilizado no estudo, ou seja, de 2,4 ciclos/m a 2,5 ciclos/m, a coerência tem seu valor situado entre os níveis de confiança de 95% e 90%, indicando que o sinal, mesmo nesta faixa de frequência, é bastante superior ao ruído aleatório.

Em razão da nítida supremacia da coerência do perfil de porosidade neutrônica de alta resolução em comparação à coerência do perfil de porosidade neutrônica normal, podemos deduzir que a redução da velocidade de perfilagem para este tipo de perfil e poço se apresenta como sendo vantajosa, mesmo que o perfil normal tenha componentes do sinal superiores às componentes do ruído aleatório nas frequências mais elevadas.

5.3 QUANTO À VARIAÇÃO DO INTERVALO DE AMOSTRAGEM

A variação do intervalo de amostragem geralmente acompanha a variação da velocidade de perfilagem de modo direto, isto é, para uma velocidade de perfilagem menor geralmente se utiliza um intervalo de amostragem também menor. E esta combinação, surgindo da necessidade de se obter um detalhamento adequado de uma determinada zona do poço, tida como problemática ou crítica, acarreta, com relação à diminuição do intervalo de amostragem, um aumento na quantidade de dados a ser processada e, desse modo, força a realização de um estudo mais cuidadoso dos resultados obtidos. Isto ocorre tanto sob o ponto de vista financeiro quanto sob o ponto de vista técnico. Assim, tecnicamente, é esperado que a diminuição do intervalo de amostragem represente um ganho na resolução vertical do perfil, por intermédio de uma melhor repetição das seções obtidas, ou, em outras palavras, a repetição do perfil assim obtido seja qualitativamente superior à repetição do perfil adquirido com intervalo de amostragem maior.

A Figura 5.6 ilustra a coerência pertinente ao perfil de raios gama de alta resolução obtido com intervalo de amostragem de 0,20 m (HGR) e, conforme pode ser constatado, é a mesma coerência ilustrada em forma de linha tracejada na Figura 5.4, e cuja análise foi exposta na subseção antecedente. Esta mesma Figura apresenta também a coerência para o perfil de raios gama de alta resolução, digitalizado com intervalo de amostragem de 0,0508 m. Para uma frequência de até aproximadamente 0,5 ciclos/m, o perfil apresenta uma repetição que pode ser considerada como sendo muito boa. No intervalo de 0,5 ciclos/m a 1,4 ciclos/m, o perfil mostra uma boa repetição e a coerência mantém-se acima do nível de confiança de 95% para uma frequência de até aproximadamente 2,0 ciclos/m. Em seguida, o valor da coerência

diminui e tende a se situar abaixo do nível de confiança de 50%, a partir de cerca de 2,9 ciclos/m até cerca de 6,5 ciclos/m. Como, para as frequências maiores do que 6,5 ciclos/m, a coerência tende a oscilar em torno do nível de confiança de 50%, então 2,9 ciclos/m deve ser o ponto considerado como limite máximo de frequências úteis, ou seja, ponto a partir do qual já não se pode definir o sinal em relação ao ruído aleatório ou vice-versa e, por esta razão, utilizado para o cálculo da resolução vertical do perfil. Desse modo, podemos afirmar que o intervalo de frequência útil do perfil tem como limite superior 2,9 ciclos/m e que, por esse motivo, o intervalo de amostragem de 0,0508 m é benéfico em comparação a um intervalo de amostragem de 0,20 m. Isto, porque no intervalo de amostragem de 0,20 m ainda resta uma componente do sinal um pouco acima do nível de confiança de 50% para as componentes de frequência máxima (2,5 ciclos/m). No caso do perfil digitalizado, para o limite de 2,5 ciclos/m, mantém-se uma coerência com valor muito acima daquele nível de confiança, sem jamais ter assumido valores abaixo deste nível até 2,9 ciclos/m.

A coerência relativa ao perfil de porosidade neutrônica de alta resolução com intervalo de amostragem de 0,20 m encontra-se ilustrada na Figura 5.7, a qual corresponde à mesma coerência ilustrada, em forma de linha tracejada, na Figura 5.5 e cuja análise encontra-se exposta também na subseção antecedente.

A coerência relativa ao perfil de porosidade neutrônica de alta resolução com intervalo de amostragem de 0,0508 m também está ilustrada na Figura 5.7. Para frequências de até aproximadamente 2,0 ciclos/m, o perfil tem uma boa repetição e sua coerência mantém-se acima do nível de confiança de 95% para uma frequência máxima de cerca de 3,1 ciclos/m. Frequências acima deste valor mostram uma coerência inicialmente abaixo do nível de confiança de 50% e, posteriormente, assumindo uma tendência a se estabilizar um pouco abaixo do nível de confiança de 90%. Mas as componentes de frequências mais altas indicam a presença do sinal muito maior do ruído, já que, na frequência máxima, a coerência situa-se acima do nível de confiança de 90%. Esta tendência em se situar entre os níveis de confiança maiores, resguardados os níveis de frequência, é muito semelhante à tendência apresentada pelo perfil com intervalo de amostragem de 0,20 m, o que torna evidente a presença do sinal em ambos os perfis, mesmo tendo sido os perfis com intervalo de amostragem de 0,0508 m obtidos por meio da digitalização das cópias. Este resultado, então, é importantíssimo a fim de que, caso ela venha a ocorrer, seja descartada definitivamente a hipótese de que o erro advindo da mencionada digitalização tenha condições de invalidar os resultados aqui apresentados.

O perfil de densidade de alta resolução com intervalo de amostragem de 0,20 m tem sua coerência ilustrada na Figura 5.8, que é a mesma coerência apresentada, em forma de linha

tracejada, na Figura 5.3 e cuja análise, seguindo o indicado em relação aos outros dois perfis de alta resolução com intervalo de amostragem de 0,20 m, encontra-se exposta também na subseção anterior a esta.

O perfil de densidade de alta resolução com intervalo de amostragem de 0,0254 m tem também sua coerência apresentada na Figura 5.8. A repetição é boa para frequências de até cerca de 1,1 ciclos/m e a coerência situa-se acima do nível de confiança de 95% para frequências de aproximadamente 3,2 ciclos/m. A partir de 5,6 ciclos/m, já o ruído aleatório supera o sinal, pois, a coerência situa-se muito abaixo do nível de confiança de 50% e, com isto, indica a ausência de qualquer componente do sinal para valores de frequência superiores àquele. Isto nos leva a deduzir que o aumento no intervalo de amostragem é benéfico, uma vez que o intervalo de predominância do sinal, sobretudo acima do nível de confiança máximo, é bem maior do que o intervalo de predominância do sinal no gráfico do perfil normal.

5.4 QUANTO À RESOLUÇÃO VERTICAL

De acordo com a definição de resolução vertical aqui utilizada, a melhor resolução vertical é aquela que tem menor valor, ou seja, a avaliação de um determinado tipo de perfil, normal ou de alta resolução, baseada na resolução vertical, é feita levando-se em conta sempre a espessura mínima da camada que o perfil pode fornecer. Quanto menor for esta espessura, melhor será o perfil a ela associado.

Dessa maneira, de acordo com a Tabela 2.4 (valores da resolução vertical para diversos perfis), o melhor resultado é obtido com o perfil de densidade de alta resolução com intervalo de amostragem de 0,0254 m, já que a resolução vertical a ele associada é de 0,089 m ou cerca de três vezes e meia o intervalo de amostragem utilizado. Em seguida, vem o perfil de raios gama de alta resolução com intervalo de amostragem de 0,0508 m com uma resolução vertical de 0,171 m ou cerca de três vezes o intervalo de amostragem utilizado. Por último, tem-se o perfil de raios gama normal, com uma resolução vertical de 0,245 m ou aproximadamente 1,2 vezes o intervalo de amostragem utilizado.

Levando-se em consideração a porosidade neutrônica média de cada poço, o resultado coaduna com a resposta esperada, quer dizer, a resolução vertical de um perfil é uma função direta do ruído aleatório que o perfil contém. Por isso, como em geral o nível do ruído aleatório aumenta à medida em que a porosidade aumenta, é óbvio que, ao serem consideradas as mesmas condições (intervalo de amostragem e velocidade) de perfilagem, a melhor resolução vertical fatalmente estará ligada ao poço com menor porosidade. Como o poço A tem uma porosidade neutrônica média de 26% e o poço D tem uma porosidade neutrônica média de

24%, caso se estivesse comparando perfis com mesmas condições de perfilagem, o melhor resultado deveria ser associado ao poço D. Entretanto, levando-se em consideração que a diminuição do intervalo de amostragem é benéfica para o perfil de raios gama de alta resolução do poço D, tem-se como justificativas para a sua resolução vertical ser melhor do que a resolução vertical do perfil de raios gama normal do poço A, o fato da porosidade neutrônica média e do intervalo de amostragem menores estarem relacionados com o poço D.

Agora, uma exceção é a presença do perfil micro-esférico do poço C na Tabela 2.4, pois, presume-se, levando-se em consideração o resultado obtido para o poço A, que em condições normais de velocidade de perfilagem, seria inquestionável a sua ausência daquela Tabela.

5.5 QUANTO AOS POÇOS

É sabido que, por mais parecidos que sejam, os poços jamais são inteiramente iguais. Por maior que seja a semelhança entre dois ou mais poços, jamais os perfis por eles gerados são exatamente iguais. Entrementes, é possível, por meio dos resultados obtidos até agora, fazer-se uma comparação entre os resultados de determinados poços para um mesmo perfil e, por intermédio desta comparação, saber-se qual o nível de similaridade existente. Fornecendo esta comparação uma similaridade muito próxima entre os poços, isto deve favorecer a discriminação do conjunto de caracteres semelhantes encontrados e, portanto, auxiliar na adoção de medidas que visem obter o melhor perfil para determinado poço; isto é, se na análise em questão concluir-se que um determinado perfil radioativo normal apresenta resposta semelhante em dois ou mais poços distintos e o perfil de alta resolução correspondente é apenas utilizado em um dos poços e tem uma resposta melhor do que o perfil normal, então é óbvio que deverá ser tentada a obtenção deste perfil de alta resolução naqueles poços cuja resposta do perfil normal foi semelhante à resposta do perfil normal do poço onde o perfil de alta resolução foi obtido. No caso dos poços terem características geológicas muito semelhantes, isto pode dispensar a obtenção do perfil de alta resolução nos outros poços.

Os perfis de raios gama normais dos poços A, B e D têm suas coerências ilustradas na Figura 5.9.

A análise da coerência do perfil de raios gama normal do poço A foi exposta quando da avaliação da repetição de diferentes perfis, portanto, resta apenas analisar os resultados fornecidos pelos perfis de raios gama normais dos poços B e D.

Segundo a Figura 5.9, o poço B demonstra uma boa repetição para uma frequência máxima de cerca de 0,6 ciclos/m e uma repetição que pode ser considerada como regular no intervalo de 0,6 ciclos/m a 1,4 ciclos/m. A coerência perdura acima do nível de confiança

de 95% até cerca de 1,9 ciclos/m e passa a assumir, de modo definitivo, valores abaixo do nível de confiança de 50% a partir de 2,3 ciclos/m, o que possibilita o cálculo da resolução vertical do perfil, que é de 0,217 m.

Para o gráfico relativo ao perfil de raios gama do poço D, infelizmente não se pode utilizar a análise feita no parágrafo sobre a utilização de diferentes velocidades de perfilagem porque se considera obrigatório na comparação entre perfis de mesmo tipo, que os mesmos tenham sido submetidos à mesma filtragem. Quer dizer, como o resultado exposto na Figura 5.4 foi obtido com o perfil sendo submetido ao filtro dimensionado para 256 pontos, ele jamais deve ser utilizado numa comparação com os resultados oriundos de uma filtragem dimensionada para 512 pontos. E é justamente isto, filtros diferentes fornecerem resultados também diferentes, que faz com que o resultado apresentado pelo perfil de raios gama normal do poço D, sob o efeito de um filtro dimensionado para 512 pontos (linha pontilhada da Figura 5.9), seja bastante diferente daquele resultado apresentado pelo mesmo perfil quando submetido a uma filtragem dimensionada para 256 pontos (linha cheia da Figura 5.4).

A análise do gráfico da coerência correspondente ao perfil de raios gama normal do poço D, sob o efeito do filtro dimensionado para 512 pontos, fornece uma boa repetição até cerca de 0,8 ciclos/m, com a coerência assumindo valor acima do nível de confiança de 95% até aproximadamente 2,2 ciclos/m e, em média, entre os níveis de confiança de 90% e 50% até aproximadamente 2,4 ciclos/m. A partir deste limite, há uma tendência da coerência oscilar em torno do nível de confiança mínimo. Como o intervalo final de 0,1 ciclos/m é muito pequeno e não há realmente uma definição nítida quanto à forma a ser assumida pela coerência, se acima ou abaixo daquele nível, torna-se inconveniente tomar-se o limite de 2,4 ciclos/m ou outro limite acima deste para o cálculo da resolução vertical do perfil.

O resultado final obtido diz que, excetuando-se o intervalo de frequência de 1,9 ciclos/m a 2,1 ciclos/m, o comportamento médio da coerência do perfil de raios gama normal do poço A está mais próximo do comportamento da coerência do perfil de raios gama normal do poço D, o que induz a crer que, como um intervalo de amostragem menor foi benéfico para o poço D, provavelmente uma redução no intervalo de amostragem também surtisse efeito semelhante quando aplicado ao poço A.

Os perfis de porosidade neutrônica normais dos poços A, B e D, apresentam as coerências indicadas na Figura 5.10, que evidenciam muito mais o efeito, anteriormente mencionado, da porosidade sobre o perfil a ser obtido quando comparadas, por exemplo, com as coerências relativas aos perfis de raios gama desses mesmos poços. Conforme dito antes, uma porosidade menor implica geralmente numa quantidade menor de ruído e, por isso, também numa melhor qualidade dos perfis radioativos.

O poço B, por ter uma porosidade neutrônica média maior dentre os três poços, apresenta uma má repetição para o perfil de porosidade neutrônica normal.

O poço A apresenta uma repetição intermediária, ou seja, não tão ruim como a repetição do poço B e nem tão boa quanto a repetição do poço D, devendo isto ser atribuído ao fato de sua porosidade neutrônica média assumir um valor intermediário (26%) em relação aos outros dois poços.

Finalmente, o poço D, por deter, entre os três poços, a menor porosidade neutrônica média (24%), é quem tem melhor repetição em relação ao perfil de porosidade neutrônica normal. A curva correspondente à coerência deste perfil situa-se sempre acima das demais curvas, indicando com isto uma repetição qualitativamente superior às demais repetições.

5.6 QUANTO AO ESPECTRO DE FASE

Os espectros de fase dos perfis manipulados neste trabalho apresentaram uma configuração que confirma o resultado teoricamente esperado. Como a maior parte dos perfis não tinha as seções principal e repetida exatamente iguais e não apresentavam estas seções deslocamento relativo entre si, os espectros de fase resultantes destes perfis tinham valores próximos de zero nas frequências mais baixas, ou até cerca de 2,0 ciclos/m, e distorções na forma de picos acentuados nas frequências acima deste valor.

Entretanto, a análise do espectro de fase do perfil de raios gama normal do poço C (Figura 5.11) indicou, segundo o ilustrado na Figura 2.15c, um deslocamento relativo entre as seções principal e repetida, o que foi confirmado pela superposição das duas seções (Figura 5.12).

O espectro da Figura 5.11 apresenta-se aproximadamente reto até 1,8 ciclos/m, o que caracteriza o deslocamento relativo em profundidade entre as duas seções. As pequenas distorções presentes naquele intervalo em relação a uma reta propriamente dita e aquelas distorções nas frequências acima de 1,8 ciclos/m devem-se ao fato dos perfis não serem exatamente iguais.

5.7 QUANTO À RAZÃO SINAL-RUÍDO

A Figura 5.13 ilustra a razão sinal-ruído dos perfis de raios gama dos poços A, B e D. Ao se compará-la com a Figura 5.9, torna-se evidente o fato da diferença de porosidade entre os poços não ter sido grande o suficiente para que fosse detectada o seu efeito naqueles perfis. A Figura 5.9 apresenta nas frequências mais baixas uma ligeira, e não tão clara assim,

superioridade qualitativa do perfil de raios gama do poço D. Contudo, a Figura 5.13 evidencia esta superioridade, principalmente se forem considerados o valor médio relativo a cada uma das curvas nela apresentadas.

A Figura 5.14 ilustra a razão sinal-ruído para os perfis de porosidade neutrônica dos poços A, B e D. O resultado obtido confirma ainda mais o efeito mais evidente da porosidade sobre este tipo de perfil, o que coaduna com o resultado indicado na Figura 5.10.

5.8 QUANTO AOS ESPECTROS DE POTÊNCIA DO SINAL E DO RUÍDO

A Figura 5.15 ilustra os espectros de potência dos sinais das seções principal e repetida do perfil de raios gama do poço A. Conforme já era de se esperar, os espectros são quase idênticos. Há uma ligeira superioridade, em termos de potência, do sinal da seção repetida. Isto decorre pelo fato de que a observação de um determinado fenômeno (processo, etc.) em duas ocasiões distintas, por mais sofisticada que seja a ferramenta utilizada para este fim, jamais ocorre em condições (físicas, geológicas, etc.) idênticas. Logo, esta pequena diferença nos resultados é aceitável.

A Figura 5.16 ilustra os espectros de potência dos ruídos das seções principal e repetida do perfil de raios gama do poço A. Há a mesma superioridade, em termos de potência, do ruído da seção repetida e as pequenas diferenças detectadas entre os espectros são mais acentuadas. Entretanto, os resultados obtidos, considerando-se a dinâmica que envolve a obtenção das seções, estão dentro do contexto esperado.

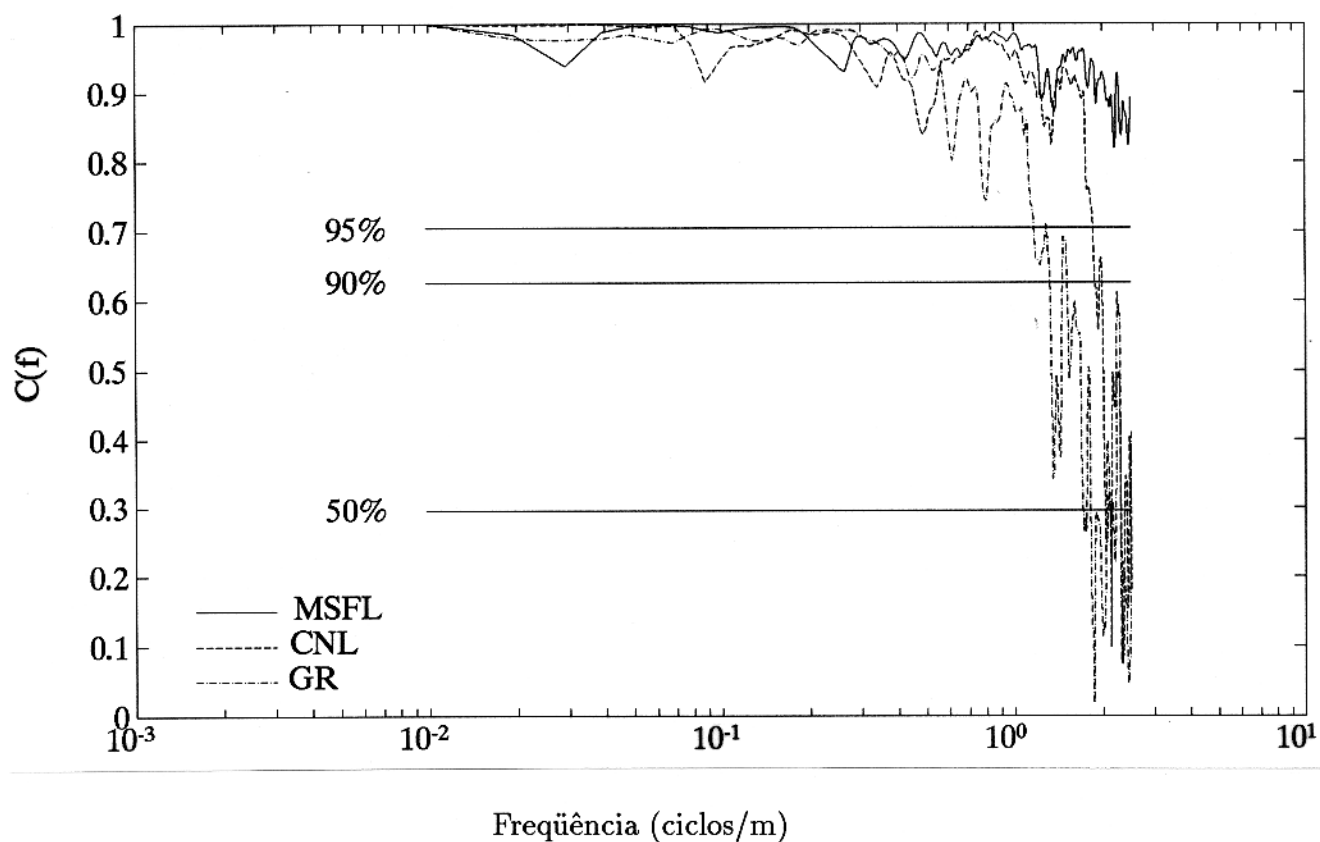


Figura 5.1 - Coerência para os perfis de resistividade (MSFL), porosidade neutrônica (CNL) e raios gama (GR), obtidos com intervalo de amostragem de 0,20 m e velocidade de perfilagem de 550 m/h, evidenciando a boa repetição para o primeiro perfil (MSFL) e a proximidade qualitativa dos perfis radioativos (CNL e GR).

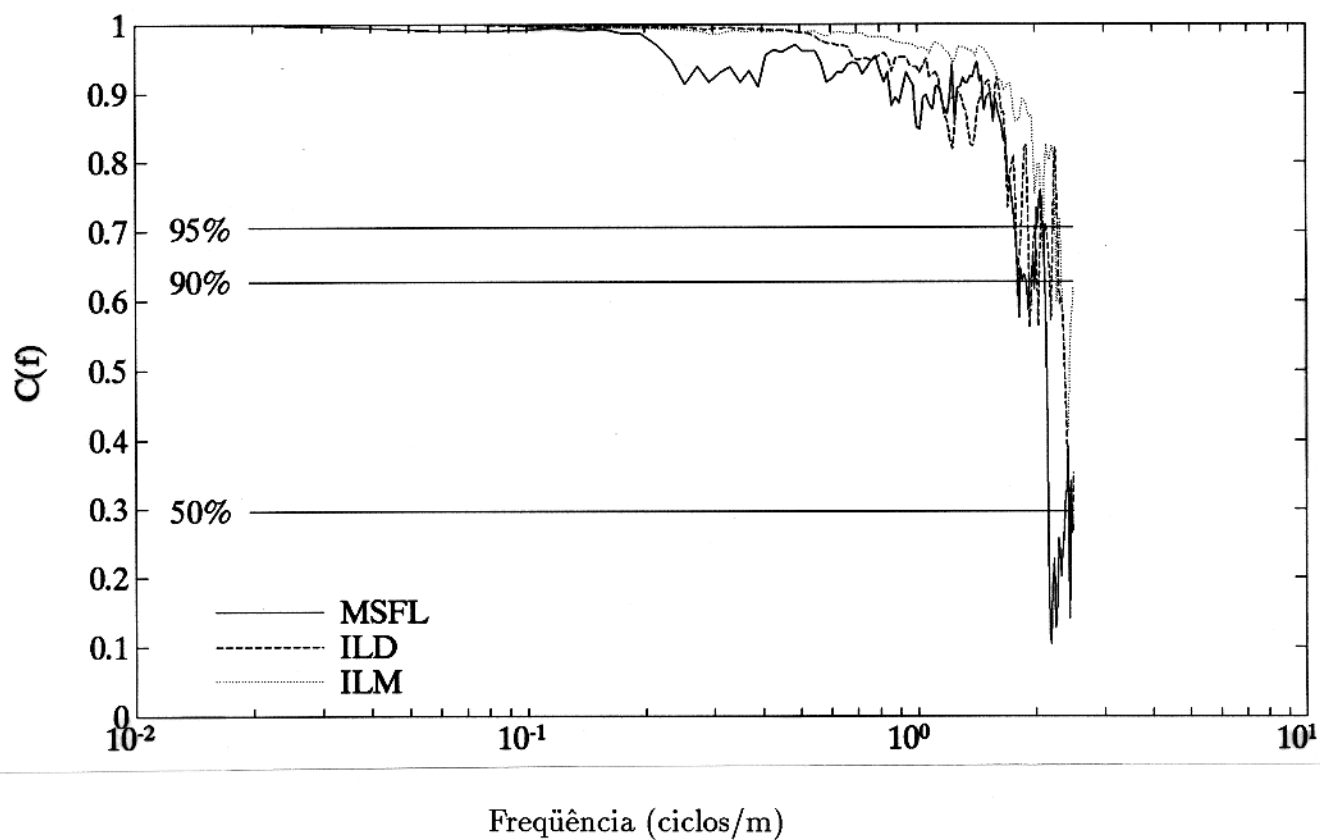


Figura 5.2 - Coerência para os perfis de resistividade (MSFL, ILD e ILM), obtidos com intervalo de amostragem de 0,20 m e velocidade de perfilagem de 920 m/h, evidenciando a melhor repetição para os perfis de indução e o efeito nocivo da velocidade de perfilagem utilizada.

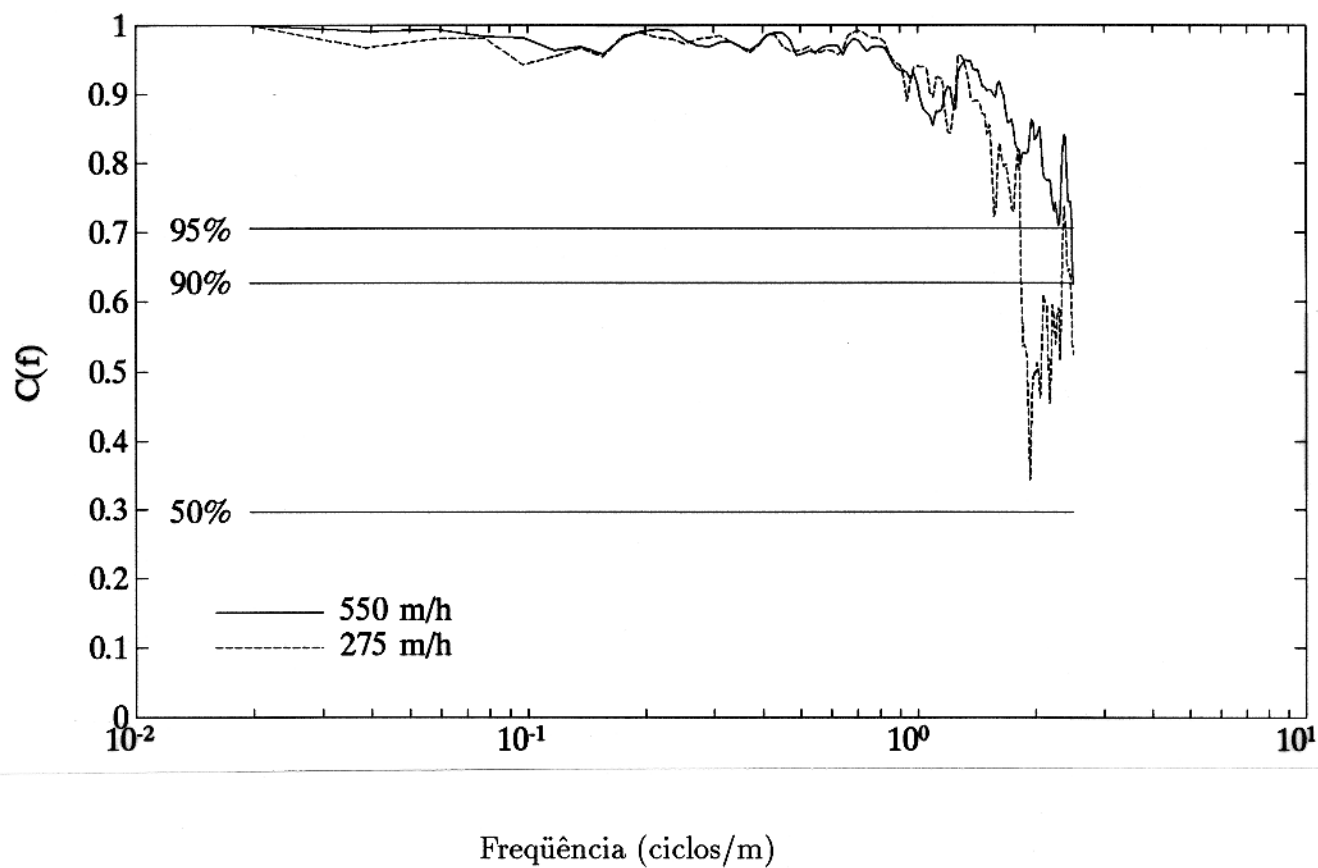


Figura 5.3 - Coerência para os perfis de densidade normal e de alta resolução, obtidos, respectivamente, com velocidades de perfilagem de 550 m/h e 275 m/h, e mesmo intervalo de amostragem (0,20 m), evidenciando a melhor repetição para o perfil de densidade normal.

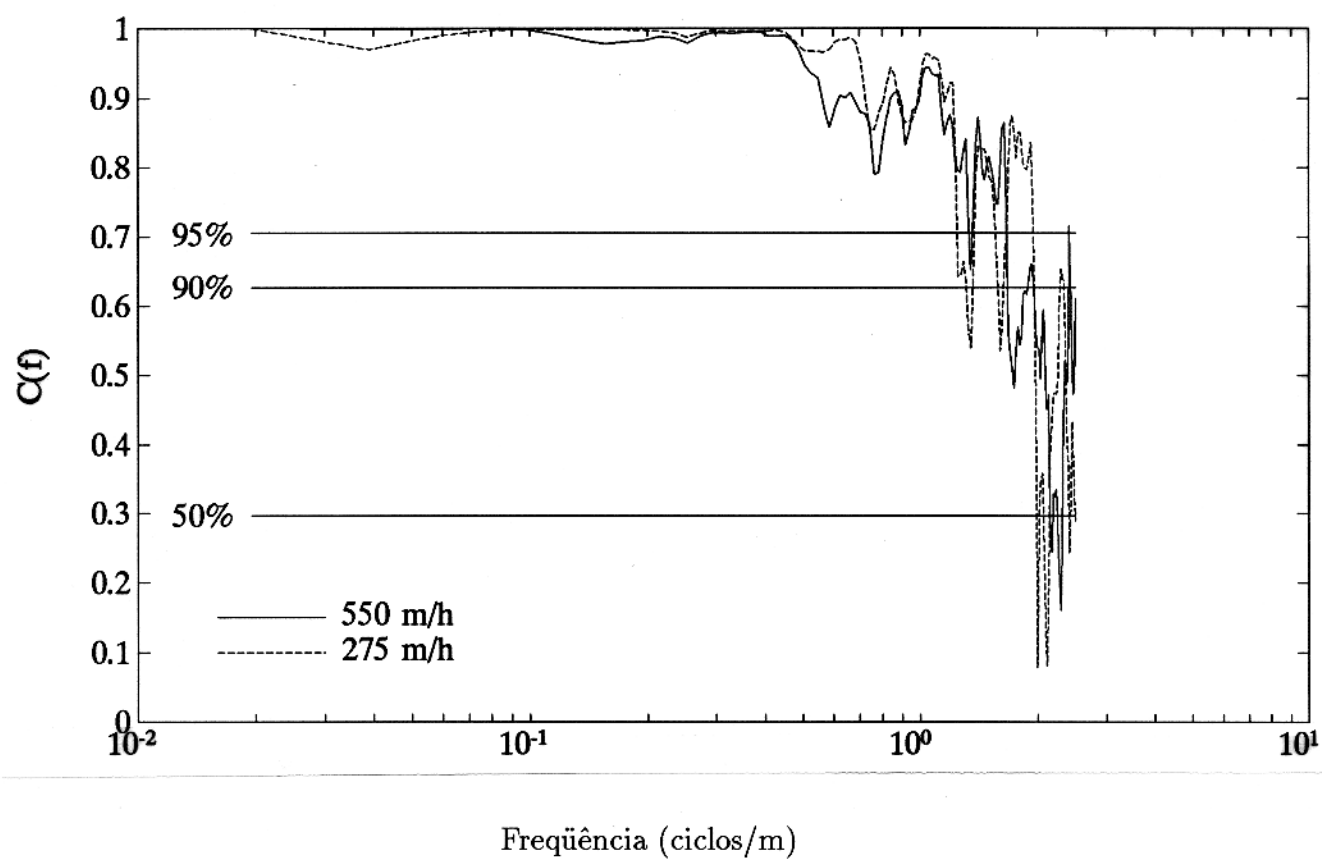


Figura 5.4 - Coerência para os perfis de raios gama normal e de alta resolução, obtidos, respectivamente, com velocidades de perfilagem de 550 m/h e 275 m/h, e mesmo intervalo de amostragem (0,20 m), evidenciando a melhor repetição para o perfil de raios gama normal.

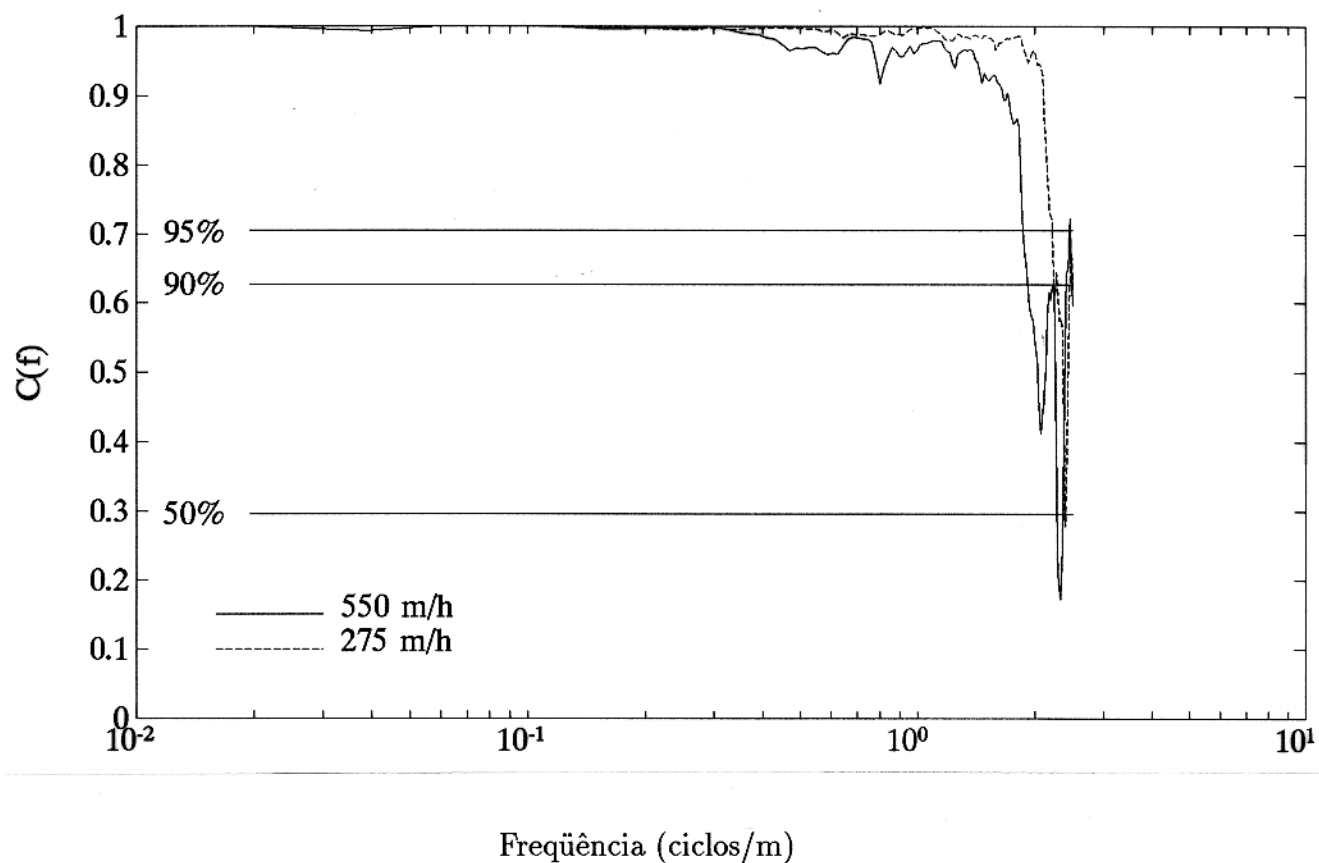


Figura 5.5 - Coerência para os perfis de porosidade neutrônica normal e de alta resolução, obtidos, respectivamente, com velocidades de perfilagem de 550 m/h e 275 m/h, e mesmo intervalo de amostragem (0,20 m), evidenciando a melhor repetição para o perfil de porosidade neutrônica de alta resolução.

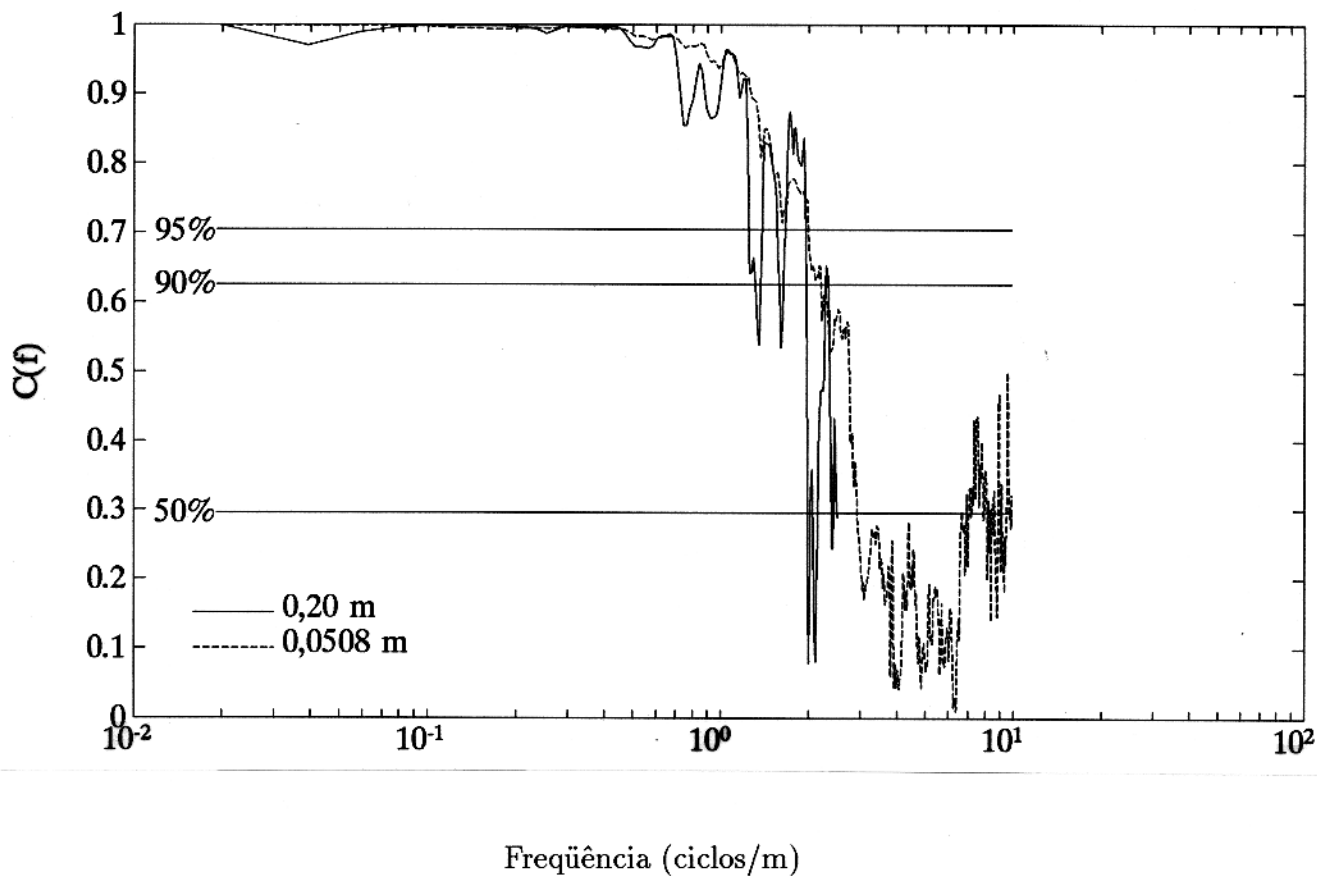


Figura 5.6 - Coerência para os perfis de raios gama de alta resolução, obtidos com intervalos de amostragem de 0,20 m e 0,0508 m e mesma velocidade de perfilagem (275 m/h), evidenciando a repetição ligeiramente melhor para o perfil de raios gama com menor intervalo de amostragem (0,0508 m).

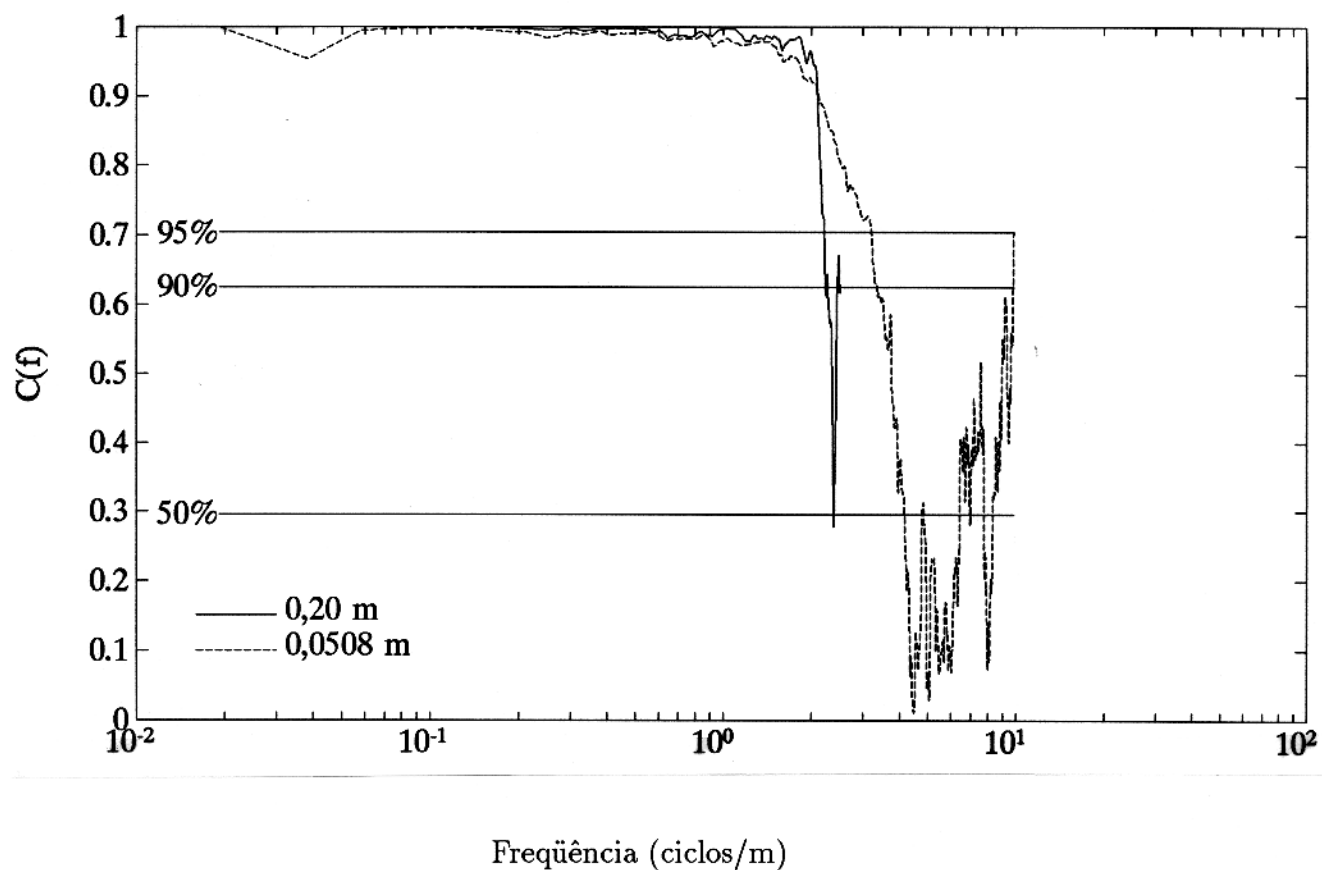


Figura 5.7 - Coerência para os perfis de porosidade neutrônica de alta resolução, obtidos com intervalos de amostragem de 0,20 m e 0,0508 m e mesma velocidade de perfilagem (275 m/h), evidenciando a repetição ligeiramente melhor para o perfil de porosidade neutrônica com menor intervalo de amostragem (0,0508 m).

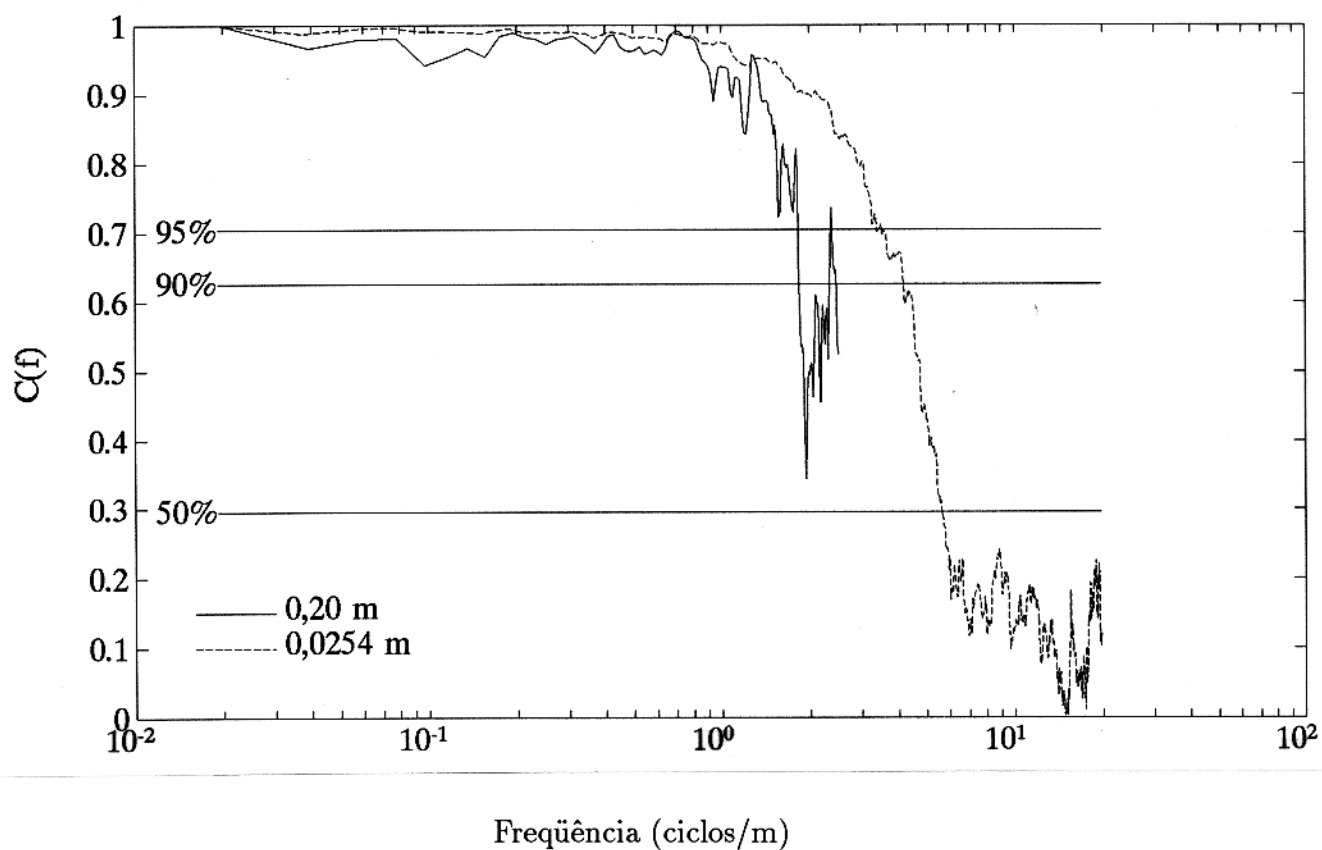


Figura 5.8 - Coerência para os perfis de densidade de alta resolução, obtidos com intervalos de amostragem de 0,20 m e 0,0254 m e mesma velocidade de perfilagem (275 m/h), evidenciando a melhor repetição para o perfil de densidade com menor intervalo de amostragem (0,0254 m).

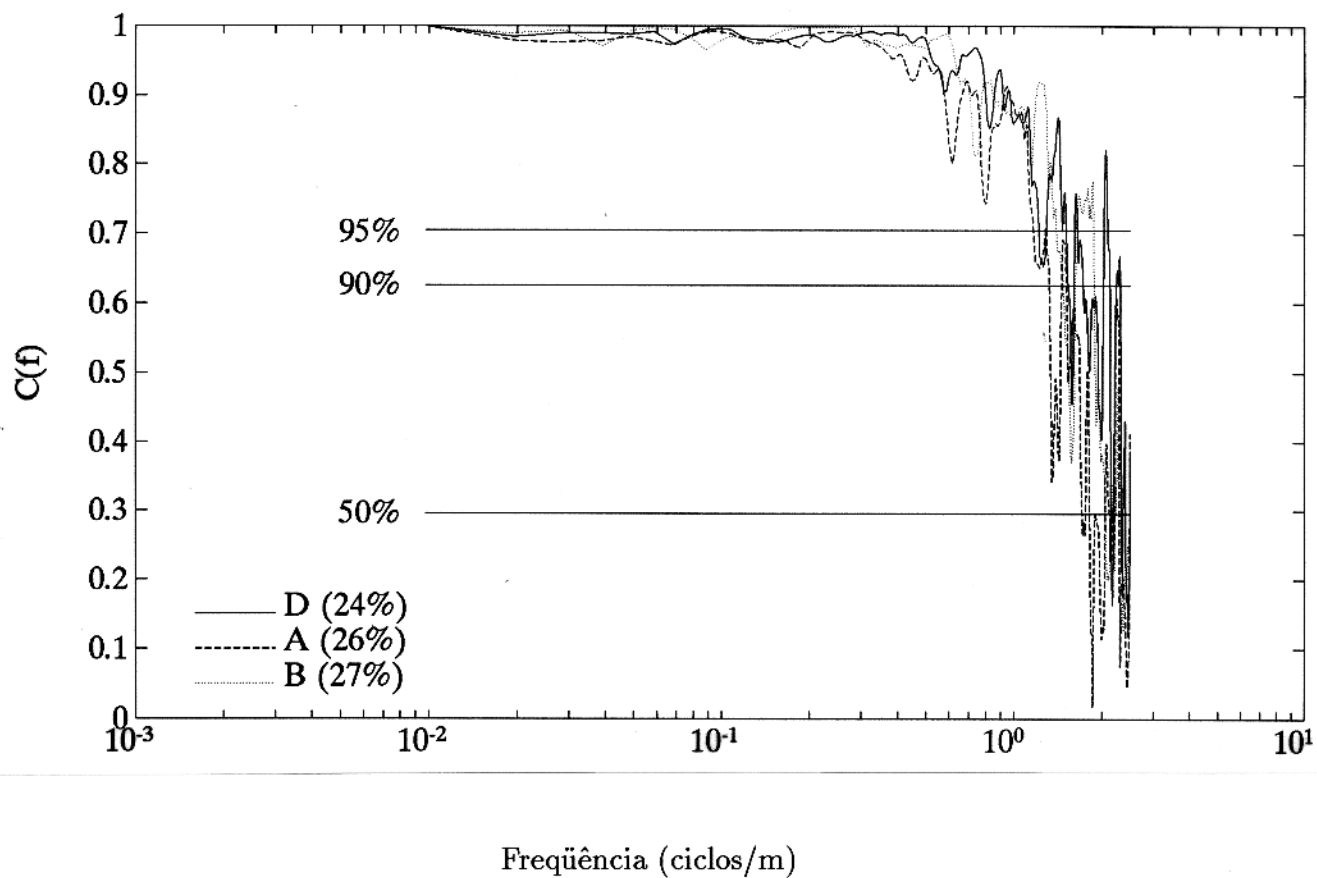


Figura 5.9 - Coerência para os perfis de raios gama normais dos poços A, B e D, obtidos em condições de perfilagem idênticas e com a indicação das respectivas porosidades neutrônicas, evidenciando o efeito da porosidade sobre o perfil.

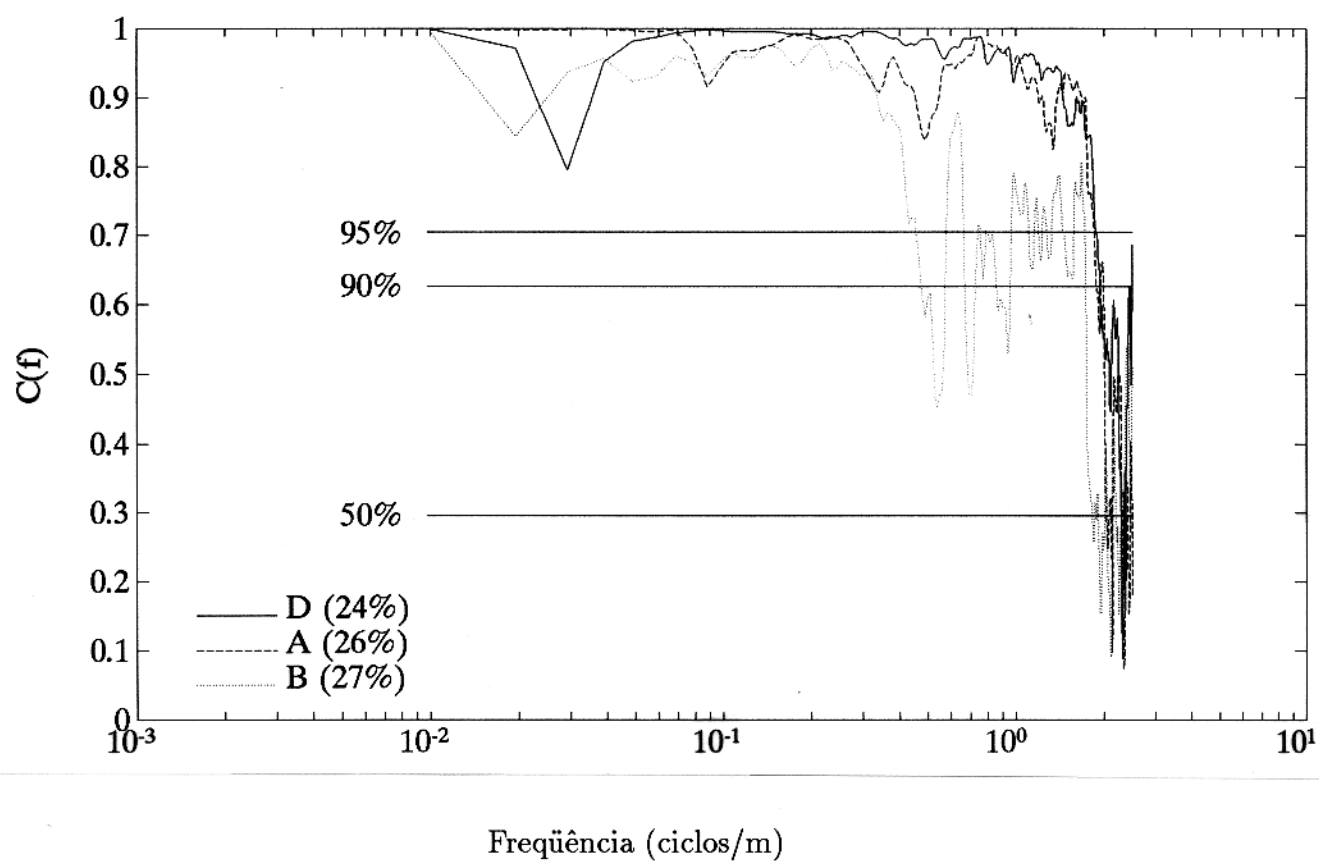


Figura 5.10 - Coerência para os perfis de porosidade neutônica normais dos poços A, B e D, obtidos em condições de perfilagem idênticas e com a indicação das respectivas porosidades neutônicas, evidenciando o efeito da porosidade sobre o perfil.

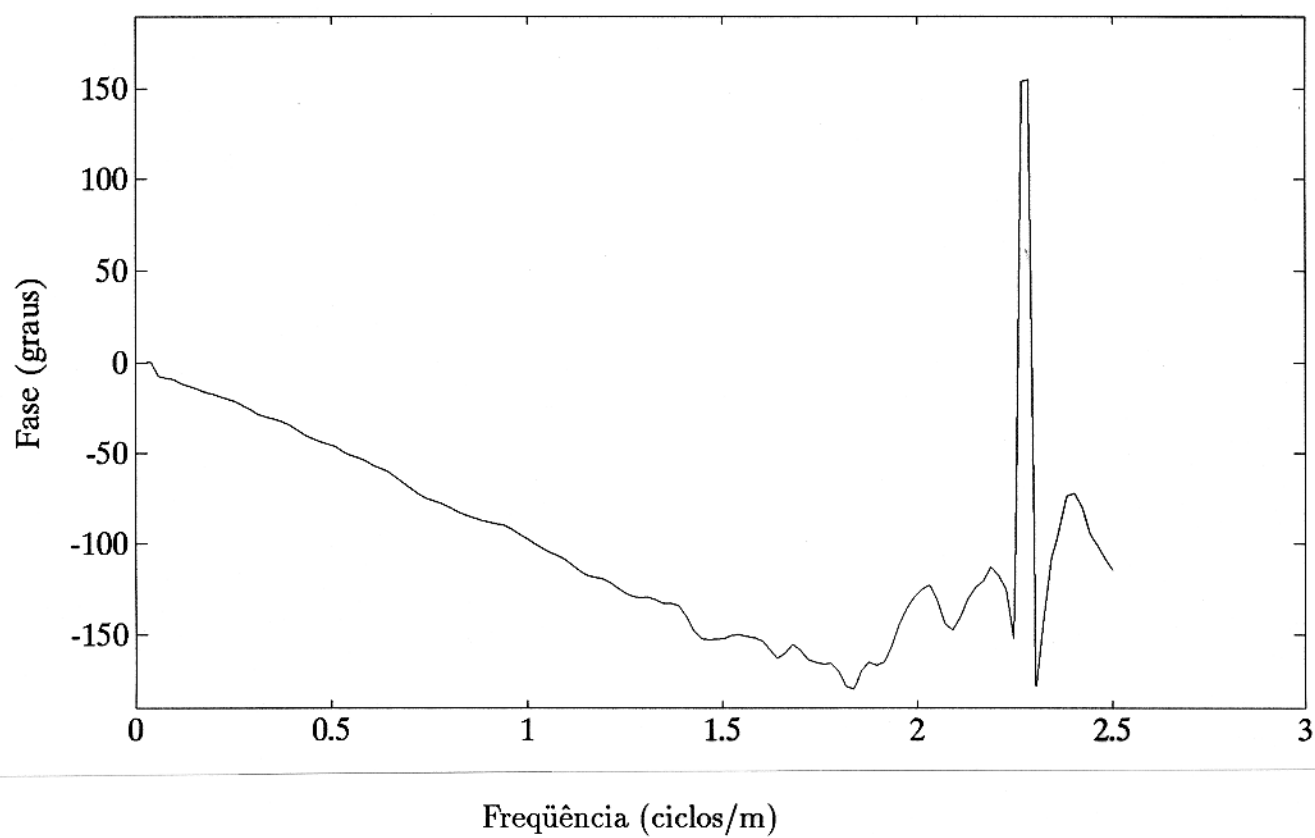


Figura 5.11 - Espectro de fase para o perfil de raios gama do poço C, evidenciando o deslocamento relativo existente entre as seções principal e repetida.

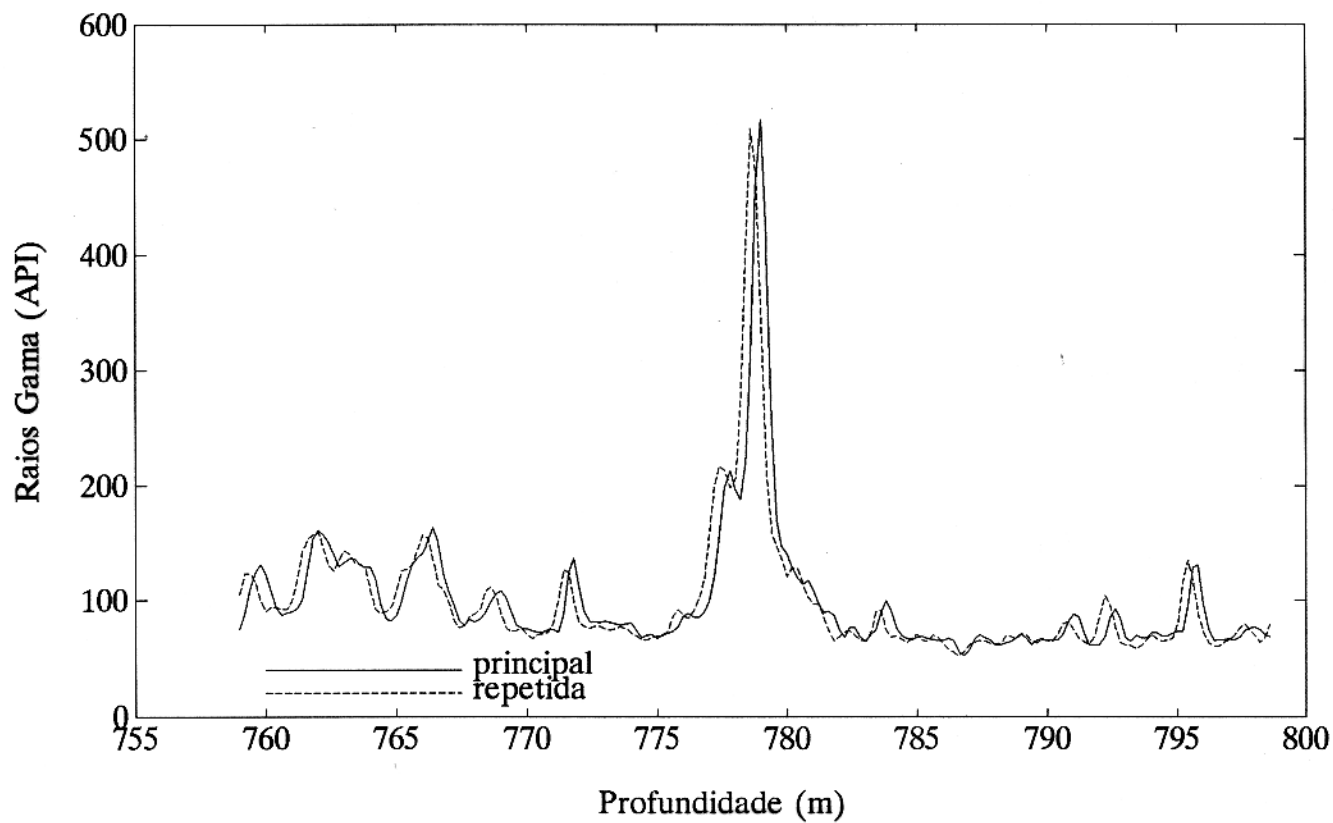


Figura 5.12 - Superposição das seções principal e repetida do poço C, que confirma o deslocamento relativo entre ambas indicado pelo espectro de fase (Figura 5.11).

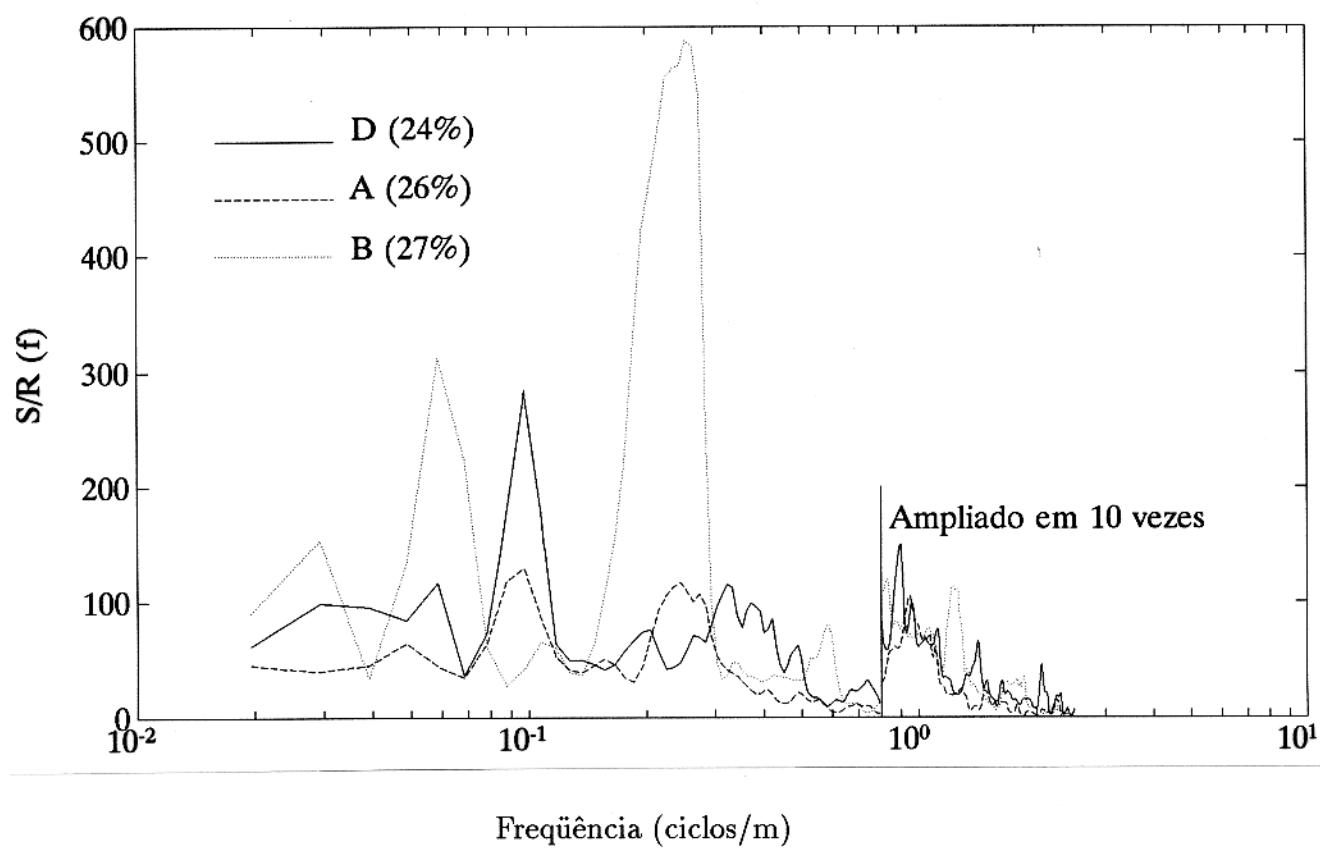


Figura 5.13 - Razão sinal-ruído para os perfis de raios gama dos poços A, B e D.

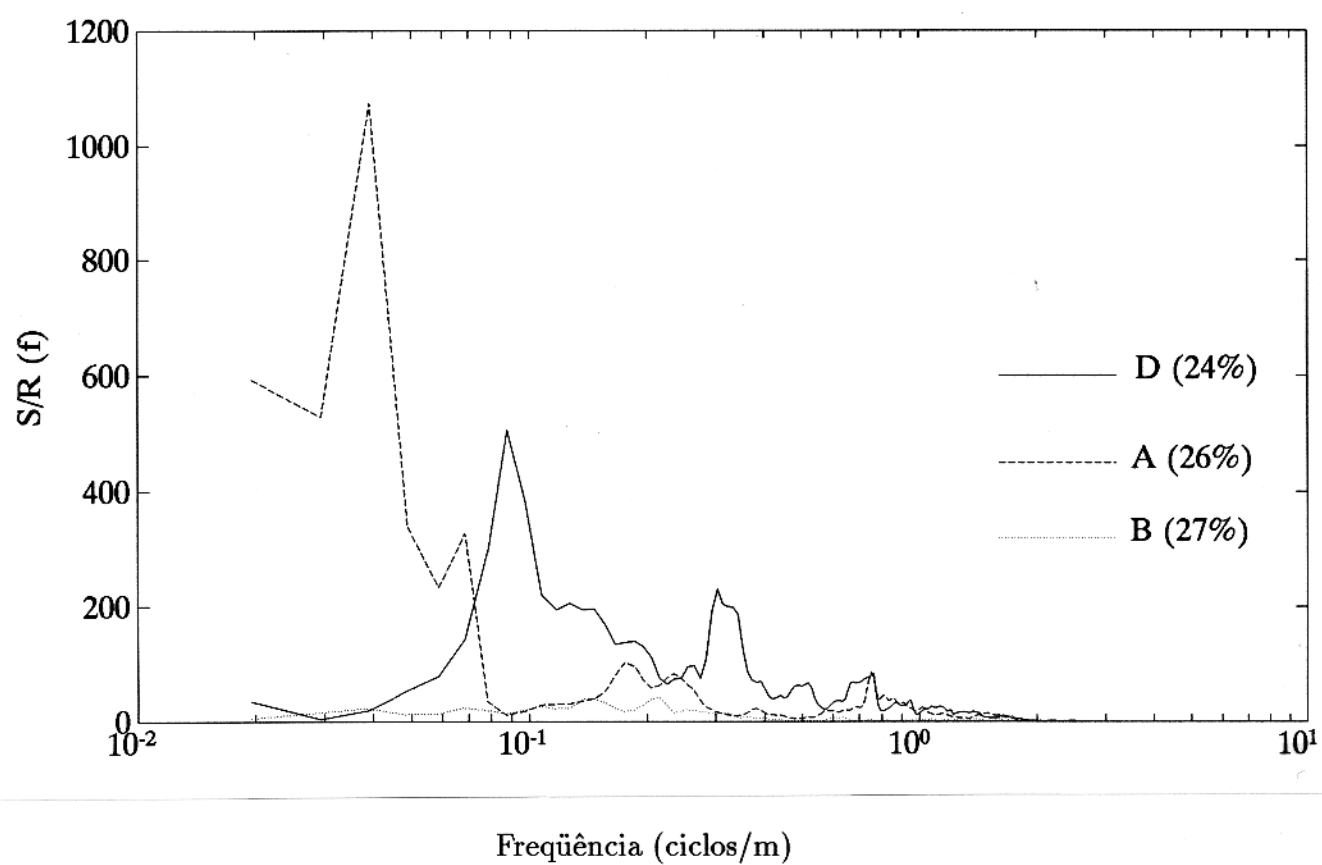


Figura 5.14 - Razão sinal-ruído para os perfis de porosidade neutônica dos poços A, B e D.

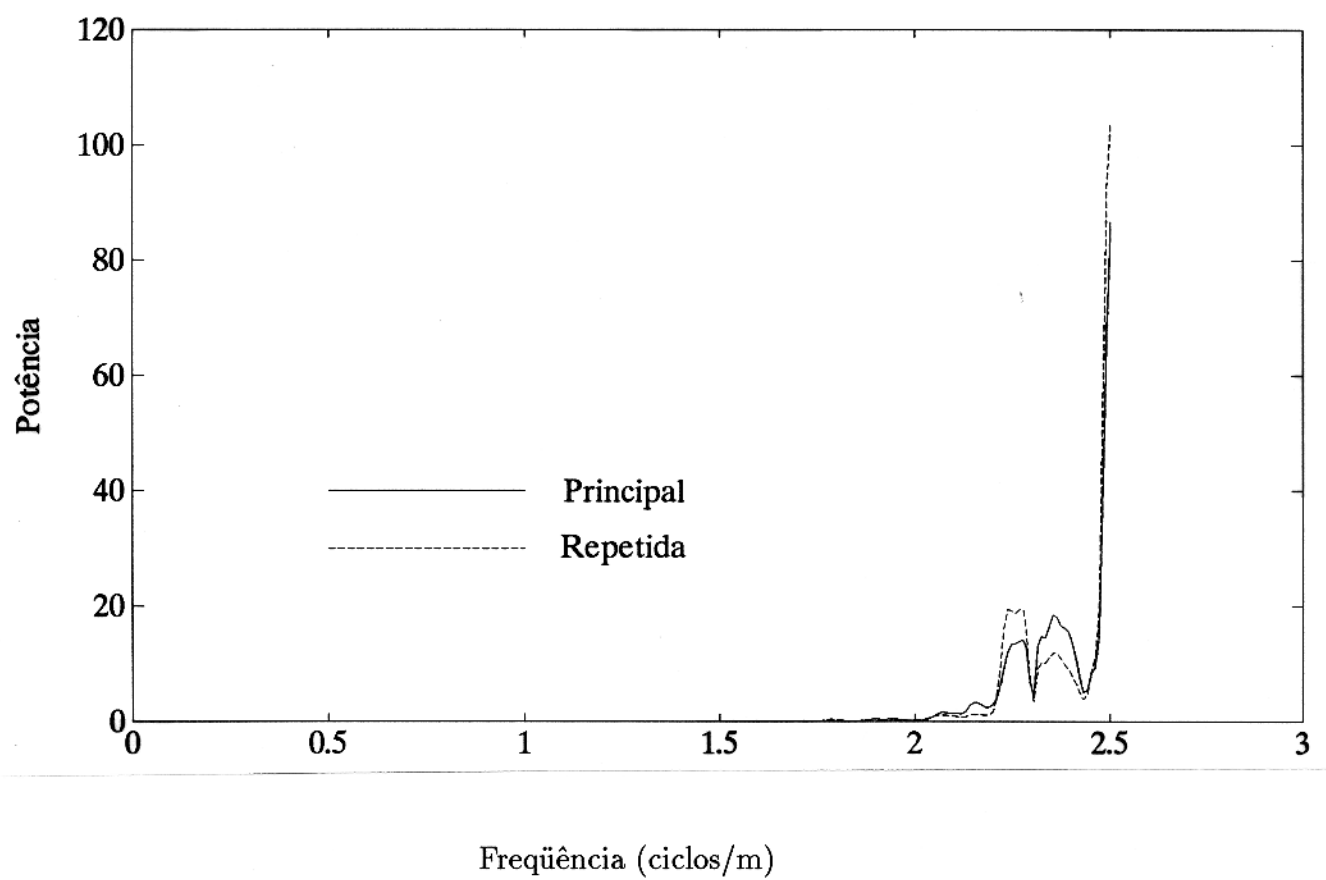


Figura 5.15 - Espectros de potência dos sinais das seções principal e repetida do perfil de raios gama do poço A.

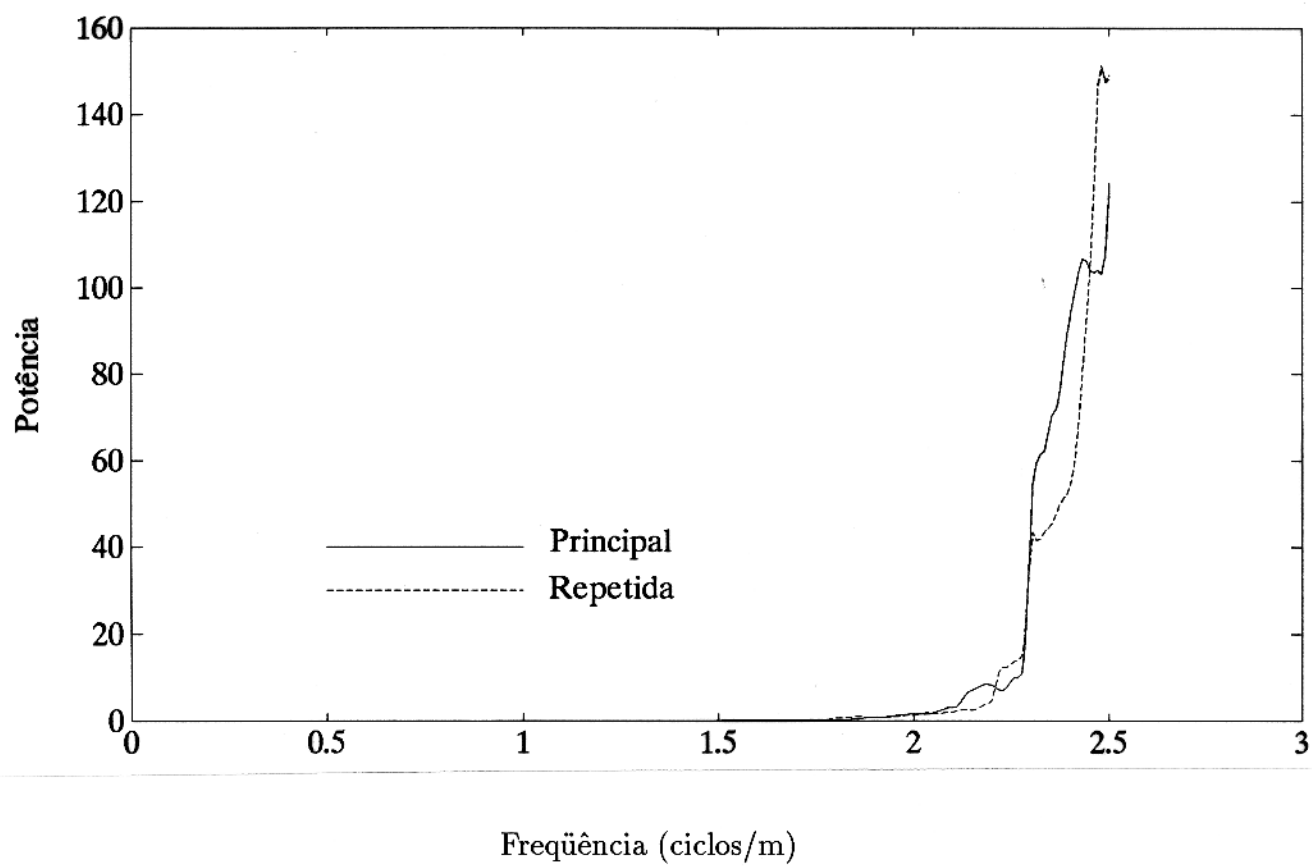


Figura 5.16 - Espectros de potência dos ruídos das seções principal e repetida do perfil de raios gama do poço A.

6 - CONCLUSÃO

A análise de séries temporais tem sido aplicada em vários segmentos da Ciência, como engenharia, oceanografia, geofísica, etc. Em perfilagem de poço, esta aplicação é bastante recente. Entretanto, levando-se em conta os estudos até hoje realizados por diversos autores e direcionados à avaliação de perfis de poço, chega-se a importantes conclusões a respeito da repetição de diversos tipos de perfis, da utilização de diferentes intervalos de amostragem e de diferentes velocidades de perfilagem e da resolução vertical de alguns perfis radioativos. Como exemplo expressivo do que se pode obter com a utilização desta técnica, citam-se a seguir os resultados relativos ao estudo efetuado por KERFORD & GEORGI (1990).

A avaliação da repetição de perfis diferentes, obtidos com velocidade de perfilagem de 1.100 m/h e intervalo de amostragem de 0,1524 m, indica uma repetição do perfil de resistividade (SFL) superior à repetição do perfil de raios gama. Dessa forma, deve-se esperar que, na maioria das vezes, os perfis de resistividade apresentem repetição superior à dos perfis radioativos.

A avaliação da utilização de velocidades de perfilagem de 160 m/h e 550 m/h, para os perfis de densidade e de porosidade neutrônica obtidos com intervalo de amostragem de 0,1524 m, indica um nível maior de coerência para os perfis obtidos com velocidade menor. Logo, a diminuição da velocidade de perfilagem, em geral, é benéfica para estes dois tipos de perfil.

A avaliação da utilização de intervalos de amostragem de 0,03048 m e 0,1524 m, para os perfis de densidade e de porosidade neutrônica obtidos com velocidade de perfilagem de 160 m/h, indica um nível de coerência maior para o perfil de densidade obtido com o intervalo de amostragem menor e um nível de coerência maior para o perfil de porosidade neutrônica obtido com o intervalo de amostragem maior. Assim, uma diminuição do intervalo de amostragem só é vantajosa para o perfil de densidade.

O cálculo da resolução vertical indica para o perfil de densidade, obtido com intervalo de amostragem de amostragem de 0,03048 m e velocidade de perfilagem de 160 m/h, uma resolução vertical na ordem de 0,09 m. Para o perfil de porosidade neutrônica, obtido nessas mesmas condições de intervalo de amostragem e velocidade de perfilagem, a resolução vertical é da ordem de 0,17 m.

Como a análise acima está baseada numa porosidade neutrônica de cerca de 15% e um aumento na porosidade da formação geralmente implica em um aumento no nível do ruído aleatório, deve ser esperado resultados diferentes destes, quando forem utilizados dados referentes a uma porosidade diferente da mencionada.

Quanto ao estudo desenvolvido neste trabalho, obtém-se subsídios importantíssimos a respeito dos dados utilizados e no que se refere à análise citada acima.

Tendo em vista a avaliação dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta, chega-se a conclusões importantíssimas a respeito da análise de perfis de poço por intermédio da utilização de séries temporais.

Com a aplicação da análise de séries temporais no estudo dos perfis manipulados, confirma-se que os perfis de resistividade apresentam uma repetição muito superior à repetição dos perfis radioativos e que o perfil de porosidade neutrônica tem repetição superior à repetição do perfil de raios gama. Dentre os perfis de resistividade, conclui-se que o perfil de indução médio apresenta uma repetição qualitativamente acima da repetição do perfil de indução profundo, o qual, por seu lado, tem repetição superior à do perfil micro-esférico.

A velocidade de perfilagem usada no poço C (920 m/h) não é adequada para os perfis de resistividade, uma vez que os perfis de indução (ILD e ILM) apresentam repetição equivalente à repetição do perfil de densidade, e o micro-esférico apresenta uma repetição semelhante à do perfil de raios gama, chegando inclusive a ter uma resolução vertical na ordem do perfil de raios gama do poço B.

Para o poço D, o uso de uma velocidade de perfilagem menor (275 m/h) do que a velocidade de perfilagem considerada como normal (550 m/h) apresenta-se como inadequada para o perfil de densidade quando o intervalo de amostragem for de 0,20 m, uma vez que o perfil de densidade normal, obtido com este mesmo intervalo de amostragem e velocidade maior, tem repetição melhor do que a do perfil de densidade de alta resolução, obtido com intervalo idêntico e velocidade menor (vide Figura 5.3). Já para o perfil de raios gama, excluindo-se certas faixas estreitas e isoladas de frequência, conclui-se que uma redução de velocidade de perfilagem é vantajosa, visto que, de acordo com a Figura 5.4, a coerência do perfil de raios gama de alta resolução, obtido com a velocidade menor e mesmo intervalo de amostragem, está sempre acima da coerência do perfil de raios gama normal, indicando uma melhor repetição para o perfil de alta resolução. Contudo, é para o perfil de porosidade neutrônica que a redução de velocidade de perfilagem se faz mais vantajosa (ver Figura 5.5), pois a repetição do perfil de alta resolução obtido com velocidade menor e mesmo intervalo de amostragem é, sem sombra de dúvidas, muito melhor do que a do perfil normal.

A redução do intervalo de amostragem no poço D dá resultado favorável para todos os três tipos de perfis analisados. Uma redução no intervalo de amostragem de 0,20 m para 0,0508 m, para o perfil de raios gama, é bastante promissor, desde que, além de melhorar a repetição do perfil nas baixas frequências, ainda aumenta o intervalo de frequências mais altas em que ocorre a predominância do sinal sobre o ruído, ainda que a partir de 2,9 ciclos/m o sinal seja definitivamente superado pelo ruído, pois a partir deste limite de frequência a coerência chega a no máximo oscilar em torno do nível de confiança de 50%. A mesma coisa ocorre em relação ao perfil de densidade, quer dizer, uma diminuição no intervalo de amostragem de 0,20 m para 0,0254 m melhora a repetição do perfil nas frequências mais baixas e expande o limite de frequências úteis até cerca de 5,6 ciclos/m. Com respeito ao perfil de porosidade neutrônica, a diminuição do intervalo de amostragem tem um efeito positivo e quase imperceptível, já que, em que pese a degradação da repetição, principalmente nas frequências mais elevadas, onde há a existência de um intervalo de frequência no qual a coerência chega a estar abaixo do nível de confiança de 50%, a redução do intervalo de amostragem resulta numa melhora sensível para a coerência no intervalo de frequência acima de 2,5 ciclos/m e nas denominadas componentes adicionais de alta frequência. Isto acontece porque o limite do sinal na frequência máxima está bem próximo do nível de confiança de 95%, o mesmo não ocorrendo com a componente do sinal presente no perfil obtido com intervalo de amostragem de 0,20 m.

A resolução vertical dos diversos perfis analisados e indicados na Tabela 2.4 registra, como fato deveras incoerente, o perfil micro-esférico do poço C constar naquela Tabela e, o que é pior, apresentar ele uma resolução vertical (0,211 m) na ordem do valor correspondente ao perfil de raios gama do poço B (0,217 m). Isto indica, sem dúvidas, que a velocidade usada provavelmente dá origem a ruídos aleatórios que influenciam em muito a parte relativa ao registro, por parte da ferramenta, do sinal ligado à condutividade da formação, ou seja, é bem provável que a velocidade de 920 m/h origine ou realce os ruídos de origem eletromagnética, já que não só o perfil micro-esférico, mas também os perfis de indução, apresentam uma repetição considerada muito aquém daquela repetição que deveria idealmente ser apresentada.

A mesma Tabela 2.4 indica as boas resoluções verticais obtidas para os perfis de raios gama e de densidade de alta resolução. Infelizmente a presença do sinal nas componentes adicionais de frequência, para os perfis de raios gama e de densidade, com intervalo de amostragem de 0,20 m e pertencentes ao poço D, impossibilita o cálculo da resolução vertical daqueles perfis e inviabiliza, dessa forma, uma avaliação do efeito da diminuição da velocidade de perfilagem, tendo a resolução vertical como parâmetro de comparação.

A comparação feita entre os poços A, B e D, com o auxílio dos perfis de raios gama e de porosidade neutrônica normais, deixa bem clara a influência evidente da porosidade sobre

estes perfis. Isto, porque o resultado final obtido para a coerência da cada um dos mencionados perfis segue qualitativamente a mesma seqüência apresentada pela porosidade. Como os poços A, B e D têm porosidades neutrônicas médias de 26, 27 e 24%, respectivamente, então é óbvio que a coerência acompanhe qualitativamente esta ordem. E isto é bem evidenciado quando levamos em conta as já mencionadas componentes adicionais de frequência dos gráficos da coerência dos perfis de raios gama dos poços A, B e D na Figura 5.9. Nas frequências mais altas, a coerência do perfil do poço B situa-se sempre abaixo do nível de confiança de 50%, a coerência do perfil do poço A está em torno deste nível e a coerência do perfil do poço D está um pouco mais acima deste mesmo nível, resultado este que coaduna com o teoricamente a ser obtido, quando se considera apenas a influência da porosidade, desde que, variáveis como velocidade de perfilagem, intervalo de amostragem e filtro, por exemplo, são as mesmas para os perfis analisados.

Quando se considera os perfis de porosidade neutrônica, então se tem mais uma vez confirmada a influência marcante da porosidade nos perfis radioativos. Resta apenas se concluir, quanto à avaliação feita, que se torna quase obrigatória a obtenção de perfis de porosidade neutrônica de alta resolução no poço B, haja visto a má repetição apresentada pelo seu perfil de porosidade neutrônica normal.

Quanto ao espectro de fase, a sua utilidade como elemento de informação complementar na análise de perfis de poço foi plenamente confirmada, sobretudo quando se considera o excelente resultado obtido para o perfil de raios gama do poço C.

A razão sinal-ruído apresenta-se como um valioso parâmetro de avaliação de perfil, sendo adequada a sua utilização nos casos em que a coerência não apresente resultados tão evidentes, como na comparação entre poços (Figura 5.9), por exemplo.

O cálculo dos espectros de potência, ao possibilitar a comparação entre os espectros de potência dos sinais e dos ruídos das seções principal e repetida do perfil de raios gama do poço A, indica ser vantajosa a obtenção da seção repetida. Além disso, quando se considera que ambas as seções têm valor médio nulo, tem-se que a autocovariância da seção principal, em razão da pequena diferença entre os espectros de potência, é aproximadamente igual à autocovariância da seção repetida. E isto serve, em última análise, para confirmar a validade da obtenção da seção repetida.

Finalizando, tem-se mais uma vez confirmada pelos resultados obtidos neste trabalho, a expressiva contribuição da análise de séries temporais quando utilizada na avaliação das diversas características dos perfis de poço. Esta análise, conforme mencionado na Introdução, representa mais uma das poderosas ferramentas que o analista de perfis de poço tem no desempenho de suas funções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, A. J. N. 1992. **Deconvolução de Perfis de Poço**. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 80p. Tese (Mestrado Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1992.
- BATH, M. 1974. **Spectral Analysis in Geophysics**. Amsterdam, Elsevier Scientific Pub. Co. 553p.
- BLAIS, J. A. R. 1988. **Estimation and Spectral Analysis**. Calgary, The University of Calgary Press. p. 37-39.
- BLINCHIKOFF, H. J. & ZVEREV, A. I. 1976. **Filtering in the Time and Frequency Domains**. New York, John Wiley & Sons. 494p.
- BRACEWELL, R. N. 1986. **The Fourier Transform and Its Applications**. 2. ed. New York, McGraw-Hill. 474p.
- BRIGHAM, E. O. 1974. **The Fast Fourier Transform**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall. 252p.
- BRILLINGER, D. R. & KRISHNAIAH, P. R. 1990. **Handbook of Statistics**. Amsterdam, Elsevier Scientific Pub. Co. v. 3, 485p.
- BUTKOV, E. 1988. **Física Matemática**. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan. 725p.
- CHATFIELD, C. 1980. **The Analysis of Time Series: an introduction**. 2. ed. London, Chapman and Hall. 268p.
- CHEN, C. H. 1982. **Digital Waveform Processing and Recognition**. Boca Raton, Florida, CRC Press. 205p.
- CRESCÊNCIO NETO, V. 1979. **Cálculo Numérico**. 2. ed. rev. Recife, Gráfica Editora Nunes. 191p.
- DOVETON, J. H. 1986. **Log Analysis of Subsurface Geology; concepts and computer methods**. New York, John Wiley & Sons. 273p.

- DUARTE, O. O. 1988. **Dicionário Inglês-Português de Termos Técnicos Usados na Prospeção Sísmica**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. 85p.
- DUDEVICZ, E. J. & MISHRA, Š. N. 1988. **Modern Mathematical Statistics**. New York, John Wiley & Sons. 838p.
- EISBERG, R. & RESNICK, R. 1979. **Física Quântica**. 4. ed. Rio de Janeiro, Editora Campus. 928p.
- ELLIS, D. V. 1987. **Well Logging for Earth Scientists**. New York, Elsevier Science Pub. Co. 532p.
- ELLIS, D. V. 1990. Neutron and Gamma Ray Scattering Measurements for Subsurface Geochemistry. **Science**, American Association for Advancement of Science, 250: 82-87.
- EVENDEN, B. S.; STONE, D. R.; ANSTEY, N. A. 1970. **Seismic Prospecting Instruments**. Berlin, Gebrüder Borntraeger. v. 1, 156P.
- GEORGI, D. T. 1989. Application of Time-Series Analysis to Induced Gamma Ray Spectroscopy Logs from Two Lake Heavy-Oil Observation Wells. **Society of Petroleum Engineers**, SPE-19602: 323-334.
- GREEN, J. R. & MARGERISON, D. 1978. **Statistical Treatment of Experiment Data**. Amsterdam, Elsevier Scientific Pub. Co. 382p.
- HAMMING, R. W. 1977. **Digital Filters**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall. 226p.
- HAYT JR., W. H. 1983. **Eletromagnetismo**. 3. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora. 403p.
- HSU, H. P. 1973. **Análise de Fourier**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora. 274p.
- JENKINS, G. M. & WATTS, D. G. 1968. **Spectral Analysis and Its Application**. Wisconsin, University of Wisconsin. 525p.
- KERFORD, S. & GEORGI, D. T. 1990. Application of Time-Series Analysis to Wireline Logs. **The Log Analyst**, 31(3): 150-157.
- LEITE, L. W. B. 1991. **Tratamento da Informação**. Notas de curso. Belém, UFPA. 62p. (no prelo).

- LEITHOLD, L. 1986. **O Cálculo com Geometria Analítica**. 2. ed. São Paulo, Editora Harbra. v. 1, 526p.
- LINK, P. K. 1987. **Basic Petroleum Geology**. Tulsa, OGCI Publications. 425p.
- LUTHI, S. M. 1991. **Perfilagem de Poço I**. Notas de curso. Belém, UFPA. 71p. (no prelo).
- LUTHI, S. M. 1992. **Perfilagem de Poço II**. Notas de curso. Belém, UFPA. 96p. (no prelo).
- MARQUES, M. S. P. 1992. **Avaliação de Dados de Altimetria do Satélite Geosat a Partir de Comparação com Dados do Levantamento Gravimétrico Marinho Equant**. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 106p. Tese (Mestrado Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1992.
- MATHIS, G. L. & GEARHART, D. 1989. The Vertical Resolution of Pe and Density Logs. **The Log Analyst**, 30(3): 150-161.
- MORSE, J. G. 1977a. Fundamentals of Atomic and Nuclear Physics. **Nuclear Methods in Mineral Exploration and Production**. New York, Elsevier Scientific Pub. Co. p. 255-272.
- MORSE, J. G. 1977b. The Natural Gamma Ray Emitters. **Nuclear Methods in Mineral Exploration and Production**. New York, Elsevier Scientific Pub. Co. p. 7-18.
- NERY, G. G. 1990. **Introdução à Geofísica Aplicada**. Notas de aula. Belém, UFPA. 231p. (no prelo).
- O'BRIEN, D. P. 1992. **Propriedades Mecânicas, Térmicas e Radioativas de Minerais e Rochas**. Notas de curso. Belém, UFPA. 31p. (no prelo).
- OTNES, R. K. & ENOCHSON, L. 1972. **Digital Time Series Analysis**. New York, John Wiley & Sons. 455p.
- OPPENHEIM, A. V. & SHAFER, R. W. 1975. **Digital Signal Processing**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall. 585p.
- PAPOULIS, A. 1962. **The Fourier Integral and Its Applications**. New York, McGraw Hill. 318p.
- PELED, B. & LIU, B. 1976. **Digital Signal Processing: Theory, Design, and Implementation**. New York, John Wiley & Sons. 304p.

- PRIESTLEY, M. B. 1981. **Spectral Analysis and Time Series**. London, Academic Press. v. 1, 653p.
- SCHLUMBERGER 1974. **Log Interpretation; applications**. New York, Schlumberger. v. 2, 116p.
- SCHWARTZ, M. & SHAW, L. 1975. **Signal Processing: Discrete Spectral Analysis, Detection, and Estimation**. Tokio, McGraw-Hill. 396p.
- SERRA, O. 1984. **Fundamentals of Well-Log Interpretation - The Acquisition of Logging Data**. Amsterdam, Elsevier Scientific Pub. Co. 423p.
- WEAVER, H. J. 1989. **Theory of Discrete and Continuous Fourier Analysis**. New York, John Wiley & Sons. 307p.
- ZANINI, T. & CORSINO, A. R. 1990. **Resultados de Experimentos com Métodos Operacionais para Melhorar a Resolução Vertical de Perfis Radioativos**. Natal, PETROBRÁS/DEBAR/DIRGEO. 18p.