



COPPE/UFRJ

**CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE ONDAS
ELÁSTICAS EM ROCHAS SEDIMENTARES**

Zigma Marques Moreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador(es): Luiz Landau

José Agnelo Soares

Rio de Janeiro

Junho de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE ONDAS
ELÁSTICAS EM ROCHAS SEDIMENTARES

Zigma Marques Moreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL

Aprovada por:

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

Prof. José Agnelo Soares, D.Sc.

Prof. Webe João Mansur, Ph.D.

Dr. Jorge Leonardo Martins, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2009

Moreira, Zigma Marques

Caracterização Do Coeficiente De Atenuação De Ondas
Elásticas Em Rochas Sedimentares / Zigma Marques Moreira.

- Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE , 2009.

XV, 94p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Landau

José Agnelo Soares

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de
Engenharia Civil, 2009

Referências Bibliográficas: p. 111-112.

1 Atenuação de ondas elásticas 2. Métodos de medição.
3. Atributos de atenuação. I. Landau, Luiz II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia
Civil. III Título

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer a pessoas e instituições. Aos meus orientadores Luiz Landau e em especial ao professor José Agnelo Soares e sua família, pela confiança e dedicação. Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação Engenharia civil da UFRJ pela contribuição de cada um na construção contínua do meu conhecimento.

A ANP pela confiança depositada em minhas idéias e financiamento de projetos que as transformam em realidade.

A PETROBRAS por acreditar nesse trabalho. E aqueles que deram contribuições muito significativas, como os Tecnólogos Marcos Leão, Tagore Silva, Irapuan de Velde e o engenheiro Guilherme Vasquez.

E com infinita importância em toda minha vida, meu reconhecimento e agradecimento a minha família Jaime Luiz Alves Moreira, Alnezy Moreira, Bergson Moreira e a ávo Edith Moreira e a todos os amigos e familiares pela ajuda e incentivo durante esse tempo que estive em pesquisa e desenvolvimento de tese. Em especial agradeço a Thiago Peçanha, por toda ajuda paciência, dedicação e compreensão em todos os momentos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE ONDAS ELÁSTICAS EM ROCHAS SEDIMENTARES

Zigma Marques Moreira

Junho /2009

Orientadores: Luiz Landau

José Agnelo Soares

Programa: Engenharia Civil

Esta dissertação trata da investigação laboratorial das propriedades elásticas de rochas sedimentares oriundas de bacias sedimentares brasileiras. Ênfase é dada à medição de atributos de atenuação das ondas compressional e cisalhante em amostras de arenito e folhelho sob diversos níveis de pressão confinante efetiva. Uma revisão bibliográfica a respeito das técnicas utilizadas para a medição dos atributos de atenuação é realizada. Essa revisão também serve para estabelecer um padrão comparativo dos atributos de atenuação medidos com aqueles descritos na literatura para tipos litológicos semelhantes, bem como para investigar as variáveis que afetam os atributos de atenuação. O método de medição dos atributos de atenuação utilizado foi o de análise espectral da propagação de ondas. Os resultados obtidos foram coerentes com os resultados descritos na literatura para tipos litológicos semelhantes e indicam que o fator de qualidade das ondas, atributo inversamente proporcional à atenuação, tende a aumentar com o aumento da pressão confinante. Enquanto $Q_P > Q_S$ nos folhelhos imaturos, relação inversa ocorre nos folhelhos supermaturos. Isto sugere um potencial método para distinção entre folhelhos geradores e selantes.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CHARACTERIZATION OF THE ATTENUATION COEFFICIENT OF ELASTIC
WAVE IN SEDIMENTARY ROCKS

Zigma Marques Moreira

June/2009

Advisors: Luiz Landau
José Agnelo Soares

Department: Civil Engineering

This dissertation deals with the laboratory investigation of the elastic properties of sedimentary rocks from Brazilian sedimentary basins. Emphasis is given to the measurement of attenuation attributes of compressional and shear waves in shale and sandstone samples under several levels of effective confining pressure. A literature review is done about the techniques used to measure attenuation attributes in rock samples. This review serves to establish a comparative pattern of our measured attributes with those described in the literature for similar lithological types, and also to investigate the variables that affect the attenuation attributes. The method used for measurements of attenuation attributes was spectral analysis of propagating waves. The results obtained were consistent with the results described in the literature for similar lithological types, and indicate that the factor of quality of waves, which is an attribute inversely proportional to wave attenuation, tends to increase with increasing confining pressure. While $Q_P > Q_S$ in immature shales, inverse relationship occurs in supermature shales. This suggests a potential method to distinguish between generating and sealing shales.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
<i>ABSTRACT</i>	<i>vi</i>
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xv
CAPITULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos teóricos	
1.2 Coeficiente de atenuação e decremento logarítmico	4
1.3 - Fator de qualidade	5
CAPITULO II - MÉTODOS DE MEDIÇÃO	8
2.1 - Método laboratorial para medição de velocidades	8
2.2 - Métodos para medição de atributos de atenuação	9
2.2.1 - Vibrações livres	10
2.2.2 - Vibrações forçadas	11
2.2.3 - Curvas de Tensão-Deformação	13
2.2.4 - Propagação de ondas	15
2.2.4.1 - Análise de ecos	17
2.2.4.2 - Transmissão de pulsos	18
2.2.4.2.1 - Tempo de subida	19
2.2.4.2.2 - Razão espectral	20
2.2.4.2.3 - Outras técnicas de transmissão	22
CAPÍTULO III - MATERIAL DE ESTUDO	24
3.1 - Preparação das amostras de rocha	25
3.2 - Sistema experimental para medição de propriedades elásticas	25
3.3 - Descrição das amostras de rocha	27
3.3.1 - Primeira campanha de ensaios	27
3.4 Programa Matlab para extração de atributos de atenuação	36
CAPÍTULO IV:- RESULTADOS	37
4.1 Formas de onda registradas	38
4.1.1 Primeira campanha de ensaios	38
CAPÍTULO V - ANÁLISES DOS RESULTADOS	82

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
6.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXO I - Programa Matlab para extração de atributos de atenuação	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 3.1 - Câmaras de pressurização para medição de propriedades elásticas de rochas (cilindros azuis) acopladas ao sistema de aquisição de dados (à direita)</i>	25
<i>Figura 3.2 – Esquema da parte eletrônica do sistema de medidas.....</i>	26
<i>Figura 3.3 – Esquema da parte mecânica do sistema de medidas.....</i>	27
<i>Figura 3.4 – Fotografia da amostra de arenito ZAF-19.</i>	28
<i>Figura 3.5 – Fotografia da amostra de arenito fino ZF-13.</i>	29
<i>Figura 3.6 – Fotografia da amostra de arenito ZP-05.....</i>	30
<i>Figura 3.7 – Fotografia da amostra de arenito ZP-28.....</i>	31
<i>Figura 3.8 – Fotografia da amostra de folhelho ZF-01.</i>	32
<i>Figura 3.9 – Fotografia da amostra de folhelho ZF-10.</i>	33
<i>Figura 3.10 – Fotografia da amostra de folhelho ZF-17.</i>	34
<i>Figura 3.11 – Fotografia da amostra de folhelho ZF-22.</i>	35
<i>Figura 4.1 – Formas de onda P e S registradas na amostra de referência de alumínio utilizada na primeira campanha de ensaios.</i>	39
<i>Figura 4.2 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-01.</i>	40
<i>Figura 4.3 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZP-05.</i>	41
<i>Figura 4.4 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-10.</i>	42
<i>Figura 4.5 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-13.</i>	43
<i>Figura 4.6 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-17.</i>	44
<i>Figura 4.7 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZAF-19.....</i>	45
<i>Figura 4.8 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-22.</i>	46
<i>Figura 4.9 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-28.</i>	47
<i>Figura 4.10 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 1000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	49
<i>Figura 4.11 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 1000 psi.</i>	49
<i>Figura 4.12 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 2000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	50
<i>Figura 4.13 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 2000 psi.</i>	50
<i>Figura 4.14 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 3000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	51
<i>Figura 4.15 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 3000 psi.</i>	51
<i>Figura 4.16a – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 4000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	52

<i>Figura 4.16b – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 4000 psi.</i>	52
<i>Figura 4.17 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 5000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	53
<i>Figura 4.18 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 5000 psi.</i>	53
<i>Figura 4.19 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S a 2000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	54
<i>Figura 4.20 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZAF-19 a 2000 psi.</i>	54
<i>Figura 4.21 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S a 3000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	55
<i>Figura 4.22 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZAF-19 a 3000 psi.</i>	55
<i>Figura 4.23 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S a 4000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	56
<i>Figura 4.24 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZAF-19 a 4000 psi.</i>	56
<i>Figura 4.25 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S a 5000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).</i>	57
<i>Figura 4.26 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZAF-19 a 5000 psi.</i>	57
<i>Figura 4.27 – As figuras (a), (b), (c), representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 1000, 2000 e 3000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZP-05 a 1000, 2000 e 3000psi, com seus respectivos valores $3,9e-06$, $2,9e-06$ e $2e-06$.</i>	58
<i>Figura 4.28 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000 e 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZP-05 a 4000 e 5000psi, com seus respectivos valores $1,4e-06$ e $1,7e-06$.</i>	59
<i>Figura 4.29 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000 e 4000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-05 a 2000, 3000 e 4000psi, com seus respectivos valores $2e-06$, $1,9e-06$, $2,3e-006$.</i>	60
<i>Figura 4.30 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência</i>	

(em azul), para as pressões de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-05 a 5000psi com valor $1,8e-06$	61
Figura 4.31 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-01(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000 e 4000psi. As figuras (d),(e) e determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-01 a 2000, 3000 e 4000psi, com seus respectivos valores $1,5e-06$, $1,1e-06$ e $9,5e-07$	62
Figura 4.32 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-05 a 5000psi com valor $9,7e-07$	63
Figura 4.33 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-01 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000 e 3000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-01 a 2000 e 3000psi, com seus respectivos valores $1,6e-06$, $1,7e-06$	63
Figura 4.34 - As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-01(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000 e 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-01 a 4000 e 5000psi,com seus respectivos valores e $9,9e-07$ e $1,1e-06$	64
Figura 4.35 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-10(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 4000 e 5000psi. As figuras (d), (e) (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-10 a 2000, 4000 e 5000psi,com seus respectivos valores $1,6e-06$, $1,1e-06$ e $9,7e-07$	65
Figura 4.36a – As figuras (a), (b) (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-10(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000, 4000psi. As figuras (d),(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-10 a 2000, 3000 e 4000 psi,com seus respectivos valores $6,6e-06$, $5,2e-06$ e $3,5e-06$	66
Figura 4.36b – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-10(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para a pressão de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-10 a 5000psi com valor $2,6e-06$	67
Figura 4.37 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-17(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 1000, 2000 e 3000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-17 a 1000, 2000 e 3000 psi,com seus respectivos valores $2,8e-06$, $2,5e-06$ e $2,3e-06$	68

<i>Figura 4.38 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-17(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000 e 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-17 a 4000 e 5000 psi,com seus respectivos valores 1,7e-06 e 1,6e-06.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.39 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-17(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000, 4000psi. As figuras (d)(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-17 a 2000, 3000 4000psi,com seus respectivos valores 3,2e-06, 2e-06 e 2,7e-06</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.40 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-17(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-17 a 5000psi com valor 3,2e-06</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.41 – As figuras (a), (b) (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-22(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 1000, 2000 e 3000psi. As figuras (d) (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-22 a 1000, 2000 e 3000psi, com seus com seus respectivos valores 1,8e-06, 1,4e-06 e 1,3e-06,</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.42 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-22(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000, 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-22 a 4000 e, 5000psi,com seus respectivos valores 1e-06 e 9,9e-07</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.43 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-22(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-22 a 2000psi, com valor 3,9e-06</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.44 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-22(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 3000, 4000 e 5000psi. As figuras (d),(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-22 a 3000 4000 e 5000psi,com seus respectivos valores4,4e-06, 3,7e-06 e 2,8e-06</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.45 – As figuras (a) (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-13(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 1000, 2000 e 3000psi. As figuras (d),(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-13 a 1000, 2000, 3000 psi,com seus respectivos valores 3,2e-06, 1,6e-06, 9,5e-07</i>	<i>75</i>

<i>Figura 4.46 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-13(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000 e 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-13 a 4000 e 5000psi,com seus respectivos valores 7,2e-07 e 5,4e-07.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.47 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-13(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-13 a 2000psi, com valor 2,3e-06.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.48 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-13(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 3000, 4000 e 5000psi. As figuras (d),(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-13 a 3000 4000 e 5000psi,com seus respectivos valores 2,5e-06, 2,3e-06 e 2e-06</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.49 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZP-28(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000 e 5000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZP-28 a 2000, 3000 e 5000 psi,com seus respectivos valores 2,5e-06, 1,6e-06 e 1,1e-06.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.50 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-28(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000, 4000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-28 a 2000, 3000 4000 psi,com seus respectivos valores 5,6e-06, 4e-06, 3,7e-06 e 3,2e-06.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.51 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-28(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-28 a 5000psi, com o valor 3,2e-06.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.1 – Velocidade da onda P em função da pressão confinante para todas as amostras. A cor laranja indica amostras de arenito mal selecionado, a cor verde folhelhos supermaturos e a cor preta folhelhos imaturos.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.2 – Velocidade da onda S em função da pressão confinante para todas as amostras. As amostras indicadas com símbolos de cor laranja são de arenito mal selecionado, as amostras com símbolos na cor verde são de folhelhos supermaturos e as representadas por símbolos pretos são de folhelhos imaturos.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.3 – Fator de qualidade Q da onda P em função da pressão confinante para todas as amostras. A cor laranja indica amostras de arenito mal selecionado, a cor verde folhelhos supermaturos e a cor preta folhelhos imaturos.</i>	<i>85</i>

<i>Figura 5.4 – Fator de qualidade Q da onda S em função da pressão confinante para todas as amostras. A cor laranja indica amostras de arenito mal selecionado, a cor verde folhelhos supermaturos e a cor preta folhelhos imaturos.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.5 – Fator Q da onda P (linha cheia) e da onda S (tracejado) para as amostras de folhelho imaturo.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5.6 – Fator Q da onda P (linha cheia) e da onda S (tracejado) para as amostras de folhelho supermaturo.</i>	<i>86</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZAF-19.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 3.2 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-13.</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 3.3 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZP-05.</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 3.4 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZP-28.</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 3.5 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-01.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 3.6 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-10.</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 3.7 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-17.</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 3.8 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-22.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4.1 – Coeficientes de atenuação, onde utilizamos para seu calculo a frequência de corte, e fator Q para as ondas P e S das amostras da primeira campanha de ensaios.....</i>	<i>81</i>

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Historicamente as grandes descobertas de acumulações de hidrocarbonetos na Bacia de Campos foram realizadas com base na análise de mapas de amplitude sísmica. Esses mapas reproduzem contrastes de impedância elástica entre camadas, como também o nível de atenuação que as ondas elásticas sofrem ao se propagar nas camadas rochosas. Outra técnica de análise do dado sísmico, a técnica AVO (Amplitude Versus Offset), também é baseada no estudo da energia do sinal sísmico. No Brasil pouco se estudou a respeito dos coeficientes de atenuação das rochas que ocorrem nas nossas bacias sedimentares. Também pouco se sabe como essa propriedade se modifica com a variação de condições ambientais como pressão, saturação e temperatura. O objetivo dessa dissertação é caracterizar um conjunto de rochas sedimentares, especialmente amostras de folhelhos, em termos de suas propriedades de atenuação de ondas elásticas. Um estudo experimental para medição dos coeficientes de atenuação das rochas sedimentares brasileiras põe luz na análise dos dados sísmicos adquiridos em nossas bacias, fornecendo suporte técnico para a interpretação de dados sísmicos do tipo *time-lapse* onde as propriedades dos reservatórios mudam em consequência da própria produção de hidrocarbonetos.

As rochas não são materiais perfeitamente elásticos. À medida que se propagam pelas rochas, as ondas têm suas amplitudes reduzidas pelo processo de atenuação e suas formas alteradas, sendo suas velocidades dependentes da frequência devido ao processo de dispersão. Estes fenômenos são interligados e seus efeitos combinados são denominados absorção sísmica, atribuída ao comportamento parcialmente elástico das rochas durante a propagação das ondas sísmicas. Um efeito da absorção, no domínio do tempo, é a mudança da forma no sinal, enquanto no domínio da frequência é a deformação dos espectros de amplitudes e de fase.

Assim, torna-se necessário ainda o conhecimento das propriedades dissipativas ou atenuativas das rochas, especialmente para o caso das rochas que ocorrem nas bacias sedimentares brasileiras. O conhecimento das propriedades de atenuação de ondas elásticas apresenta potenciais aplicações na detecção direta de fluidos, delimitação e caracterização de reservatórios, monitoramento da produção e determinação de litologia.

Caracterizar alguns espécimes de rochas sedimentares brasileiras (arenitos e folhelhos) em termos das suas propriedades de atenuação das ondas elásticas é o objetivo deste trabalho. Trata-se de um projeto experimental para o qual foram utilizados os equipamentos disponíveis no Laboratório de Física de Rochas do CENPES e desenvolvido *software* próprio para o processamento dos dados. Além da realização de ensaios para medição dos coeficientes de atenuação de rochas sob diversos níveis de pressão e com saturação residual.

1.1 – Aspectos teóricos

As ondas elásticas compressionais (P) e cisalhantes (S) apresentam, em geral, velocidades que aumentam com a frequência e apresentam amplitudes sempre decrescentes conforme estas se propagam nas rochas. Tais observações são intimamente relacionadas e, apesar de complicarem as correlações entre dados de campo e de laboratório, revelam detalhes acerca do espaço poroso e dos fluidos. Informações como litologia, estado físico, grau e tipo de saturação das rochas podem ser estimadas a partir de suas propriedades de atenuação, tornando a atenuação importante para muitas aplicações da indústria do petróleo.

Geralmente definem-se as propriedades elásticas das rochas em termos dos módulos elásticos e/ou velocidades de ondas P e S e da densidade. Por outro lado, vários trabalhos especificam as propriedades atenuativas através de diversos parâmetros derivados de diferentes tipos de medidas, tornando útil a definição das grandezas e suas inter-relações, tornando possível a comparação de dados de atenuação de fontes distintas.

Comumente mede-se a atenuação pelo coeficiente de atenuação α , que é a constante de decaimento exponencial da amplitude de uma onda plana em um meio homogêneo, ou pelo fator de qualidade Q (ou seu inverso $1/Q$, o fator de dissipação), ou ainda pelo decremento logarítmico δ . Tais grandezas relacionam-se segundo:

$$\frac{1}{Q} = \frac{\alpha V}{\pi f} = \frac{\delta}{\pi} \quad (1.1)$$

onde V é a velocidade (m/s) e f é a frequência (Hz). O coeficiente de atenuação α tem como unidade de medida o inverso da distância (1/m) e o fator de qualidade é uma grandeza adimensional.

Cada modo de propagação de onda tem determinada velocidade e atenuação associadas. Descrevem-se brevemente nos parágrafos a seguir as definições dos indicadores de absorção, suas relações, unidades e fatores de conversão. Apresentam-se também as equações que relacionam velocidade com fator de qualidade referente a diferentes modos de propagação.

É interessante observar a equação derivada por Kjartansson (1979) para a função transferência (resposta impulsiva no domínio da frequência) da absorção, conforme descrito em Vasquez (2000):

$$H(w) = e^{-\alpha x} e^{\frac{-iwx}{V}} \quad (1.2)$$

onde x é a distância percorrida pela frente de onda, V a velocidade de propagação correspondente em cada frequência e w a frequência angular ($w = 2\pi f$). Evidencia-se nesta expressão a ocorrência dos dois fenômenos associados à absorção. Um é a atenuação ou perda de amplitude representada pelo coeficiente α . Atualmente é aceito que α é diretamente proporcional à frequência ($\alpha = \gamma f$, onde γ é a constante de atenuação) indicando que altas frequências são mais atenuadas que baixas frequências. O outro é a dispersão, que afeta somente a fase: cada componente de frequência viaja com uma velocidade (velocidade de fase). Estes dois fenômenos estão sempre presentes, de acordo com a relação de dispersão que representa a dependência da velocidade em função da frequência.

Futterman (1962) obtém a seguinte relação de dispersão para o modelo de Q quase constante (Q independente de f em uma faixa de frequências), onde V_r é a velocidade da frequência de referência f_r :

$$V = \frac{V_r}{1 - \frac{1}{\pi Q} \ln \frac{f}{f_r}} \quad (1.3)$$

Kjartansson (1979), supondo Q independente de f em seu modelo de Q constante, mostra que:

$$\frac{V}{V_r} = \left(\frac{f}{f_r}\right)^{\frac{1}{\pi} \arctg\left(\frac{1}{Q}\right)} \approx \left(\frac{f}{f_r}\right)^{\frac{1}{\pi Q}} \quad (1.4)$$

Expandindo-se a Equação (1.3) em série de Taylor e a (1.4) em série de MacLaurin pode-se mostrar que, para meios pouco dissipativos ($Q > 10$) como geralmente ocorre com as rochas, aproximam-se os dois casos por:

$$\frac{V}{V_r} \approx 1 + \frac{1}{\pi Q} \ln\left(\frac{f}{f_r}\right) \quad (1.5)$$

Tem-se utilizado a equação (1.5) como uma forma de obtenção do fator em campo (Silva et al., 1997) combinando-se dados de perfis sônicos e de perfis sísmicos verticais (VSP).

1.2 - Coeficiente de atenuação e decremento logarítmico

Pode-se descrever a amplitude de uma onda plana propagando-se em um meio elástico homogêneo, no caso unidimensional, por:

$$A(x, t) = A_0 e^{i(kx - wt)} \quad (1.6)$$

onde k é o número de onda ($K = 2\pi/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda). Pode-se incluir o efeito da inelasticidade tornando a frequência ou o número de onda grandezas complexas. Neste caso:

$$A(x, t) = A_0 e^{-\alpha x} e^{i(Kx - wt)} \quad (1.7)$$

$$k = k_R + i\alpha$$

e

$$V = \frac{w}{K_R} \quad (1.8)$$

onde α é o coeficiente de atenuação e V é a velocidade de fase.

Seja a atenuação caracterizada por:

$$A(x, t) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1.9)$$

Pode-se expressar o coeficiente α como:

$$\alpha = \frac{-1}{A(x)} \frac{dA(x)}{dx} = -\frac{d}{dx} \ln A(x) \quad (1.10)$$

Para dois registros de amplitudes $A(x_1)$ e $A(x_2)$ nos pontos x_1 e x_2 ($x_1 < x_2$) obtém-se:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left[\frac{A(x_1)}{A(x_2)} \right] \quad (1.11)$$

em nepers por unidade de comprimento ou apenas inverso do comprimento. Em dB/comprimento tem-se:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} 20 \log \left[\frac{A(x_1)}{A(x_2)} \right] \quad (1.12)$$

ou $\alpha(\text{dB/m}) = 8,686 \alpha(1/\text{m})$.

Aplica-se a definição de decremento logarítmico a um sistema oscilante em decaimento livre:

$$\delta = \ln \left[\frac{A(x_1)}{A(x_2)} \right] = \alpha \lambda = \frac{\alpha V}{f} \quad (1.13)$$

onde A_1 e A_2 são as amplitudes em dois ciclos consecutivos. Métodos experimentais como o pêndulo torsional e a barra oscilante medem o decremento logarítmico baseando-se na definição acima. A medida de atenuação em dB por comprimento de onda é um coeficiente de atenuação relacionado a δ por: $\alpha(\text{dB}/\lambda) = 8,686 \delta$.

1.3 - Fator de qualidade

Muitas vezes se expressa a atenuação através de uma grandeza adimensional dita fator de qualidade Q ou seu inverso $1/Q$. Q é uma propriedade intrínseca à cada rocha, dada pela razão entre energia armazenada e energia dissipada a cada ciclo (O'Connell e Budiansky, 1978):

$$Q = \frac{wE}{-dE/dt} = \frac{2\pi W_M}{\Delta W} = \frac{4\pi W_m}{\Delta W} \quad (1.14)$$

onde E é a energia instantânea do sistema, dE/dt é a taxa de perda de energia, W_M é a energia armazenada na situação de tensão e deformação máximas, W_m é a energia média armazenada e ΔW é a energia dissipada por ciclo de uma excitação harmônica. Assim, quanto maior o fator Q , menos dissipativo ou atenuativo é o meio. Os modelos mais aceitos atualmente indicam que Q independe da frequência. Supõem-se nas definições a seguir valores de $Q > 10$ (pequenas perdas). Geralmente tal condição é satisfeita nas situações de interesse para a geofísica de exploração. (Toksoz e Johnston, 1981.)

Alternativamente define-se o fator Q baseando-se em relações de tensão-deformação. Um meio pouco dissipativo sujeito a tensões variando senoidalmente responde com deformações também senoidais, embora defasadas de certa diferença de fase φ da excitação. Tal diferença de fase relaciona-se ao módulo elástico complexo $M = M_R + iM_I$ segundo:

$$n \frac{1}{Q} = \frac{M_I}{M_R} = \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi \quad (1.15)$$

Pode-se aplicar o método de medidas do fator Q através da observação de relações tensão-deformação a baixas frequências, na faixa de alguns Hz a dezenas de Hz ou mais, e pequenas deformações (Gordon e Davis, 1968; McKavanagh e Stacey, 1974; Brennan e Stacey, 1977; Spencer Jr. et al., 1994; Batzle et.al., 1996).

A rigor deve-se incluir um termo de segunda ordem nas relações entre Q e α para materiais muito dissipativos, pois a energia armazenada depende da derivada do módulo complexo em relação à frequência e também do próprio módulo (O'Connell e Budiansky, 1978; Hamilton, 1972) sendo que, admitindo-se pequenas perdas ($M_I \ll M_R$), tem-se:

$$\frac{1}{Q} \approx \frac{\alpha V}{\pi f} \quad (1.16)$$

Define-se Q para alguns sistemas dinâmicos utilizados em medidas de atenuação em termos da largura de banda de picos de ressonância:

$$Q = \frac{f_R}{\Delta f} \quad (1.17)$$

onde Δf é a largura, em frequência, entre dois pontos de meia potência (ou valor de amplitude 3dB abaixo do máximo) do pico de ressonância que ocorre à frequência f_R . Esta equação identifica-se à definição de Q em meios de baixa dissipação. Utiliza-se este princípio em sistemas como barra ressonante (Tittmann, 1977; Wyllie, 1962; Winkler, 1979) e pêndulos torsionais (Peselnick e Outerbridge, 1961) com oscilações forçadas, envolvendo ondas extensionais e/ou torsionais a frequências de 100 Hz a 100 kHz.

Existem diferentes métodos de medidas de velocidade e atenuação associados a diferentes modos de propagação que, portanto, medem diferentes quantidades relacionadas a módulos complexos distintos. Se Utilizarmos o princípio da

correspondência, Winkler e Nur (1979) mostram que os fatores de qualidade referentes a estes diferentes modos de propagação relacionam-se por:

$$\begin{aligned} \frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{Q_p} &= \frac{(1+\nu)}{Q_E} - \frac{2\nu(2-\nu)}{Q_s} \\ \frac{3}{Q_E} &= \frac{(1-2\nu)}{Q_p} - + \frac{2(\nu+1)}{Q_s} \\ \frac{(1+\nu)}{Q_k} &= \frac{3(1-\nu)}{Q_p} - \frac{2\nu(1-2\nu)}{Q_s} \end{aligned} \quad (1.18)$$

onde ν é a razão de Poisson,

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1.19)$$

Pode-se mostrar que uma das seguintes condições ocorre:

$$\begin{aligned} Q_s &> Q_E > Q_p > Q_k \\ Q_s &= Q_E = Q_p = Q_k \\ Q_s &< Q_E < Q_p < Q_k \end{aligned} \quad (1.20)$$

Caracterizar alguns espécimes de rochas sedimentares brasileiras (arenitos e folhelhos) em termos das suas propriedades de atenuação das ondas elásticas é o objetivo deste trabalho. Trata-se de um projeto experimental para o qual foram utilizados os equipamentos disponíveis no Laboratório de Física de Rochas do CENPES e desenvolvido *software* próprio para o processamento dos dados. Ensaios para medição dos coeficientes de atenuação de rochas foram realizados sob diversos níveis de pressão e com saturação residual.

CAPÍTULO II- MÉTODOS DE MEDIÇÃO

A medição acurada da atenuação intrínseca das ondas elásticas em rochas é uma tarefa não-trivial, pois essa propriedade é afetada por variáveis como divergência esférica, reflexão e difração, além da perda natural de energia durante o processo de propagação na rocha. Em laboratório, diversas técnicas são utilizadas para a medição da atenuação de ondas elásticas, como o método da barra ressonante (Gardner *et al.*, 1964), decaimento de reflexões múltiplas (Peselnick & Zietz, 1959) e métodos de transmissão de pulsos: razão espectral e tempo de subida do pulso (Bourbié *et al.*, 1987).

Neste Capítulo descreveremos as técnicas experimentais de medição de velocidades e atenuação, enfatizando-se aquelas utilizadas em laboratório, os princípios e conceitos básicos envolvidos, as vantagens e desvantagens de cada uma e as correções que devem ser aplicadas ao dado bruto para a obtenção dos valores de atenuação. Objetiva-se com esta revisão justificar a escolha do método utilizado neste trabalho e fornecer subsídios para uma análise crítica dos resultados alcançados.

2.1 - Método laboratorial para medição de velocidades

A medição de velocidades em amostras de rochas é realizada através da propagação de pulsos gerados por transdutores de onda P e/ou onda S. Esse é o método da medição por transmissão direta de ondas pulsadas e se constitui no método mais utilizado para medição de ondas elásticas em laboratório.

Para a aplicação desse método as amostras de rocha devem ser preparadas na forma de pequenos cilindros (plugues) com extremidades polidas e formando planos perfeitamente perpendiculares ao eixo do cilindro. Essas amostras são inseridas em um vaso de pressão com suas extremidades em contato com peças de aço (cabecotes), as quais contêm em seu interior transdutores ultra-sônicos que atuam como elementos de transmissão e recepção das ondas elásticas. O método da transmissão direta está baseado no tempo medido entre a transmissão, em uma extremidade, e a recepção da onda na outra extremidade do plugue.

O sistema de medição impõe um atraso nos tempos medidos, pois há propagação da onda dentro do próprio sistema antes dela se propagar no plugue. Por isso, é preciso descontar o tempo do sistema do tempo medido. A medição do tempo do sistema se dá através da medição do tempo de propagação da onda sem a presença do plugue, com os cabeçotes de transmissão e recepção postos em contato direto.

Desde que se conheça o comprimento do plugue, o tempo medido e o tempo do sistema, o cálculo da velocidade da onda no plugue é efetuado diretamente a partir da equação a seguir. Esse procedimento é repetido para cada nível de pressurização adotado na câmara de medição. Assim, a velocidade é dado por:

$$V = \frac{x}{(t_{\text{med}} - t_{\text{sis}})} \quad (2.1)$$

onde x é o comprimento do plugue, t_{med} é o tempo de chegada da onda medido com o plugue de rocha e t_{sis} é o tempo do sistema, o qual corresponde ao tempo de chegada da onda medido com os cabeçotes de transmissão e recepção colocados em contato direto, sem o plugue de rocha.

2.2 - Métodos para medição de atributos de atenuação

Medidas precisas de atenuação em campo ou em laboratório são de difícil realização. Além da atenuação intrínseca devida apenas à inelasticidade das rochas, as amplitudes das ondas sísmicas são afetadas por fatores como divergência geométrica, reflexões e espalhamento, que contribuem para a chamada atenuação extrínseca. Para obter-se a atenuação intrínseca torna-se necessária a correção destes e outros efeitos, o que em si é um procedimento complexo, cujo estudo não é objeto deste trabalho.

Johnston e Toksöz (1981) *apud* Vasquez (2000) classificam os métodos de medição da atenuação em laboratório segundo o princípio físico envolvido, dividindo-os em:

- Vibrações livres;
- Vibrações forçadas;
- Ciclos de tensão-deformação;
- Propagação de onda.

Cada um destes métodos pode ser dividido em subgrupos.

Os coeficientes de atenuação medidos, para uma dada amostra, por diferentes métodos podem não coincidir. Isso se dá principalmente pela diferença na faixa de frequências de medição e pelas condições físicas sob as quais a amostra é analisada.

2.2.1 - Vibrações livres

Nesta técnica de laboratório coloca-se a amostra de interesse em oscilação por meio de um pequeno impulso ou, no caso de amostras muito atenuativas, excita-se a amostra em uma de suas frequências de ressonância retirando-se a força de excitação em seguida, de forma a obter oscilações com maiores amplitudes. Observando-se o decaimento da amplitude destas vibrações livres, obtém-se o decremento logarítmico δ definido na equação:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{(t_1 - t_2)f} = \ln\left(\frac{A_\lambda}{A_i}\right) \quad (2.2)$$

onde A_1 e A_2 são as amplitudes nos tempos t_1 e t_2 , e f é a frequência natural de vibração livre do sistema. A_λ é a amplitude um comprimento de onda a partir de uma amplitude inicial A_i .

Pode-se calcular a atenuação (Q^{-1}) a partir do valor medido δ :

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} \quad (2.3)$$

A velocidade é medida nestes experimentos através do módulo elástico envolvido que, por sua vez, depende das dimensões da amostra, da frequência de vibração f e do momento de inércia I . Por exemplo, o módulo de rigidez (ou módulo de cisalhamento) para uma barra cilíndrica presa em uma extremidade e livre na outra, tendo comprimento L e diâmetro d é dado por :

$$\mu = 512 \frac{IL^2 f_R^2}{\pi d^4} \quad (2.4)$$

medindo-se a velocidade de fase da onda cisalhante $V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ na frequência de ressonância f_R

Permite-se com estes sistemas a realização de medidas a frequências bem baixas ($<10^{-2}$ Hz), diminuindo-se a frequência de vibração através do aumento da inércia do sistema, não sendo normalmente usados para frequências maiores que 10 Hz. Peselnik e Outerbridge (1961) *apud* Vasquez (2000) implementaram este método através de um pêndulo de torção: suspende-se uma bastão de rocha verticalmente, acoplado-se uma massa com grande momento de inércia à sua extremidade inferior. Submete-se a massa a um impulso após o qual o sistema vibra livremente. A frequência desta vibração livre é função das propriedades da rocha e do momento de inércia da massa. A taxa de decaimento da amplitude destas oscilações é atribuída à dissipação de energia na rocha, assumindo-se que outras perdas sejam desprezíveis.

Pode-se excitar as vibrações por efeitos piezoelétrico, eletromagnético e eletrostático, no caso de amostras pequenas com frequências ressonantes na faixa de KHz. Para estes tipos de excitação aplica-se uma cobertura condutora ou acopla-se um transdutor na rocha, necessitando-se das devidas correções sobre a frequência de ressonância. O efeito destas correções é mínimo para medidas de atenuação, mas crucial para determinação dos parâmetros elásticos. Como nas técnicas de ressonância, a determinação dos parâmetros de dissipação específicos depende do modo de vibração excitado.

No método das vibrações livres necessita-se confeccionar amostras de rochas cilíndricas longas com seção reta uniforme, constituindo uma séria dificuldade para uso prático do método. Além disso, deve-se aplicar uma tensão pequena de modo que a amostra não frature, que o fator Q e as constantes elásticas sejam independentes da amplitude e as tensões sejam uniformemente distribuídas pela amostra.

2.2.2 - Vibrações forçadas

Um método muito utilizado de medição da atenuação em laboratório é a vibração forçada longitudinal, flexural ou torsional de barras longas de rochas. Este método baseia-se no fenômeno de ondas estacionárias. Para ondas longitudinais e torsionais unidimensionais estacionárias a velocidade da onda é dada por:

$$V = \lambda f_n = \frac{2Lf_n}{n} \quad (2.5)$$

Para $n=1,2,3,\dots$, onde f_n é a frequência de ressonância do modo n e L é o comprimento da amostra. Para ondas flexurais os nós são não-eqüidistantes e a expressão torna-se mais complicada. Relações entre o módulo de Young e a frequência de ressonância para vibrações longitudinais e flexurais e entre o módulo de cisalhamento e a frequência de ressonância para vibrações torsionais derivadas de soluções exatas para a equação da onda tridimensional em geometrias cilíndricas e retangulares encontram-se relacionadas por Schreiber *et al.*(1973),*apud* Vasquez, 2000).

Para uma barra continuamente excitada pode-se obter Q a partir da largura do pico de ressonância da amplitude. Definindo Δf como a faixa de frequência entre valores para os quais a amplitude está 3dB (ou $1/\sqrt{2}$) abaixo do valor no pico da ressonância, pode-se mostrar que o fator Q (Vasquez et al. 2000) é dado por:

$$Q = \frac{f_n}{\Delta f} \quad (2.6)$$

Pode-se utilizar este método para materiais muito atenuativos com acurácia da ordem de 1 a 5 % (Vasquez et al. 2000).

Realizam-se excitações forçadas também por métodos eletrostáticos, eletromagnéticos ou piezoelétricos. O método de excitação eletrostático é melhor para amostras pouco atenuativas. Usa-se a excitação eletromagnética para amostras condutoras ou amostras com placas condutoras acopladas nas extremidades, gerando efeitos de carga que devem ser adequadamente corrigidos. Pode-se ainda adicionar massa à amostra reduzindo sua frequência de ressonância, viabilizando a operação em uma larga faixa de frequências (Tittmann, 1977 *apud* Vasquez, 2000). Para excitação piezoelétrica cimentam-se transdutores piezoelétricos na amostra, levando a combinação à ressonância (Quimby, 1925 *apud* Vasquez 2000). Dispõe-se de transdutores cerâmicos de alta eficiência e baixas perdas como, por exemplo, cerâmicas PZT (zirco-titanato de chumbo), tornando este método atrativo tanto para amostras de fatores de qualidade baixos quanto relativamente altos.

Apesar da determinação do fator de qualidade Q ser relativamente simples sobre uma larga faixa de frequências, as condições físicas sob as quais pode-se realizar

estes experimentos não envolvendo perdas externas são limitadas. Na vibração torsional apenas ondas cisalhantes estão envolvidas, uma vez que o acoplamento entre estas e o meio circundante (por exemplo, ar ou gás) é fraco. Para ondas longitudinais e flexurais pode-se ter significativo amortecimento ao longo da superfície cilíndrica e radiação das extremidades. As correções para estes efeitos são desprezíveis para materiais muito atenuativos expostos ao ar sob condição ambiente. Para materiais pouco atenuativos, como metais, recomenda-se realizar o experimento sob vácuo. No caso de amostras de rocha submetidas à pressão, como nesta pesquisa, podem ocorrer perdas altas comparadas à atenuação intrínseca. O encamisamento da amostra afeta a frequência de ressonância e a atenuação. Estas mudanças são geralmente pequenas e podem ser calculadas usando-se o princípio de Rayleigh (Gardner *et al.*, 1964). Para algumas rochas porosas, todavia, a camisa penetra na amostra, de sorte que os resultados obtidos representam uma média sobre a amostra e a camisa. Por outro lado, ao utilizarem-se amostras saturadas não encamisadas, isto é, com a superfície lateral livre, podem ocorrer perdas adicionais ligadas ao efeito Biot-Gardner-White, ligado ao fluxo radial do fluido no meio poroso que é induzido pelo gradiente de pressão de poros entre o centro da barra e sua superfície (Cadoret *et al.*, 1998 *apud* Vasquez, 2000).

2.2.3 - Curvas de Tensão-Deformação

Em linhas gerais este método consiste em submeter uma amostra de rocha a uma tensão σ pequena (não ultrapassando o limite de elasticidade, ou seja, deformação $\varepsilon < 10^{-6}$) variando senoidalmente com o tempo a uma frequência diferente de suas frequências de ressonância. No caso de uma amostra perfeitamente elástica ter-se-ia uma deformação ε senoidal em fase com a tensão, escalonada pelo módulo elástico M em questão. Por exemplo, para ciclos tração-compressão trata-se do módulo de Young E , para ciclos de cisalhamento, o módulo de cisalhamento μ . Um gráfico mostrando os valores de tensão e deformação em um plano cujo eixo da abscissa seja $\frac{|\varepsilon(t)|}{\varepsilon_M}$ e o eixo das ordenadas $\frac{|\sigma(t)|}{\varepsilon_M |M|}$, sendo ε_M a deformação máxima, obter-se-ia uma reta passando pela origem com inclinação $\frac{\pi}{4}$ rad ou 45° . No caso real de uma amostra inelástica tem-se uma deformação também senoidal, mas defasada da tensão de um certo ângulo φ . Ocorre histerese na relação tensão-deformação e a reta torna-se uma elipse (cujo eixo maior corta a origem). A área entre a parte de

carga e a de alívio do ciclo de tensão-deformação (área interna à elipse) é igual à energia dissipada no ciclo e proporcional à parte imaginária do módulo elástico. Pode-se calcular a atenuação por $1/Q$ onde W_M é a energia elástica máxima armazenada no ciclo e W_m a energia elástica média armazenada durante o ciclo:

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta W}{2\pi W_M} = \frac{\Delta W}{4\pi W_m} \quad (2.7)$$

Gordon e Davis (1968) *apud* Vasquez (2000) descrevem um sistema combinando a possibilidade de uso de curvas de tensão-deformação a baixas frequências e a utilização de vibrações forçadas a maiores frequências, realizando experimentos envolvendo os modos longitudinal e torsional a frequências de 14 MHz a 90 KHz.

Spencer (1981) e Batzle (1999) *apud* Vasquez (2000) utilizam diretamente a diferença de fase entre tensão e deformação para a determinação de Q , assumindo pequenas perdas de energia ($Q \geq 10$).

$$\frac{1}{Q} = \text{tg } \varphi \approx \varphi \quad (2.8)$$

Pode-se obter a velocidade pela medida do módulo elástico envolvido:

$$V_\varphi = \sqrt{\frac{|M|}{\rho}} \quad \text{com} \quad |\sigma| = |M||\varepsilon| \quad (2.9)$$

sendo ρ a densidade, σ a tensão e ε a deformação onde M é o módulo complexo e M_r é a parte real do módulo complexo. Esta velocidade, a rigor, é ligeiramente menor que a velocidade de fase V_φ :

$$V_\varphi = \sqrt{\frac{2|M|^2}{\rho[|M| + M_R]}} \quad (2.10)$$

A necessidade de operar com deformações pequenas e precisamente controladas e amostras cuidadosamente preparadas constituem sérias dificuldades deste método. Distorções harmônicas na função de excitação podem acarretar a presença de “fantasmas” no ciclo de tensão-deformação. McKavanagh e Stacey (1974) *apud* Vasquez (2000) utilizaram este método com amplitudes de deformação da ordem de 10^{-5} e detectaram mecanismos de atenuação não lineares que se manifestaram como “fantasmas” nos ciclos de tensão-deformação. Os mesmos

concluíram que a fricção nos contatos entre grãos é um mecanismo relevante de atenuação sísmica. Brennan e Stacey (1977) *apud* Vasquez (2000), com um experimento mais sensível, verificaram que com deformações $\leq 10^{-6}$ (como ocorre na sísmica) o mecanismo de atenuação é de fato linear, mas a fricção não é importante.

2.2.4 - Propagação de ondas

Ao contrário dos métodos de medição descritos anteriormente, algumas técnicas baseadas na propagação de onda aplicam-se não só a amostras em laboratório, mas também a dados de campo. Mesmo em laboratório tais técnicas envolvem parâmetros de perda similares àqueles medidos em experimentos de campo, tornando-as atrativas. Por outro lado, utilizam-se faixas de frequências (e comprimentos de onda) bem diferentes no campo e no laboratório e os mecanismos de atenuação predominantes em cada uma destas situações podem ser diferentes. Uma vez que neste trabalho utilizam-se técnicas de medição baseadas na propagação de onda, realiza-se aqui uma revisão um pouco mais extensa.

As técnicas de propagação de onda apresentam diversas dificuldades experimentais e de interpretação. Nestes métodos geralmente assume-se que a amplitude da onda elástica, considerada como onda plana, decai exponencialmente com a distância ou tempo de propagação. Na realidade, além da atenuação intrínseca da rocha, a onda sofre perdas externas adicionais, algumas previsíveis como alargamento do feixe, perdas de difração, efeitos de borda, espalhamento, e outras de difícil quantificação, como perdas de acoplamento dos transdutores. Devem-se corrigir tais efeitos do dado bruto ou evitá-los no projeto do experimento.

O efeito de alargamento do feixe pode ser significativo a baixas frequências (< 1 MHz). Correções diretas deste efeito se baseiam na hipótese de onda plana ou esférica, devendo-se determinar então a extensão da região de onda plana, dependente do tamanho do transdutor e comprimento de onda (Williams, 1951 *apud* Vasquez, 2000). Na prática torna-se mais fácil, e mais seguro, projetar o experimento de modo a obterem-se perdas de alargamento mínimas quando comparadas à atenuação intrínseca.

Perdas por difração tornam-se importantes sob comprimentos de onda relativamente grandes em comparação com o diâmetro do transdutor. Devido ao

alargamento do feixe, podem ocorrer reflexões nas paredes laterais da amostra e conversões de modos interferindo com a onda direta. Pode-se observar facilmente tal interferência na técnica de análise de eco como um decaimento não exponencial da amplitude. Truell *et al.* (1969) tratam o problema de difração teoricamente, mas geralmente procura-se atacá-lo empiricamente utilizando-se tabelas de correção (Seki, 1956; Khimunin, 1972; Benson e Kiyohara, 1974; Papadakis, 1959, 1966; Papadakis, 1973; *al apud* Vasquez, 2000) e projetando-se o experimento de modo que a razão diâmetro da amostra/diâmetro do transdutor seja grande, minimizando tais efeitos.

As perdas por espalhamento ocorrem no caso do comprimento de onda apresentar tamanho semelhante à dimensão das heterogeneidades da amostra. Papadakis (1961, 1965a, 1965b; *apud* Vasquez, 2000) estuda exaustivamente este problema no caso de ensaios não destrutivos com metais a altas frequências (dezenas de MHz), tendo-se observado perdas por espalhamento em rochas a frequências pouco maiores que 1 MHz (Winkler, 1983; Blair, 1990; *apud* Vasquez, 2000).

Apesar de menos crítico que em outros métodos (como observação de curvas tensão-deformação), as amostras devem ser preparadas cuidadosamente. Extremidades não paralelas podem ocasionar perdas não exponenciais devido a variações de fase sobre a superfície do transdutor. Em outras palavras, uma frente de onda plana reflete-se ou transmite-se fora de fase por uma fronteira não paralela, inclinada ou rugosa. Este problema torna-se mais importante na técnica de eco, sendo analisado por Truell e Oates (1963), que mostram que o desvio permitido do paralelismo é inversamente proporcional ao valor de Q da amostra e da frequência do pulso utilizado.

Pode-se ocorrer ainda perdas de energia no próprio transdutor, na ligação entre transdutor e amostra e no sistema eletrônico de medida. As propriedades do transdutor são geralmente conhecidas, podendo-se escolher um material com Q mecânico muito maior que o da amostra. Todavia, as demais perdas são impossíveis de se calcular teoricamente, devendo ser determinadas empiricamente (Truell *et al.*, 1969) ou minimizadas no projeto do experimento.

Geralmente os experimentos de propagação de onda são classificados em laboratório em métodos de análise de ecos e métodos de transmissão. Os transdutores podem ser excitados com um pulso curto, fornecendo um valor de

atenuação médio sobre uma faixa de frequências relativamente larga, ou com um pulso sintonizado, cujo espectro apresenta uma faixa limitada de frequências.

2.2.4.1 - Análise de ecos

Calcula-se a atenuação na técnica de eco observando-se o decaimento de amplitude de reflexões múltiplas em uma superfície livre, assumindo um decaimento exponencial. Se o sistema eletrônico de medida é linear e as amplitudes são determinadas diretamente, pode-se calcular o coeficiente de atenuação α de:

$$\alpha = \frac{1}{2L} \ln \left[\frac{A(1)}{A(2)} \right] \quad (2.11)$$

onde L é o comprimento da amostra, A(1) é amplitude em um eco e A(2) é a amplitude do próximo eco.

Pode-se estimar o coeficiente de atenuação também com auxílio de uma curva de decaimento exponencial calibrada superposta às imagens do eco. Medidas obtidas desta forma são dadas em dimensão de tempo inverso. A vantagem essencial deste método sobre a utilização de amplitudes absolutas é que se detectam facilmente decaimentos não exponenciais. As técnicas de análise de ecos são contra-indicadas para amostras altamente atenuativas, sendo geralmente usadas para amostras de Q elevados, como metais e monocristais.

Um aspecto delicado da análise de ecos é a consideração de que a onda reflète-se sem perdas na superfície livre, limitando a validade do método em estudos a altas pressões, onde ocorre perda de energia para o meio de pressurização durante a reflexão. Peselnick e Zietz (1959) aplicam esta técnica com sucesso em alguns calcários de granulação fina à pressão atmosférica, concluindo que as perdas por alargamento do feixe, perdas por difração e reflexões incompletas na superfície livre são desprezíveis quando comparadas à atenuação intrínseca.

Winkler e Plona (1982) *apud* Vasquez (2000) propõem uma modificação da técnica de eco permitindo a operação em vasos de pressão. O método consiste em comparar as reflexões obtidas nas duas interfaces formadas por um primeiro

retardador e o topo da amostra, e um segundo retardador e a base da amostra. Para este arranjo tem-se o coeficiente de atenuação dado por:

$$\alpha = \frac{1}{2L} \ln \left| \frac{|R_{23}(w)|}{|R_{12}(w)|} \frac{A(w)}{A'(w)} \left| 1 - R_{12}^2(w) \right| \right| \quad (2.12)$$

onde L é o comprimento da amostra, A(w) e A'(w) são as amplitudes das duas reflexões a serem comparadas, R₁₂(w) é o coeficiente de reflexão na interface retardador/topo da amostra e R₂₃(w) o coeficiente de reflexão na interface base da amostra/retardador.

A dependência dos coeficientes de reflexão com a frequência deve-se ao caráter inelástico dos materiais envolvidos. É necessária a calibração do sistema com amostras de referência para a realização das diversas correções envolvidas. Obtém-se a velocidade de fase a partir da diferença de fase φ entre o primeiro e o segundo pulsos:

$$V(w) = \frac{wL}{\varphi} \quad (2.13)$$

Esta modificação da técnica de eco é mais indicada para a medida de atenuação em amostras de rocha e algumas variações do arranjo original vêm sendo aplicadas até hoje (Klimentos e McCann, 1990; Best e McCann, 1995; Best, 1997; *al apud* Vasquez, 2000).

2.2.4.2 - Transmissão de pulsos

Indica-se o método de transmissão direta de pulsos para uso em amostras encamisadas em vasos de pressão. Utilizando-se razões espectrais minimizam-se muitos aspectos prejudiciais do método de eco. Geralmente, nestes experimentos, obtém-se a velocidade diretamente da divisão da distância viajada pela onda (comprimento da amostra) pelo tempo de trânsito gasto na amostra (já descontados eventuais atrasos de tempo nas partes eletrônica e mecânica do sistema de medida), conforme descrito na equação (2.1).

Tal medida pode fornecer valores de velocidades não coincidentes com a velocidade de grupo ou com a velocidade de fase (Bourbié *et al.*, 1987), mas obtém-se velocidades de fase com boa precisão combinando-se adequadamente a geometria da amostra e dos transdutores (Dellinger e Vernik, 1994, *apud* Vasquez, 2000).

Relatam-se diversos tipos de experimentos de transmissão na literatura, com diferentes tamanhos de amostra e localização relativa do transmissor e do receptor (White, 1965 *apud* Vasquez, 2000). Na maioria dos casos colocam-se os transdutores nas extremidades opostas da amostra. Utilizando-se amostras longas pode-se medir a onda guiada (McSkimin, 1956 *apud* Vasquez, 2000). Neste caso deve-se preparar a amostra cuidadosamente, sendo necessários cálculos extensivos para determinar o efeito de conversões de modos nas paredes laterais, que dependem das propriedades elásticas da amostra e também de sua própria atenuação. Há exemplos utilizando grandes blocos como amostra, sendo transmissores e receptores usados para medir perda de amplitude como função da distância (Blair, 1990 *apud* Vasquez, 2000). Neste caso, se o diâmetro dos transdutores é pequeno e a distância entre eles é grande em relação ao comprimento de onda, pode-se assumir alargamento do feixe simples inverso à distância e calcular a atenuação, com alguma incerteza, do decaimento da amplitude para um pico particular num trem de onda em função da separação transmissor-receptor. Grande parte dos exemplos reportados, no entanto, envolvem a utilização de amostras com razão comprimento/diâmetro pequena, minimizando os problemas de conversões de modo e reflexões laterais, mas podendo envolver difrações significativas.

2.2.4.2.1 - Tempo de subida

Uma técnica para determinação da atenuação por transmissão de pulsos emprega a mudança na forma do pulso ao propagar-se pela rocha, geralmente caracterizada pelo tempo de subida T , cuja definição mais comum é a diferença em tempo entre a intersecção da tangente de máxima inclinação do primeiro quarto de comprimento de onda com as amplitudes nula e máxima. Baseados em dados de ondas diretas no campo, Gladwin e Stacey (1974) *apud* Vasquez (2000) sugerem a seguinte relação empírica entre o tempo de subida e o fator Q :

$$T = T_1 + b \int_0^t Q^{-1} dt \quad (2.14)$$

onde t é o tempo de trânsito, T_1 o tempo de subida inicial em $t=0$ (ou próximo à fonte) e b uma constante. Utiliza-se geralmente a forma integrada no tempo da equação acima: $T = T_1 + btQ^{-1}$.

Tem-se utilizado a técnica de tempo de subida em dados de VSP (Tonn, 1991 *apud* Vasquez, 2000) e sísmica de reflexão (Jannsen *et al* 1985 *apud* Vasquez, 2000). Blair e Spathis (1982) *apud* Vasquez (2000) mostram que a quantidade T_1 é uma função da fonte, mas não relaciona-se apenas a seu tempo de subida, dependendo mais do seu teor de altas frequências, e que a “constante” b é na verdade uma função que varia pouco com Q (para $Q > 20$), dependendo também da fonte (Blair e Spathis, 1984 *apud* Vasquez, 2000) e até do detector (Blair, 1982 *apud* Vasquez, 2000). Estes autores sugerem modificar-se a técnica de modo a modelar-se o pulso recebido a diferentes distâncias baseando-se no pulso próximo à fonte e avaliar-se qual fator Q fornece o melhor ajuste dos tempos de subida em função da distância à fonte. Stewart (1984) *apud* Vasquez (2000) modifica a técnica original do tempo de subida incluindo também o tempo de descida como forma de estimar-se a atenuação sem considerar o pulso original emitido pela fonte, contanto que este apresente uma só polaridade.

2.2.4.2.2 - Razão espectral

O método mais amplamente empregado para a medição da atenuação de ondas elásticas em rochas é o método da razão espectral (Bourbié *et al.*, 1987). Este permite a eliminação de muitos dos problemas associados com os métodos de propagação de onda, além de se basear no fato de que altas frequências são atenuadas preferencialmente em relação às baixas frequências, sendo originalmente usada em estudos de sismologia (Press, 1964 *apud* Vasquez, 2000).

Neste trabalho a análise dos coeficientes de atenuação foi realizada através do método da razão espectral. Embora de implementação relativamente simples, esse método requer uma preparação cuidadosa das amostras e um controle acurado das variáveis ambientais que podem afetar os resultados dos ensaios. Essas variáveis ambientais são: pressão, saturação, temperatura, potência de excitação da fonte, acoplamento e direção de polarização da fonte e do receptor (no caso da onda cisalhante). Outra variável (não-ambiental) que pode afetar a acurácia do método da razão espectral é a presença de heterogeneidades e anisotropia. Por outro lado, este método é pouco sensível à relação sinal/ruído, o que o torna bastante adequado para aplicações práticas.

No método da razão espectral a atenuação, ou o seu inverso, o fator de qualidade Q de uma rocha, é medida diretamente pela comparação entre as ondas

registradas em uma amostra de rocha e em uma amostra de referência de mesmo comprimento. A amostra de referência é composta por um material cuja atenuação seja desprezível, como o alumínio, por exemplo. Na prática, se computa os espectros de amplitude e de fase das duas ondas e se calcula o logaritmo natural da razão entre os espectros de amplitude contra a frequência. O coeficiente angular desse gráfico corresponde ao produto entre o coeficiente de atenuação e o comprimento da amostra. A teoria do método da razão espectral se fundamenta na definição dos espectros de amplitude das ondas para as amostras de referência e de rocha, como nas equações 2.15 e 2.6, respectivamente:

$$A_1(f) = G_1(x) e^{-\alpha_1(f)x} e^{i(2\pi ft - k_1 x)} \quad (2.15)$$

$$A_2(f) = G_2(x) e^{-\alpha_2(f)x} e^{i(2\pi ft - k_2 x)} \quad (2.16)$$

onde A é a amplitude, f é a frequência, x é o comprimento da amostra, $k = 2\pi f / V$ é o número de onda, V é a velocidade da onda, $G(x)$ é um fator geométrico que representa os efeitos de reflexão, difração e divergência esférica, e $\alpha(f)$ é o coeficiente de atenuação em função da frequência. No caso de duas amostras de mesma geometria (como no caso das amostras de referência e de rocha) os fatores geométricos G_1 e G_2 são independentes da frequência. No intervalo das frequências utilizadas em laboratório (dezenas a centenas de KHz) o coeficiente de atenuação $\alpha(f)$ varia de forma linear com a frequência (Toksöz *et al.*, 1979):

$$\alpha(f) = \gamma f \quad (2.17)$$

onde γ é uma constante relacionada ao fator de qualidade Q por:

$$Q = \frac{\pi}{\gamma V} \quad (2.18)$$

A razão entre os espectros de amplitude das ondas de referência e da rocha é dada por:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{G_1}{G_2} e^{-(\gamma_1 - \gamma_2) f x} \quad (2.19)$$

Ou

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = (\gamma_2 - \gamma_1) x f + \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (2.20)$$

onde o último termo do lado direito é nulo pois G_1 e G_2 são independentes da frequência, ou seja, $G_1 = G_2$.

Assim o termo $(\gamma_2 - \gamma_1)$ pode ser obtido do coeficiente angular do gráfico do logaritmo natural da razão espectral das amplitudes contra a frequência. Quando a

amostra de referência possui um Q muito elevado (γ_1 desprezível, como no caso da amostra de alumínio), o coeficiente de atenuação da rocha é determinado diretamente do coeficiente angular desse gráfico. Para garantir a eficiência do método de medição do coeficiente de atenuação das rochas pelo método da razão espectral é necessário garantir uma preparação muito cuidadosa das amostras de rocha e de referência, de modo que elas possuam superfícies muito bem polidas e com extremidades perfeitamente paralelas. Além disso, deve-se garantir um excelente acoplamento através do uso de uma câmara de confinamento que reproduza as condições de pressurização em subsuperfície.

Tarif e Bourbié (1987) *apud* Vasquez (2000) comparam as técnicas de razão espectral e tempo de subida com dados de laboratório e sinais sintéticos, concluindo que elas são aproximadamente equivalentes, mas a técnica de razão espectral possui a vantagem de funcionar bem mesmo com péssimas razões sinal/ruído para Q intermediários ($5 < Q < 100$), enquanto a técnica de tempo de subida funciona bem mesmo com alta atenuação ($Q < 5$), mas exige alta razão sinal/ruído.

A metodologia empregada nesta pesquisa consiste na aquisição e preparo dos plugues de rocha e de alumínio, realização de ensaios para medição das suas propriedades elásticas sob condições controladas na câmara pressurizada, cálculo dos coeficientes de atenuação e fator de qualidade, e interpretação dos resultados em termos dos tipos litológicos analisados. Os plugues de rocha foram obtidos por extração de amostras em afloramentos representativos de formações geológicas ou em testemunhos de poços. Para a realização dos ensaios utilizamos uma câmara pressurizada própria para medição das propriedades elásticas existente no Laboratório de Física de Rochas do Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES).

2.2.4.2.3 - Outras técnicas de transmissão

Embora menos difundidas, tem-se proposto outras técnicas para medição de atenuação. Klimentos (1991) *apud* Vasquez (2000) sugere três técnicas buscando evitar problemas geométricos na determinação de atenuação em laboratório. Na técnica de lentes ultra-sônicas coloca-se uma lente ultra-sônica entre o emissor e a amostra de modo que o feixe apresente incidência normal, evitando-se divergência geométrica; na técnica de receptor panorâmico varrem-se os possíveis ângulos de recepção com um transdutor pequeno, analisando-se o sinal composto pela soma de

todas as recepções, eliminando assim os efeitos de alargamento do feixe. Mede-se à pressão atmosférica nestes dois casos. O terceiro método é o auto-razão espectral, no qual submete-se uma mesma amostra duas vezes a ensaios de eco, sendo que, para a segunda medida, retira-se uma pequena fatia da amostra.

Shankland *et al.* (1993) *apud* Vasquez (2000) propõem o método de tempo de trânsito no domínio da frequência, que consiste em propagar-se um pulso em uma amostra e enviar-se o mesmo pulso como referência diretamente para o sistema de recepção, realizando-se o registro diretamente no domínio da frequência. A transformada inversa de Fourier fornece o tempo de trânsito de onde se extrai a velocidade de grupo, sendo o fator Q obtido a partir do gráfico do logaritmo da amplitude normalizada em função da frequência.

Tang (1992) *apud* Vasquez (2000) utiliza a inversão da forma de onda extensional para obtenção do fator Q em barras cilíndricas, necessitando-se de duas barras de comprimento diferentes para avaliação de efeitos geométricos. Com essa técnica procura-se fornecer dados de atenuação entre 10 KHz e 150 KHz, não medidos por métodos ultra-sônicos usuais nem pelos de barra ressonante. Outros autores utilizam também o modelamento da forma de onda para a obtenção da atenuação: conhecendo-se o pulso de entrada ou normalizando-se as formas de onda a grandes distâncias para um ponto de referência, obtém-se a atenuação ajustando-se uma forma de onda sintética para um material de Q variável à forma de onda real (Meissner *et al.*, 1986 *apud* Vasquez, 2000). Pode-se aplicar este método a dados de laboratório, mas suas vantagens sobre os métodos anteriores destacam-se em dados de VSP (Dietrich e Bouchon, 1985; Tonn, 1991; *al apud* Vasquez, 2000).

CAPÍTULO III – MATERIAL DE ESTUDO

Este capítulo apresenta os materiais utilizados na realização dos experimentos laboratoriais de medição de velocidade e atenuação das ondas elásticas (P e S). Com base em informações disponíveis foram coletadas amostras de rocha provenientes de trabalhos já realizados em bacias sedimentares brasileiras. Nesta pesquisa foram utilizadas amostras de folhelho extraídas de afloramentos da bacia do Paraná, como também amostras de arenito e halita extraídas de testemunhos de poços. Essas amostras são oriundas de trabalhos anteriores (Guimarães, 2004; Soares, 2006). Devido ao tempo de armazenagem dessas amostras parte delas foram descartadas. As amostras restantes foram recuperadas, extraindo o número máximo de plugues possíveis para as medições. Algumas amostras apresentaram maior facilidade de recuperação, por já estarem no tamanho aproximado dos plugues de alumínio, faltando somente lapidá-las. Porém outras amostras apresentaram uma maior dificuldade para a sua preparação, pois durante sua lapidação apresentaram rachaduras e desintegrações de algumas partes, inutilizando-as.

Os ensaios foram realizados durante duas campanhas de medição, uma com ensaios em oito amostras, sendo quatro de arenito e quatro de folhelho, e a segunda campanha de medição, com medição em onze amostras, sendo oito amostras de folhelho, uma amostra de arenito grosso e duas amostras de halita. Entretanto problemas de registro das formas de onda nos ensaios da segunda campanha de medição reduzem drasticamente a confiança nos seus resultados, de modo que as excluimos desta dissertação, apesar de terem sido medidas e analisadas como as amostras da primeira campanha de medição.

O método de medição da atenuação utilizado neste trabalho foi a análise espectral da propagação de ondas. Conforme discutido no Capítulo 2, nesse método é realizada uma comparação entre as amplitudes de duas ondas, uma registrada na amostra de rocha e outra registrada numa amostra de referência de comprimento similar, mas de material com atenuação desprezível. Neste trabalho foram utilizadas como referência amostras de alumínio. Para isso foram preparados dois plugues de alumínio, um com 30,08 mm e outro com 41,75 mm de comprimento. Um ou outro plugue foi utilizado no cálculo do coeficiente de atenuação de uma dada amostra, sendo que o plugue de alumínio escolhido era sempre o de comprimento mais próximo

ao comprimento da amostra de rocha.

3.1 - Preparação das amostras de rocha

As amostras de rocha foram preparadas através de torneamento mecânico na forma de cilindros com diâmetro de 1,5 polegada e comprimentos próximos do comprimento de uma das duas amostras de alumínio utilizadas como referência. A forma e as dimensões adotadas visam minimizar os efeitos de atenuação extrínseca, ou seja, aquela produzida por efeitos como reflexões laterais, difrações e alargamento do pulso. As extremidades dos plugues de rocha foram preparadas cuidadosamente para garantir superfícies planas, perfeitamente polidas, paralelas entre si e perpendiculares ao eixo do cilindro. O polimento das extremidades garante a eficiência do acoplamento dos plugues aos cabeçotes metálicos da câmara de propagação de ondas elásticas, evitando assim, perdas de amplitude por acoplamento irregular.

3.2 - Sistema experimental para medição de propriedades elásticas

Os ensaios foram realizados utilizando a câmara pressurizada para medição de propriedades elásticas de rochas pertencente ao Laboratório de Física de Rochas do Centro de Pesquisas da Petrobras (Figura 3.1).

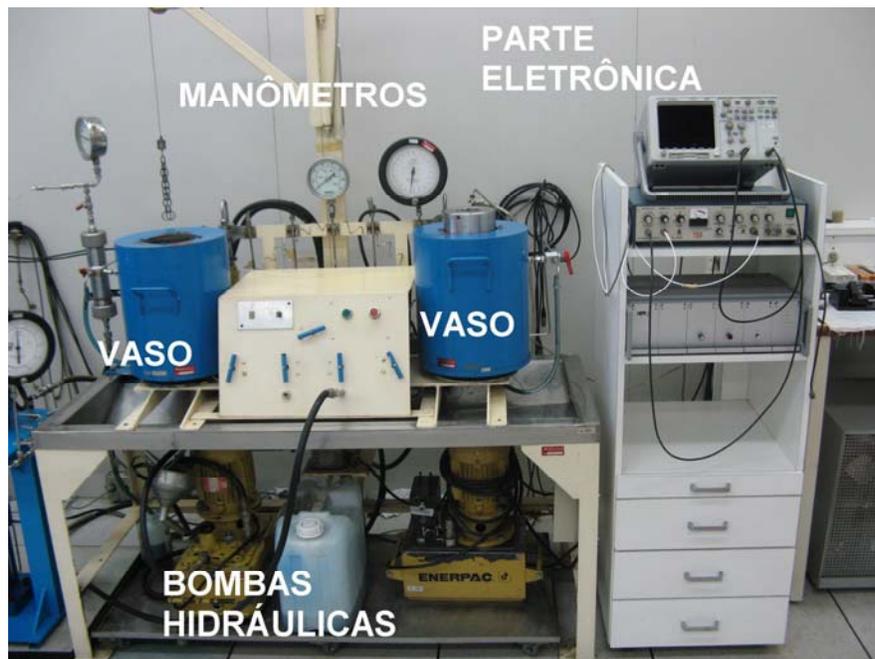


Figura 3.1 - Câmaras de pressurização para medição de propriedades elásticas de rochas (cilindros azuis) acopladas ao sistema de aquisição de dados (à direita).

A medida de atenuação exige o arquivamento e processamento das formas de onda. No entanto o sistema de medida pode ser dividido em uma parte eletrônica e outra parte mecânica, esquematizadas respectivamente nas Figuras 3.2 e 3.3. Utiliza-se o gerador de funções para emitir um sinal que, no caso deste estudo, corresponde a um período de senoide com freqüência central bem definida (utilizam-se 250kHz e 500kHz). Este sinal é amplificado e enviado para o transdutor, uma cerâmica piezoelétrica que o transforma em vibração mecânica. A vibração mecânica, após atravessar a amostra, é recebida por um elemento (transdutor) que a converte em sinal elétrico e este geralmente é novamente amplificado, exibido na tela de um osciloscópio e armazenado no computador.

Para controle do sistema, gravação das ondas e processamento das formas de ondas registradas em laboratório usou-se um computador. Impõe-se pressões de confinamento e de poros com auxílio de bombas hidráulicas, monitorando-as com manômetros que podem ser vistos na foto da Figura 3.1..

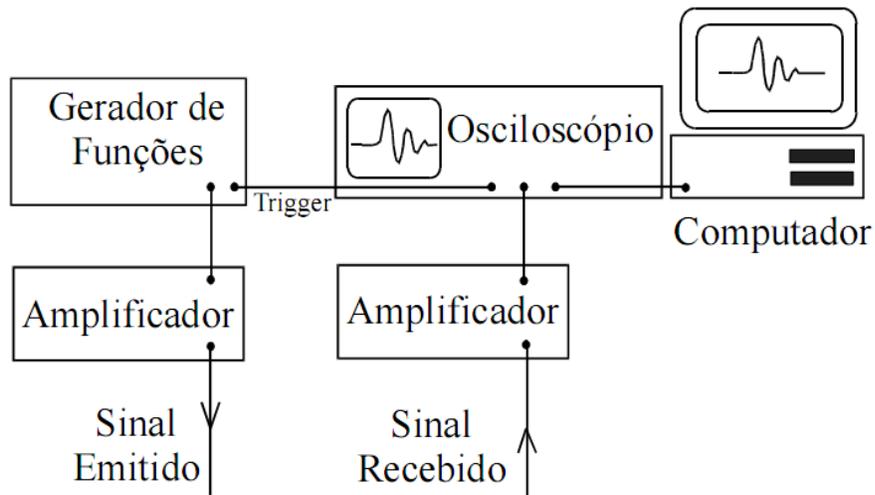


Figura 3.2 – Esquema da parte eletrônica do sistema de medidas

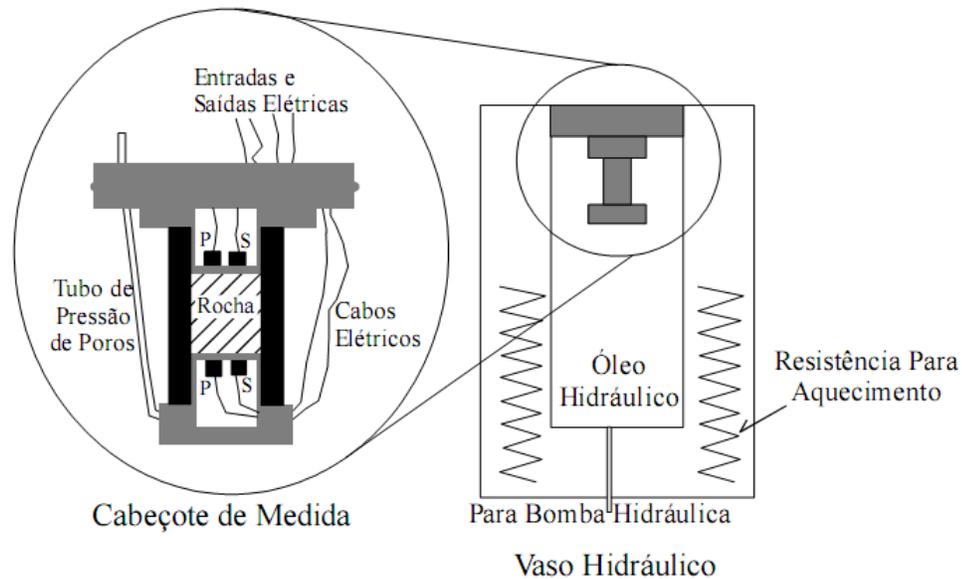


Figura 3.3 – Esquema da parte mecânica do sistema de medidas

3.3 - Descrição das amostras de rocha

Será realizada uma descrição das amostras utilizadas durante esse trabalho.

3.3.1 – Primeira campanha de ensaios

A primeira campanha de ensaios para medição dos atributos de atenuação foi realizada com quatro amostras de arenito, referenciadas como ZAF-19, ZF-13, ZP-05 e ZP-28, e com quatro amostras de folhelho cujas referências são ZF-01, ZF-10, ZF-17 e ZF-22. A amostra ZF-17 foi cortada de modo a apresentar o seu eixo longitudinal pertencente ao plano de estratificação (amostra horizontal), enquanto todas as demais apresentam eixos longitudinais perpendiculares ao plano de estratificação (amostras verticais). De acordo com Guimarães (2004), as amostras ZF-10 e ZF-22 são compostas por folhelhos imaturos, ou seja, cuja matéria orgânica se encontra em estágio anterior à formação dos hidrocarbonetos. Ainda segundo o mesmo autor, as amostras ZF-01 e ZF-17 correspondem a amostras de folhelho supermaturo, ou seja, cuja matéria orgânica já foi submetida a condições de temperatura e pressão superiores àquelas necessárias à geração de hidrocarbonetos.

A Figura 3.4 apresenta a fotografia da amostra ZAF-19 que é classificada litologicamente como arenito fino, possui massa de 125,63 g, tem comprimento e diâmetro de 43,135 mm e 38,022 mm, respectivamente. A Tabela 3.1 apresenta as velocidades medidas para as ondas P e S na amostra ZAF-19, para o intervalo de pressão confinante de 1000 psi a 5000 psi.

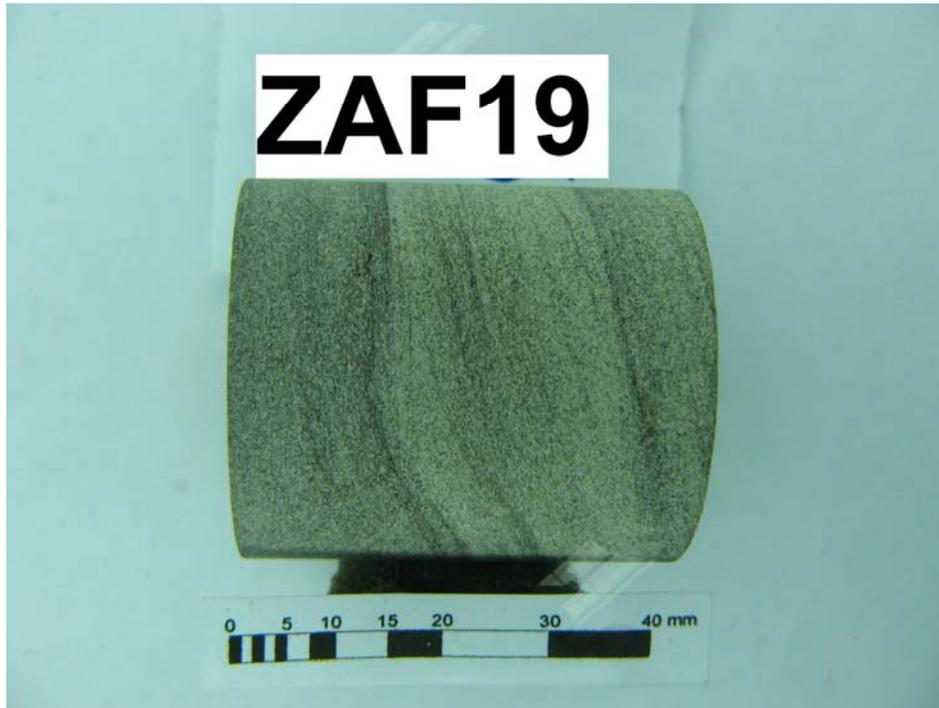


Figura 3.4 – Fotografia da amostra de arenito ZAF-19.

Tabela 3.1 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZAF-19.

ZAF-19		
Pressão (psi)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1000	3855	2482
2000	4132	2622
3000	4296	2709
4000	4406	2758
5000	4475	2781

A Figura 3.5 apresenta a fotografia da amostra ZF-13 que é classificada litologicamente como arenito fino, possui massa de 91,58 g, tem comprimento e diâmetro de 42,858 mm e 37,53 mm, respectivamente. A Tabela 3.2 apresenta as velocidades medidas para as ondas P em um intervalo de pressão confinante de 1000psi a 5000psi e ondas S, para o intervalo de pressão confinante de 2000 psi a 5000 psi. Para a pressão de 1000 psi ,para onda S, não foi possível extrair, de forma confiável, os atributos de atenuação devido a uma relação sinal/ruído desfavorável.



Figura 3.5 – Fotografia da amostra de arenito fino ZF-13.

Tabela 3.2 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-13.

ZF-13		
Pressão (psi)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1000	4125	
2000	4439	2859
3000	4630	2939
4000	4727	2986
5000	4800	3015

A Figura 3.6 apresenta a fotografia da amostra ZP-05 que é classificada litologicamente como arenito, possui massa de 118,6g, tem comprimento e diâmetro de 42,216mm e 38,058mm, respectivamente. A Tabela 3.3 apresenta as velocidades medidas para as ondas P e S na amostra ZP-05, para o intervalo de pressão confinante de 1000 psi a 5000 psi.

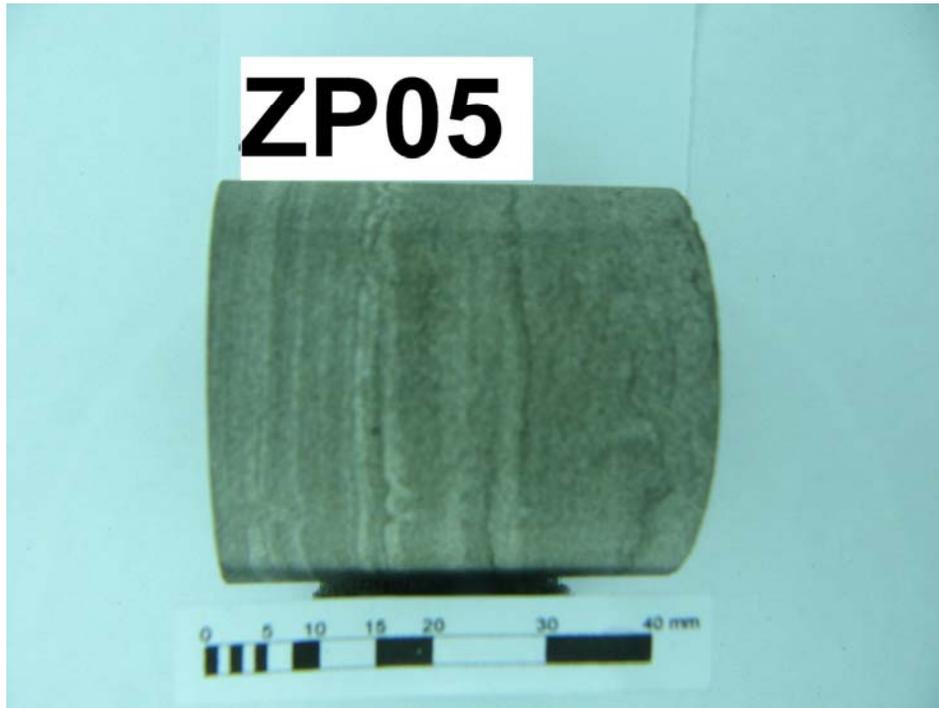


Figura 3.6 – Fotografia da amostra de arenito ZP-05.

Tabela 3.3 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZP-05.

ZP-05		
Pressão (psi)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1000	3116	2250
2000	3480	2381
3000	3665	2452
4000	3783	2495
5000	3841	2525

A Figura 3.7 apresenta a fotografia da amostra ZP-28 que é classificada litologicamente como arenito, possui massa de 116,09g, tem comprimento e diâmetro de 41,74mm e 38,094mm, respectivamente. A Tabela 3.4 apresenta as velocidades medidas para as ondas P e S na amostra ZP-28, para o intervalo de pressão confinante de 2000 psi a 5000 psi. Para algumas pressões de 1000psi e 4000psi não foi possível extrair, de forma confiável, os atributos de atenuação devido a uma relação sinal/ruído desfavorável.



Figura 3.7 – Fotografia da amostra de arenito ZP-28.

Tabela 3.4 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZP-28.

ZP-28		
Pressão (psi)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1000		
2000	2990	1924
3000	3467	2104
4000		2149
5000	3649	2178

A Figura 3.8 apresenta a fotografia da amostra ZF-01 que é classificada litologicamente como folhelho possui massa de 199,98 g, tem comprimento e diâmetro de ,118mm e 37,54mm, respectivamente. A Tabela 3.5 apresenta as velocidades medidas para as ondas P e S na amostra ZF-01, para o intervalo de pressão confinante de 1000 psi a 5000 psi

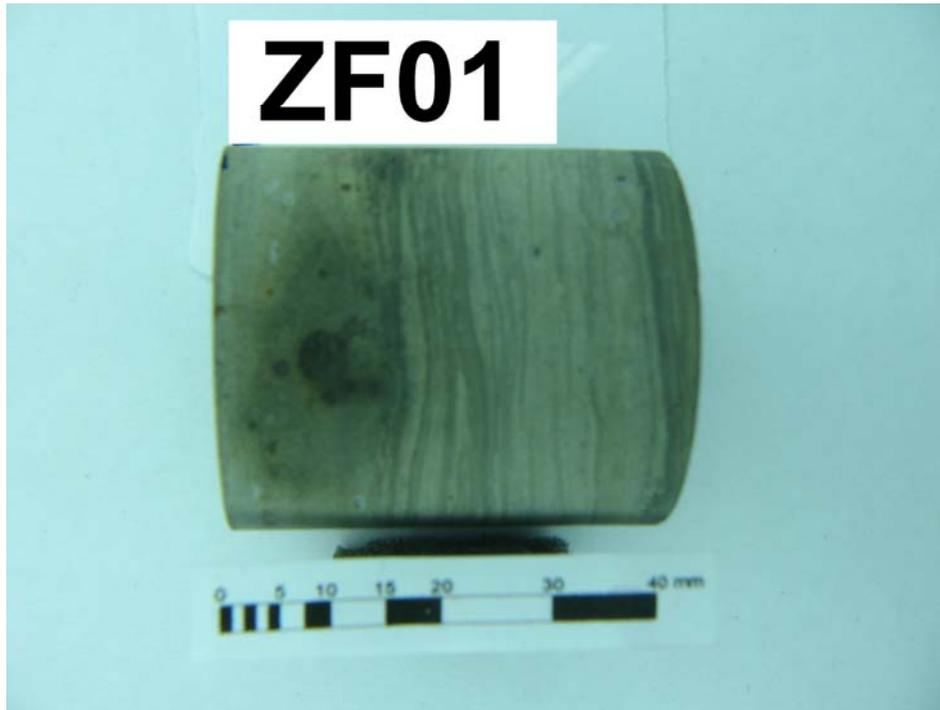


Figura 3.8 – Fotografia da amostra de folhelho ZF-01.

Tabela 3.5 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-01.

ZF-01		
Pressão (psi)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1000	3970	2550
2000	4042	2578
3000	4089	2603
4000	4121	2614
5000	4141	2621

A Figura 3.9 apresenta a fotografia da amostra ZF-10 que é classificada litologicamente como folhelho, possui massa de 91,58g, tem comprimento e diâmetro de 42,858mm e 37,53mm, respectivamente. A Tabela 3.6 apresenta as velocidades medidas para as ondas P e S na amostra ZF-10, para o intervalo de pressão confinante de 2000 psi a 5000 psi. Para a pressão de 1000 psi quase sempre não foi possível extrair, de forma confiável, os atributos de atenuação devido a uma relação sinal/ruído desfavorável.

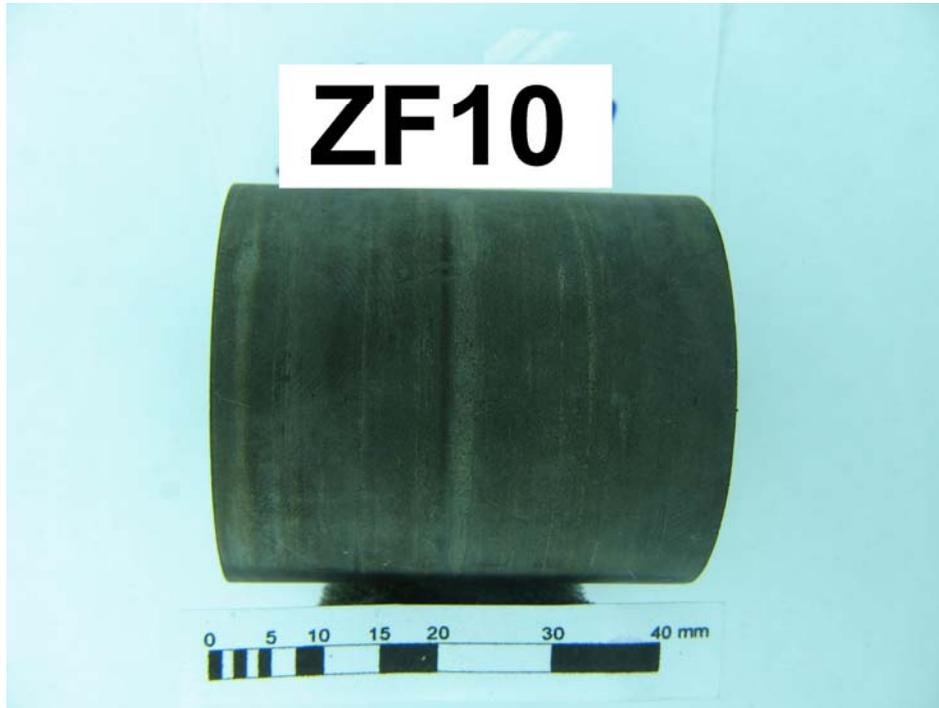


Figura 3.9 – Fotografia da amostra de folhelho ZF-10.

Tabela 3.6 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-10.

ZF-10		
Pressão (psi)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1000		
2000	2596	1380
3000	2612	1391
4000	2623	1410
5000	2639	1422

A Figura 3.10 apresenta a fotografia da amostra ZF-17 que é classificada litologicamente como folhelho, possui massa de 108,62g, tem comprimento e diâmetro de 42,29mm e 37,54mm, respectivamente. A Tabela 3.7 apresenta as velocidades medidas para as ondas P e S na amostra ZF-17, para o intervalo de pressão confinante de 1000 psi a 5000 psi.

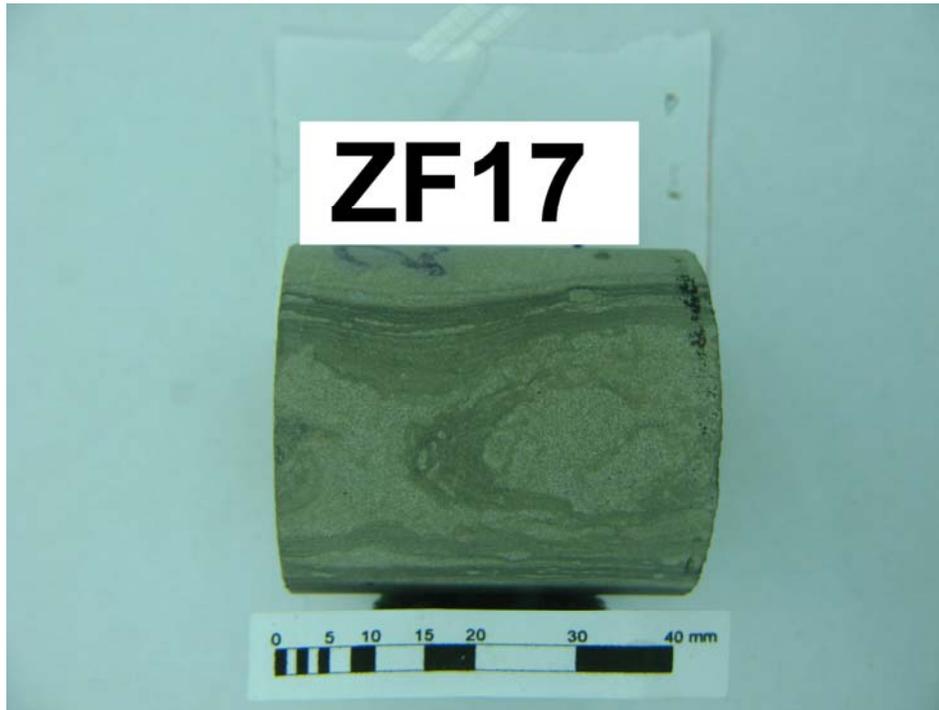


Figura 3.10 – Fotografia da amostra de folhelho ZF-17.

Tabela 3.7 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-17.

ZF-17		
Pressão(psi)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1000	4320	2588
2000	4387	2583
3000	4433	2557
4000	4480	2554
5000	4577	2555

A Figura 3.11 apresenta a fotografia da amostra ZF-22 que é classificada litologicamente como folhelho, possui massa de 90,08g, tem comprimento e diâmetro de 42,62mm e 37,556mm, respectivamente. A Tabela 3.8 apresenta as velocidades medidas para as ondas P e S na amostra ZF-22, para o intervalo de pressão confinante de 1000 psi a 5000 psi.

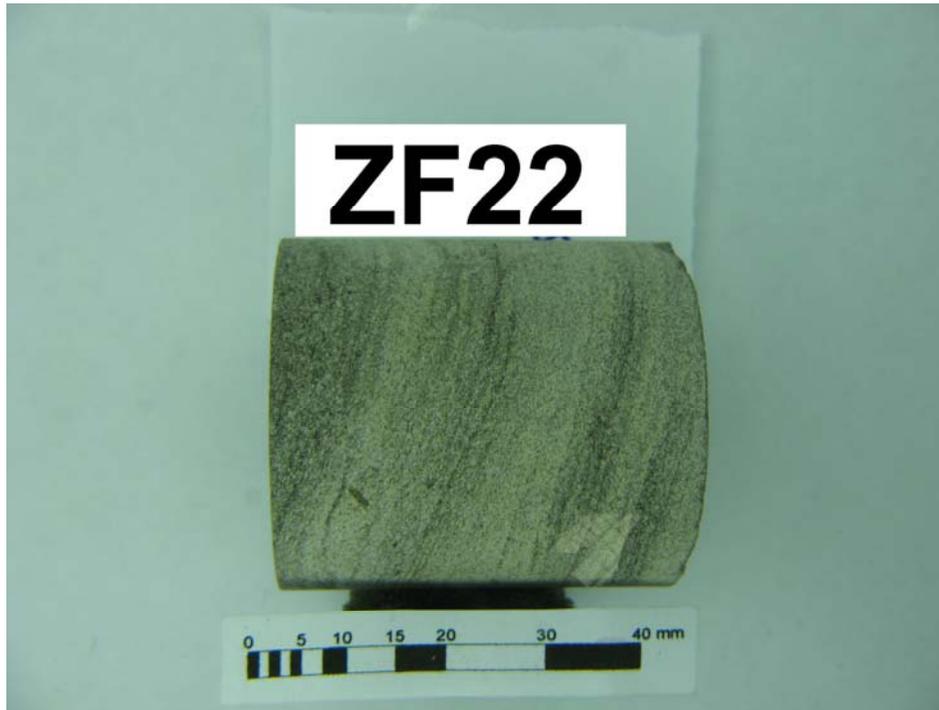


Figura 3.11 – Fotografia da amostra de folhelho ZF-22.

Tabela 3.8 – Velocidades das ondas P e S na amostra ZF-22.

ZF-22		
Pressão(psi)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1000	2538	1363
2000	2588	1378
3000	2608	1385
4000	2624	1394
5000	2649	1401

3.4 Programa Matlab para extração de atributos de atenuação

A fim de extrair os atributos de atenuação das ondas registradas nos ensaios laboratoriais, foi desenvolvido o programa em linguagem Matlab contido no anexo I:

Inicialmente são realizadas as leituras dos arquivos com as ondas registradas nas amostras de referência e de rocha, respectivamente. A seguir os espectros de amplitude e de fase dessas ondas são calculados através da transformada rápida de Fourier. Para o cálculo dos espectros é utilizado apenas o primeiro comprimento de onda, de cada onda. Outro parâmetro utilizado nessa etapa é o intervalo de amostragem no tempo que deve lido de cada arquivo de onda.

Em seguida são calculados os dados para a geração do gráfico que relaciona o logaritmo da razão de amplitudes das ondas de referência e de rocha contra a frequência, de onde é extraído o coeficiente de atenuação, conforme descrito na equação (2.20). O intervalo de amostragem adotado no cálculo dos espectros de amplitude é determinado pela frequência de Nyquist, de modo a garantir que não se produza eventos com falseamento de frequência. Esse intervalo de amostragem é muito grande para o cálculo dos dados para determinação dos coeficientes de atenuação. A fim de se obter espectros de amplitude com intervalos menores de amostragem, se adotou uma função de ajuste para os espectros de amplitude, no intervalo de frequências de interesse para o cálculo do coeficiente de atenuação.

Finalmente são geradas duas saídas gráficas: a primeira apresenta os primeiros comprimentos de onda das ondas registradas nas amostras de referência e de rocha, respectivamente, além dos respectivos espectros de amplitude e de fase. A segunda saída gráfica apresenta a relação entre o logaritmo da razão de amplitudes das ondas de referência e de rocha contra a frequência, de cujo coeficiente angular é derivado o coeficiente de atenuação.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos para os atributos de atenuação das amostras de rochas estudadas. Para esse fim, foi utilizado o programa desenvolvido em linguagem Matlab apresentado no Capítulo 3, o qual realiza a análise de atenuação segundo o método da razão espectral.

Em linhas gerais, o procedimento para extração dos atributos de atenuação de uma onda, registrada numa dada amostra de rocha, segue um procedimento de seis passos:

1. Selecionar o trecho da onda correspondente ao primeiro comprimento de onda, tanto na onda da amostra de rocha, quanto na onda da amostra de referência.
2. Calcular os espectros de amplitude e de fase dos trechos de onda selecionados no primeiro passo. Esses espectros são obtidos pela aplicação da transformada de Fourier.
3. No intervalo de frequência de interesse, calcular o logaritmo neperiano da razão entre os espectros de amplitude da onda na amostra de rocha e na amostra de referência.
4. No gráfico do logaritmo neperiano da razão de espectros de amplitude contra frequência, ajustar uma função por regressão linear. De acordo com a equação (2.20) o coeficiente angular dessa função de ajuste corresponde ao produto entre a constante γ e o comprimento da amostra.
5. Calcular a velocidade de propagação da onda na amostra através da razão entre o comprimento da amostra e o tempo de propagação da onda na amostra. Esse tempo de propagação é dado pela diferença entre o tempo de chegada da onda registrado com a amostra e o tempo de chegada da onda registrado sem a amostra, de acordo com a equação (2.1). Esse último tempo de chegada é chamado de “tempo do sistema” e corresponde ao tempo gasto pela onda no próprio sistema de medição.
6. Através da equação (2.18), calcular o fator de qualidade Q da onda.

Em cada amostra foram registradas as ondas compressionais (P) e cisalhantes (S). Inicialmente essas ondas foram registradas na amostra de alumínio que serve como referência para cálculo dos parâmetros de atenuação das amostras de rocha. As formas

de onda foram registradas sob pressões confinantes efetivas de 1000psi, 2000psi, 3000psi, 4000psi e 5000psi.

4.1 – Formas de onda registradas

Serão apresentadas as formas de ondas das amostras de referencia e de rocha registradas durante os ensaios.

4.1.1 – Primeira campanha de ensaios

Amostra de referência

A Figura 4.1 apresenta as formas de onda registradas para a amostra de referência utilizada na análise das amostras da primeira campanha de ensaios. Trata-se de uma amostra de alumínio com 41,75 mm de comprimento. Observa-se desta figura que na amostra de alumínio não ocorre variação considerável nos tempos de chegada das ondas sob vários níveis de pressão confinante, ou seja, na amostra de alumínio não há variação considerável de velocidade com o aumento de pressão confinante. Entretanto, observa-se que, mesmo na amostra de alumínio, as amplitudes das ondas são bastante afetadas pela pressão confinante. No entanto, também se observa que há um limite de amplitude além do qual, mesmo que haja aumento de pressão, a amplitude das ondas não se modifica. Na Figura 4.1 esse limite de amplitude ocorre em torno de 4000psi.

Amostra ZF-01

A Figura 4.2 apresenta as formas de onda registradas para a amostra ZF-01. Observa-se que as amplitudes das ondas são inferiores àquelas observadas no alumínio da Figura 4.1, ou seja, a atenuação das ondas na amostra de folhelho é superior à atenuação das ondas na amostra de alumínio, embora ambas as amostras tenham dimensões e formas idênticas. Além disso, tanto a velocidade (tempo de chegada) quanto à amplitude das ondas variam consideravelmente com a pressão confinante sob a qual a amostra de rocha se encontra submetida. Esse comportamento é esperado para o caso de

amostras de rochas, pois houve um aumento da amplitude e decréscimo dos tempos com o aumento da pressão confinante.

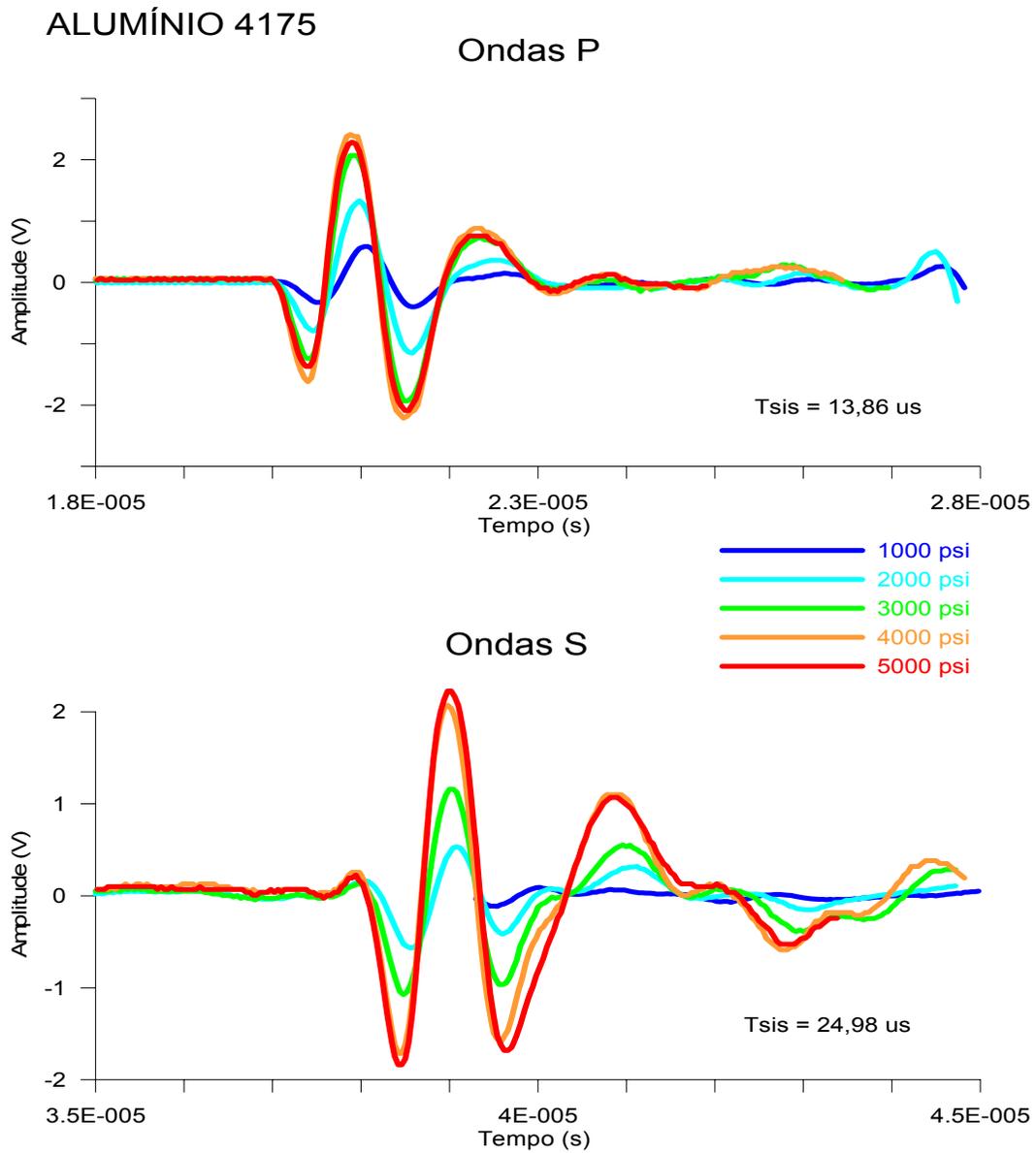


Figura 4.1 – Formas de onda P e S registradas na amostra de referência de alumínio utilizada na primeira campanha de ensaios.

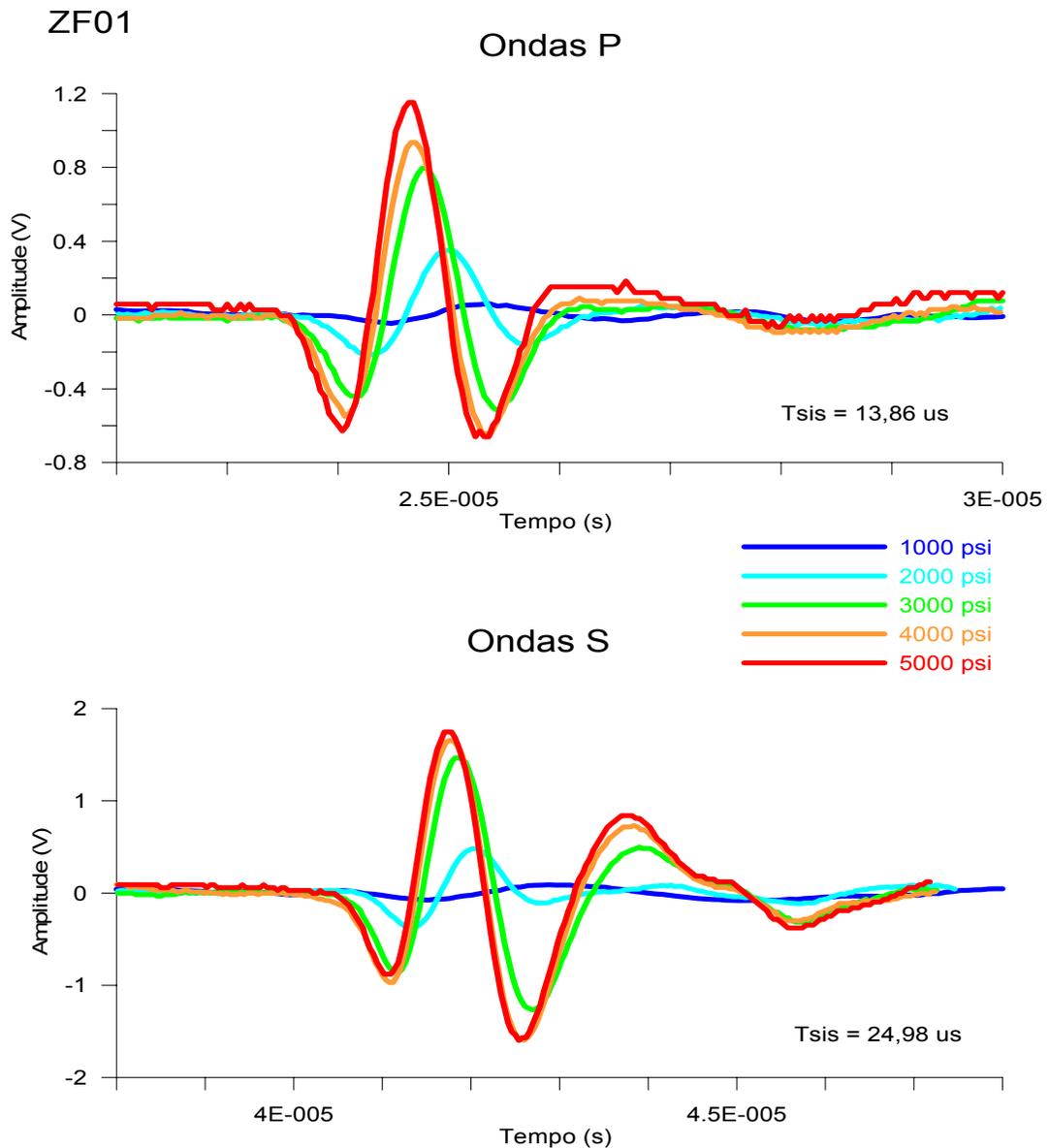


Figura 4.2 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-01.

Amostra ZP-05

A Figura 4.3 apresenta as formas de onda registradas para a amostra ZP-05. Observa-se que as amplitudes das ondas são levemente inferiores àsquelas observadas na Figura 4.2. Logo, a atenuação das ondas na amostra ZP-05 é superior a da amostra ZF-01.

Além disso, tanto a velocidade (tempo de chegada) quanto a amplitude das ondas variam consideravelmente com a pressão confinante sob a qual a amostra de rocha se encontra submetida, constatando-se que o comportamento da amostra está dentro do esperado, pois houve um aumento da amplitude e decréscimo dos tempos com o aumento da pressão confinante.

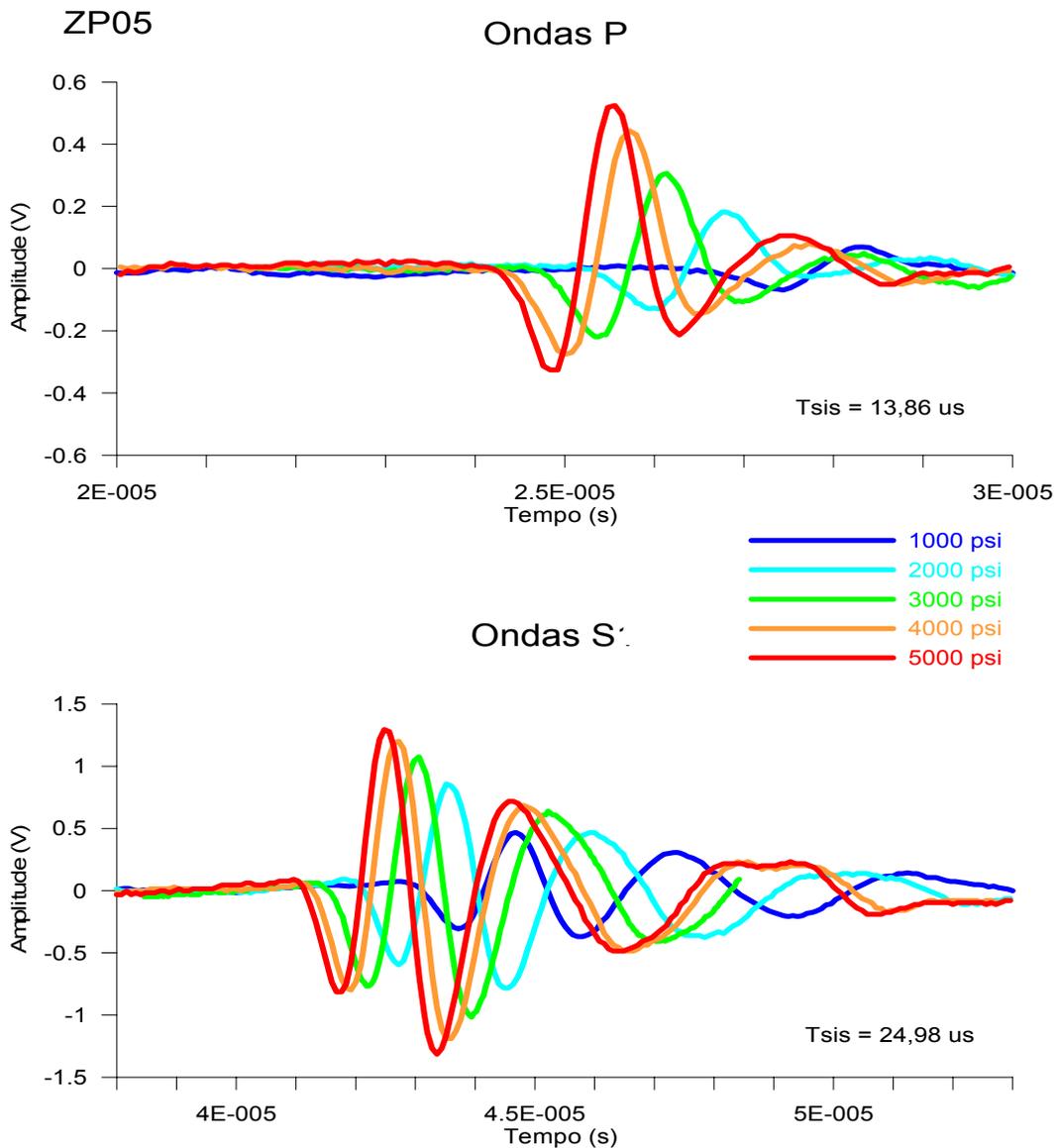


Figura 4.3 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZP-05.

Amostra ZF10

A Figura 4.4 apresenta as formas de onda registradas para a amostra ZF-10. Também para essa amostra se constatou que as formas de onda possuem a forma esperada, pois houve um aumento da amplitude e decréscimo dos tempos com o aumento da pressão confinante.

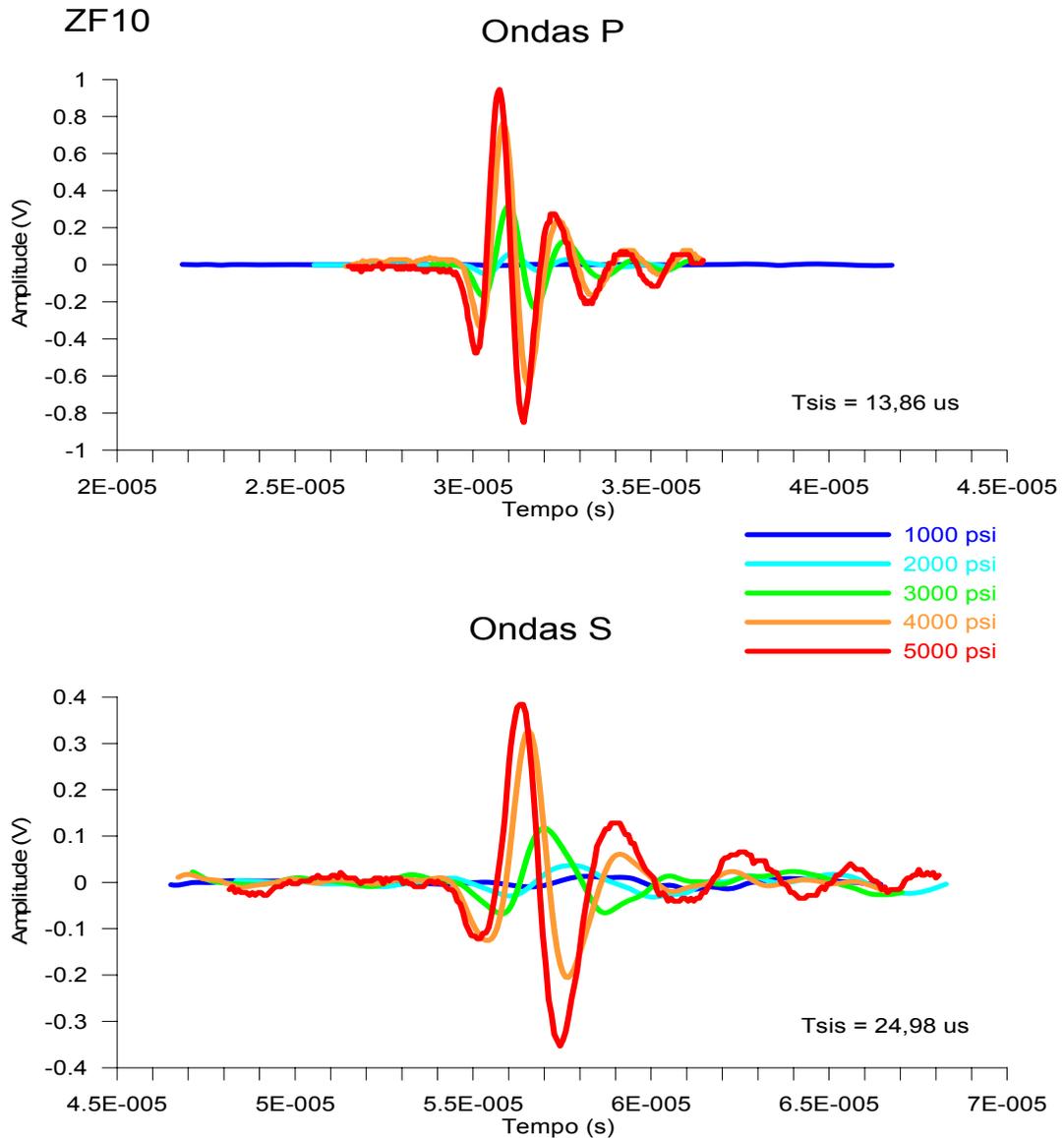


Figura 4.4 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-10.

Amostra ZF-13

A Figura 4.5 apresenta as formas de onda registradas para a amostra ZF-13. Observa-se também nesta amostra de folhelho que tanto a velocidade (tempo de chegada) quanto a amplitude das ondas variam consideravelmente com a pressão confinante sob a qual a amostra de rocha se encontra submetida. As formas de onda apresentam o comportamento esperado, com aumento de amplitude e decréscimo de tempos com o aumento da pressão confinante.

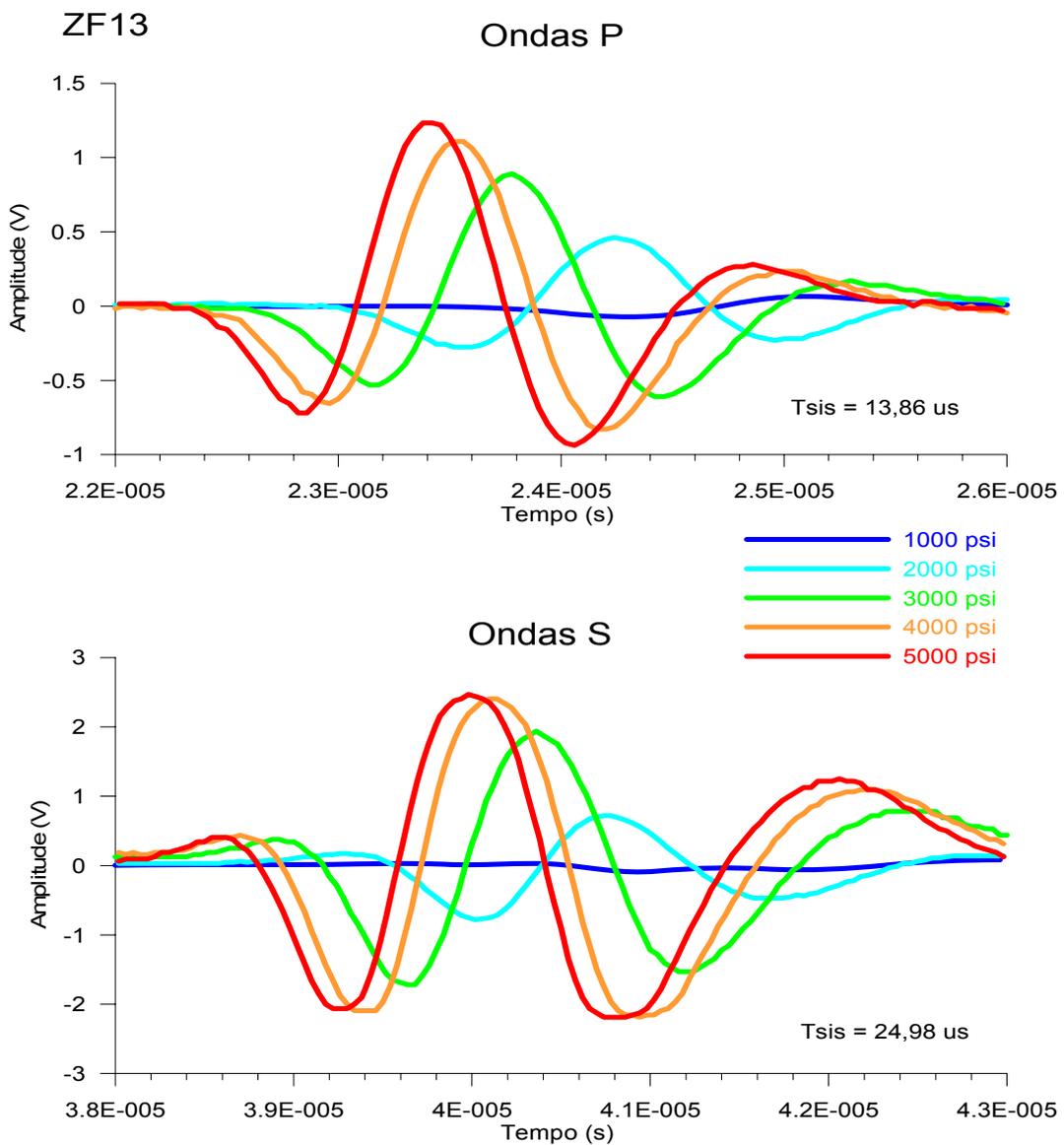


Figura 4.5 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-13.

Amostra ZF-17

A Figura 4.6 apresenta as formas de onda registradas para a amostra ZF-17. Mais uma vez se observa que as formas de onda apresentam o comportamento esperado, com aumento de amplitude e decréscimo de tempos com o aumento da pressão confinante.

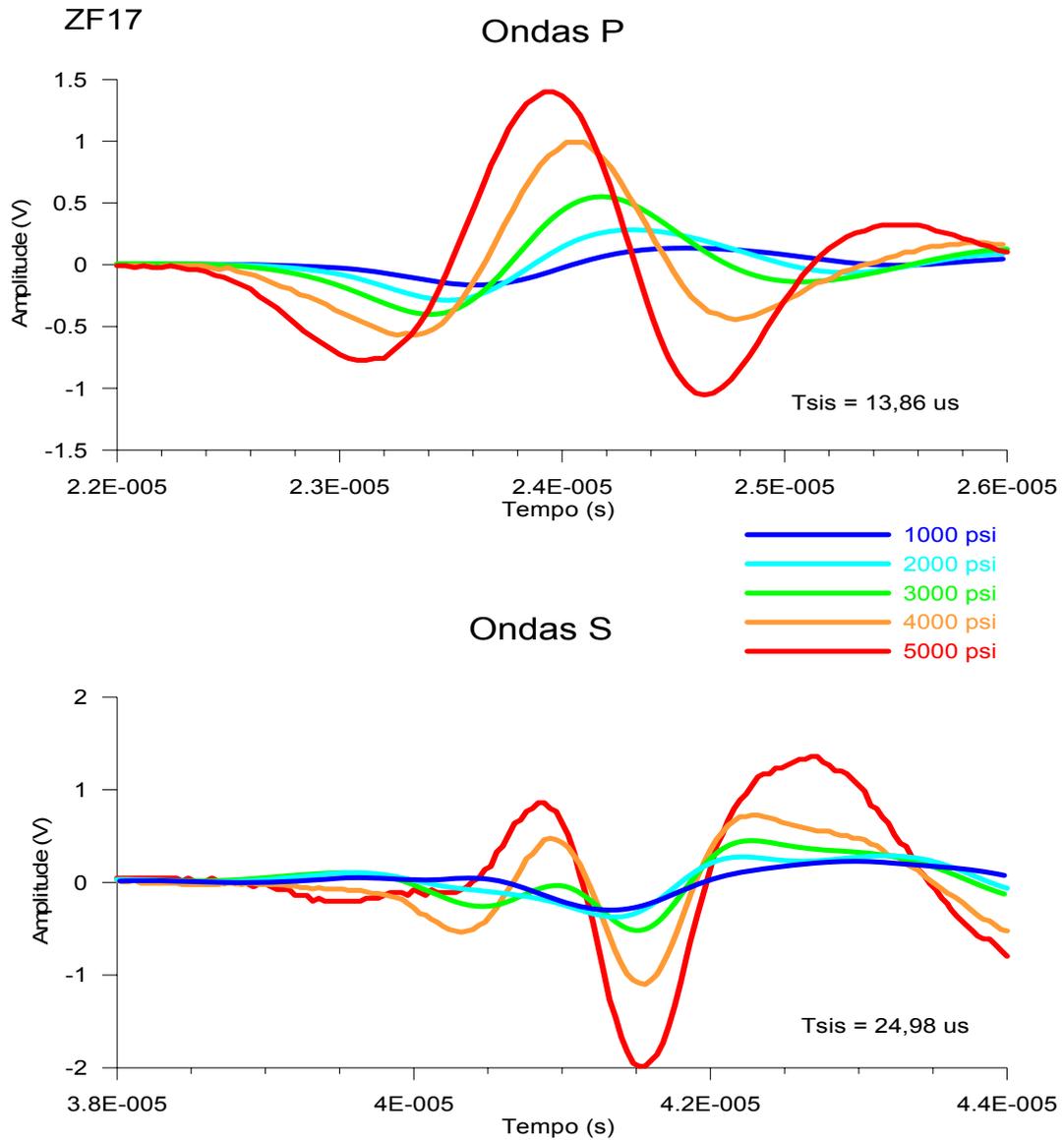


Figura 4.6 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-17.

Amostra ZA-F19

A Figura 4.7 apresenta as formas de onda registradas para a amostra ZF-19. Também para essa amostra de arenito se constatou que as formas de onda possuem a forma esperada, pois houve um aumento da amplitude e decréscimo dos tempos com o aumento da pressão confinante.

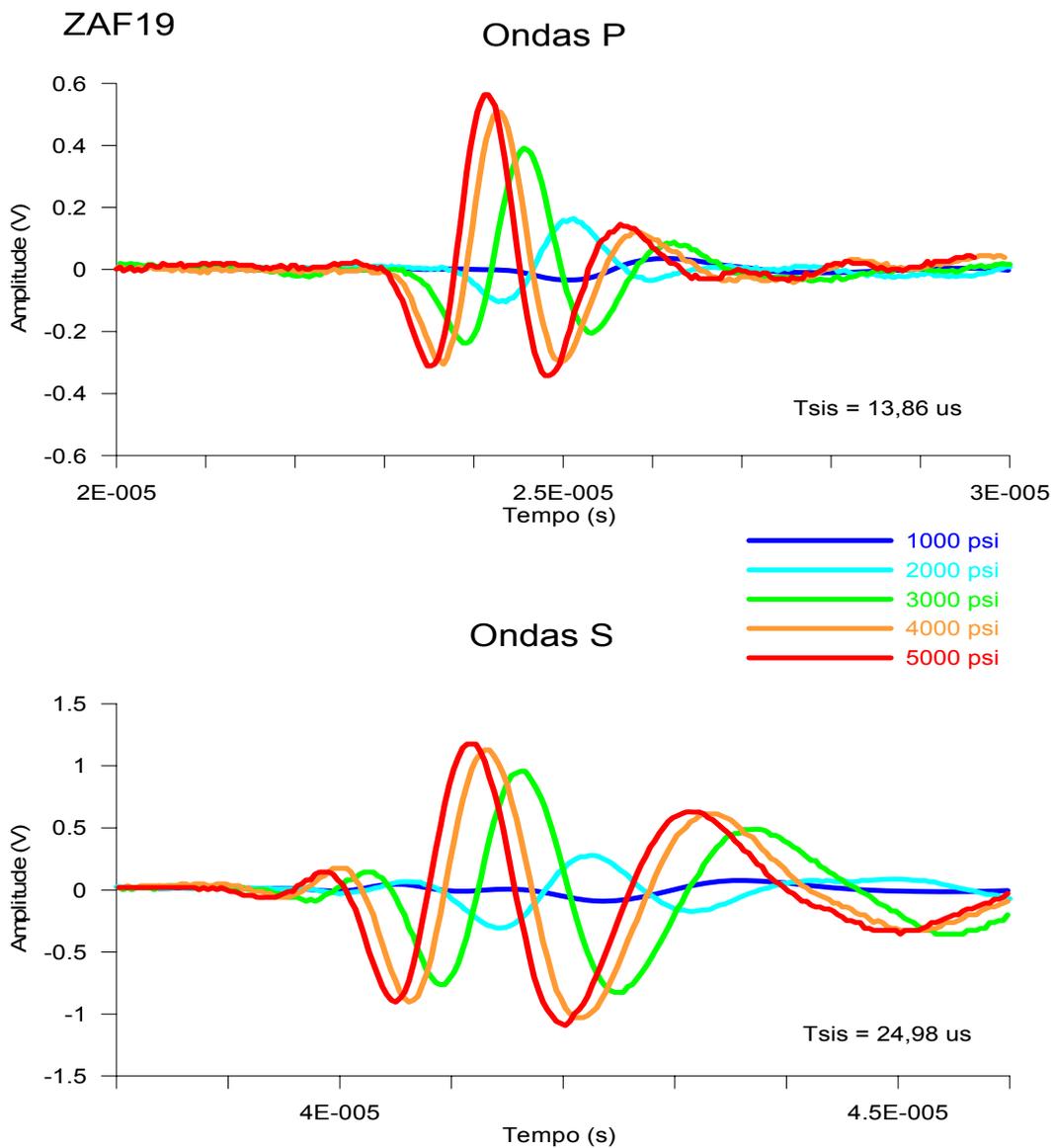


Figura 4.7 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZAF-19.

Amostra ZF-22

A Figura 4.8 apresenta as formas de onda registradas para a amostra ZF-22. Novamente, se constatou que o comportamento da amostra está dentro do esperado, pois houve um aumento da amplitude e decréscimo dos tempos com aumento da pressão confinante.

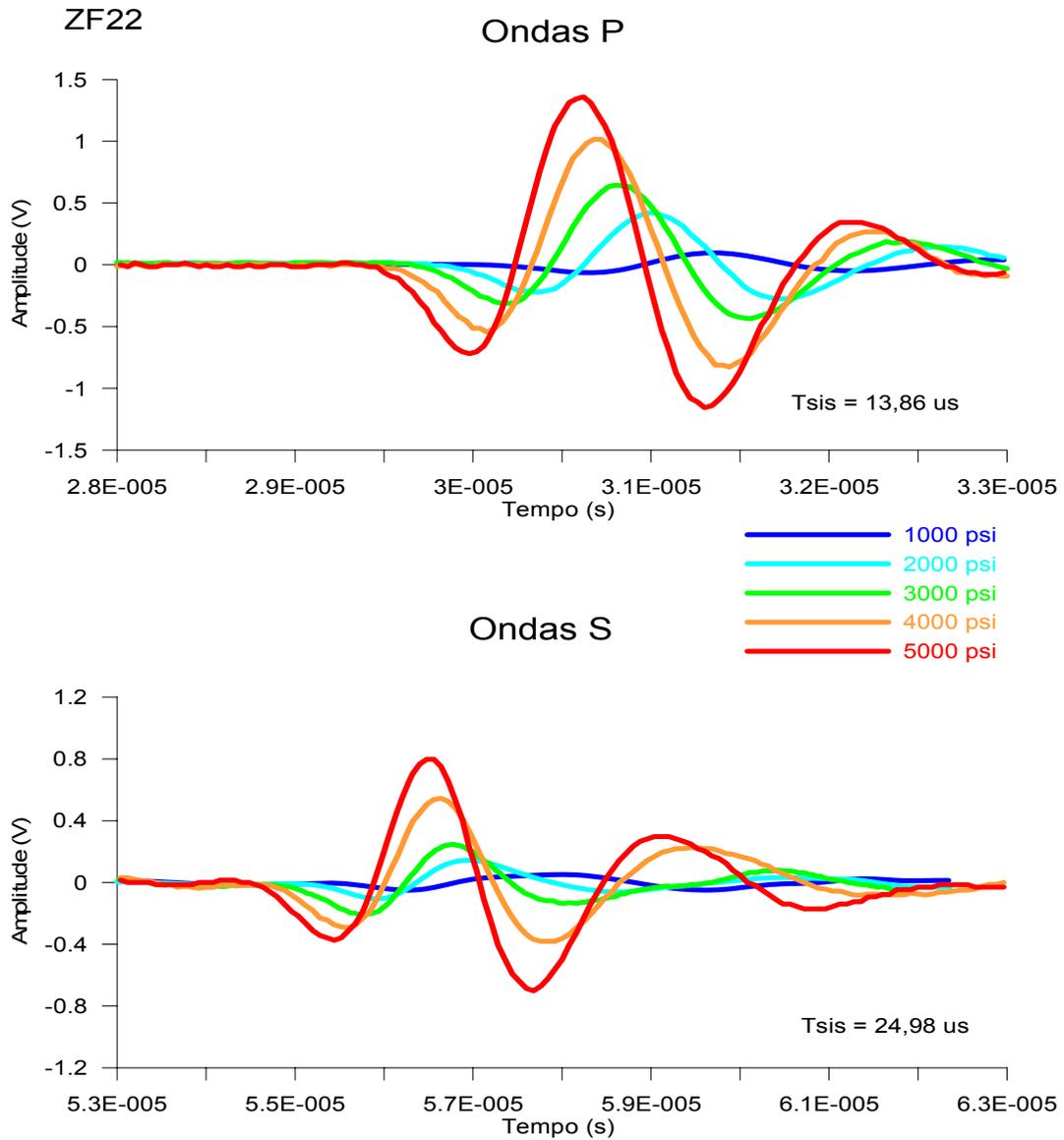


Figura 4.8 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-22.

Amostra ZP-28

A Figura 4.9 apresenta as formas de onda registradas para a amostra de folhelho ZF-28. De modo similar às demais amostras da primeira campanha de ensaios, observa-se o comportamento esperado: aumento da amplitude e decréscimo dos tempos com aumento da pressão confinante. Para essa amostra, devido a uma falha operacional, não houve registro a pressão de 4000 psi.

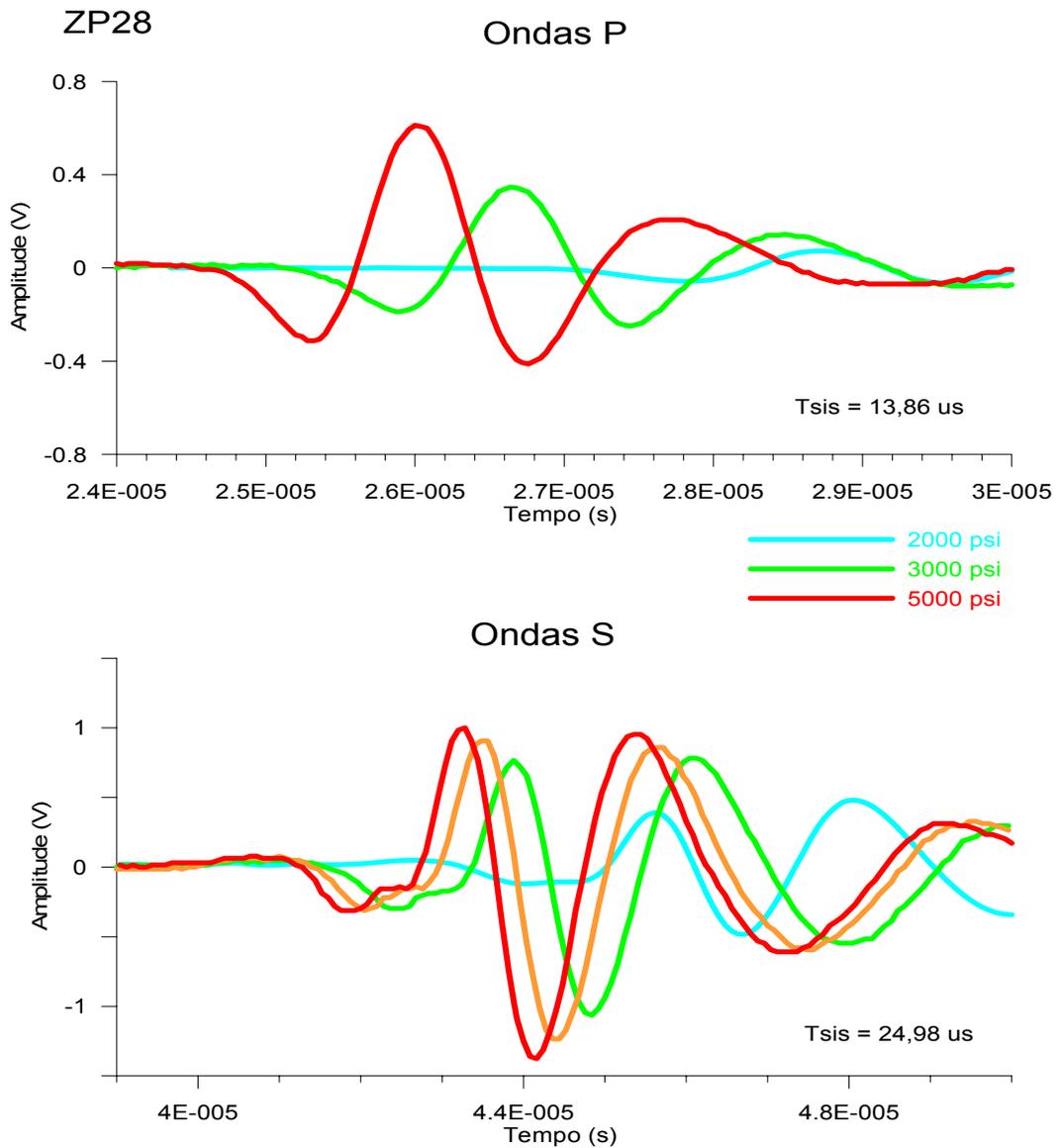


Figura 4.9 – Formas de onda P e S registradas na amostra ZF-28.

4.2 – Extração dos atributos de atenuação

O programa de extração dos atributos de atenuação das ondas fornece duas saídas gráficas para cada onda medida. Devido ao grande número de gráficos, neste Capítulo analisaremos primeiramente os gráficos relativos à amostra ZAF-19, e os gráficos das demais amostras são apresentados sequentemente.

4.2.1 – Primeira campanha de ensaios

As Figuras 4.10 a 4.25 apresentam os resultados gerados pelo programa de extração de atributos de atenuação para a amostra ZAF-19.

A Figura 4.10 apresenta, no painel superior, os trechos selecionados para análise da onda P registrada a 1000 psi na amostra de referência (curva vermelha) e na amostra ZAF-19 (curva azul). O painel intermediário apresenta os espectros de amplitude dessas ondas. Os trechos na cor verde indicam o intervalo de frequências utilizado na aplicação do método da razão espectral. No painel inferior são apresentados os espectros de fase da onda na amostra de referência (curva vermelha) e na amostra ZAF-19 (curva azul). A Figura 4.11 apresenta a relação linear descrita na equação (2.20) para a amostra ZAF-19 a 1000 psi. Do coeficiente angular da reta de ajuste se extraem os atributos de atenuação como a constante γ , o coeficiente de atenuação $\alpha(f)$ e o fator de qualidade Q. As Figuras 4.12 a 4.25 apresentam resultados similares para as ondas P e S da amostra ZAF-19 sob as pressões de 2000 psi a 5000 psi.

A Tabela 4.1 apresenta os valores do coeficiente de atenuação e fator Q para as ondas P e S de todas as amostras da primeira campanha de ensaios. O coeficiente de atenuação $\alpha(f)$ foi calculado a partir da multiplicação do coeficiente angular (extraído do ajuste gráfico) pela razão entre a frequência de corte média (do intervalo de ajuste) e o comprimento da amostra. Essa frequência de corte pode ser visualizada nos gráficos de determinação do coeficiente angular, onde para cada pressão verifica-se a frequência média do gráfico.

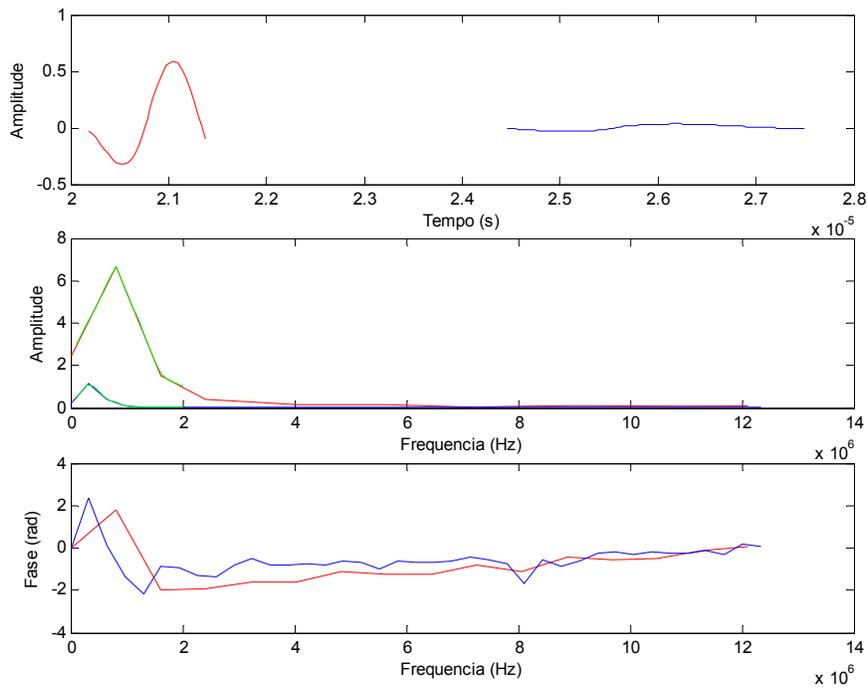


Figura 4.10 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 1000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

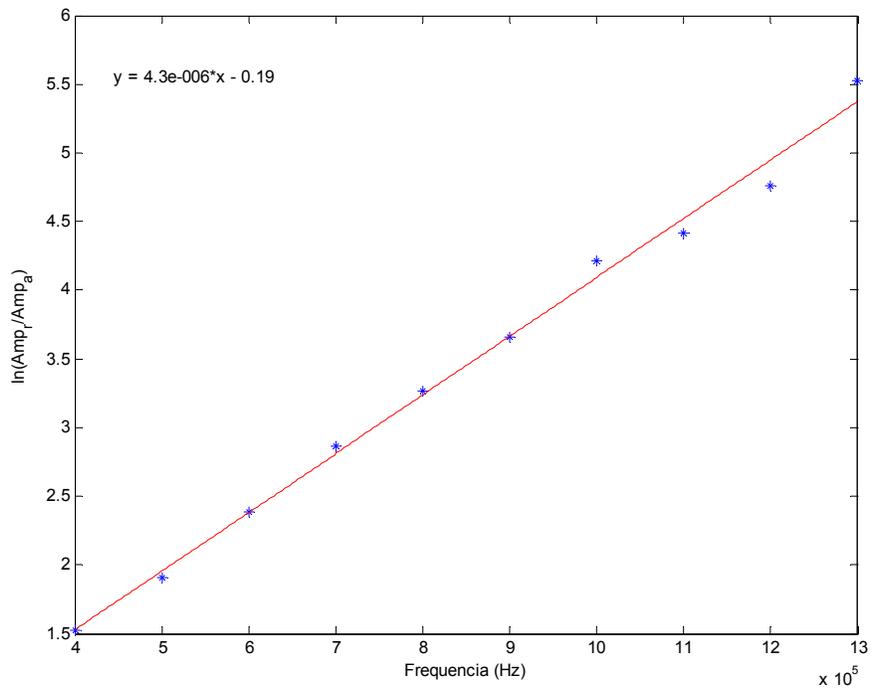


Figura 4.11 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 1000 psi.

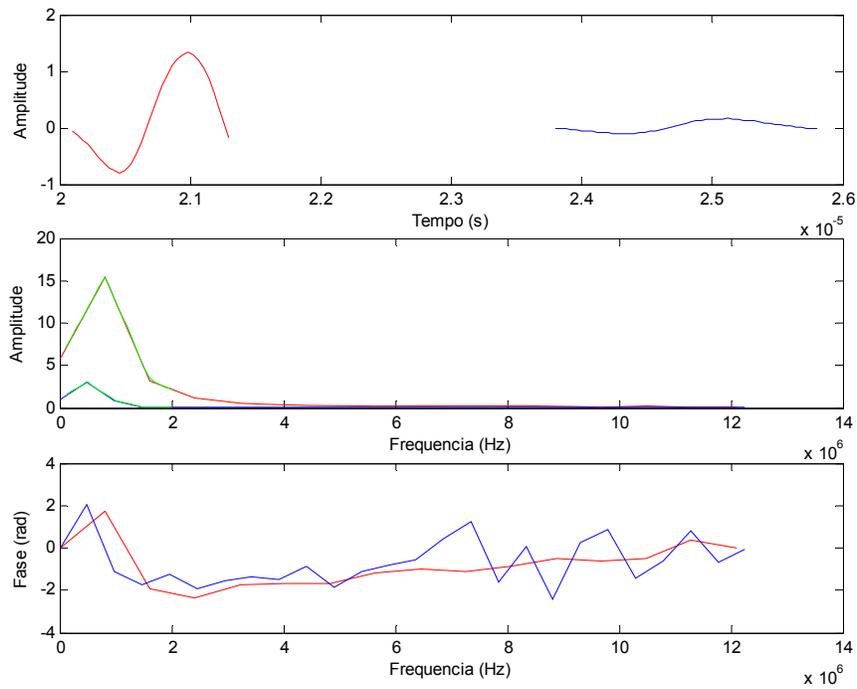


Figura 4.12 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 2000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

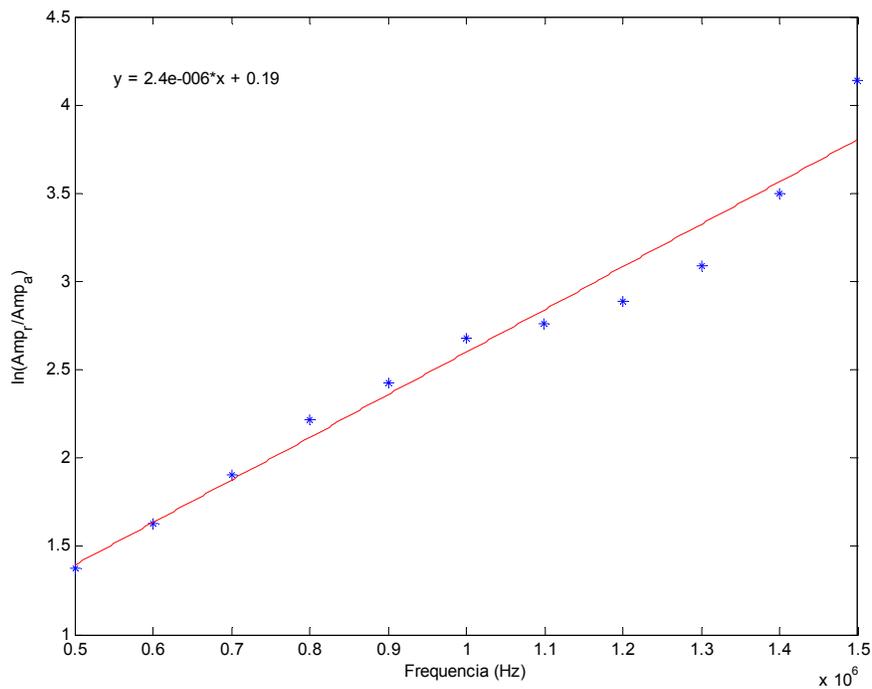


Figura 4.13 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 2000 psi.

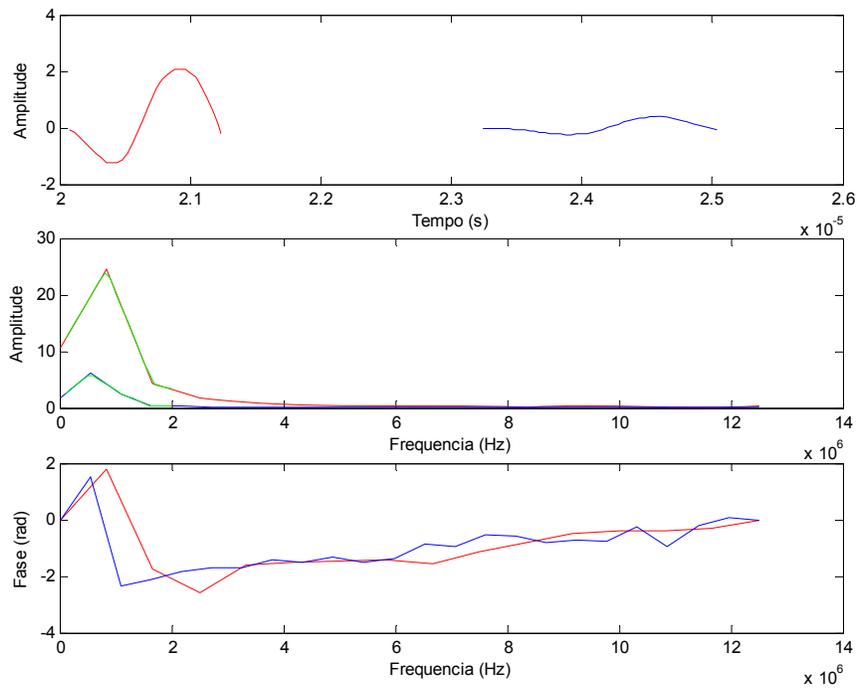


Figura 4.14 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 3000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

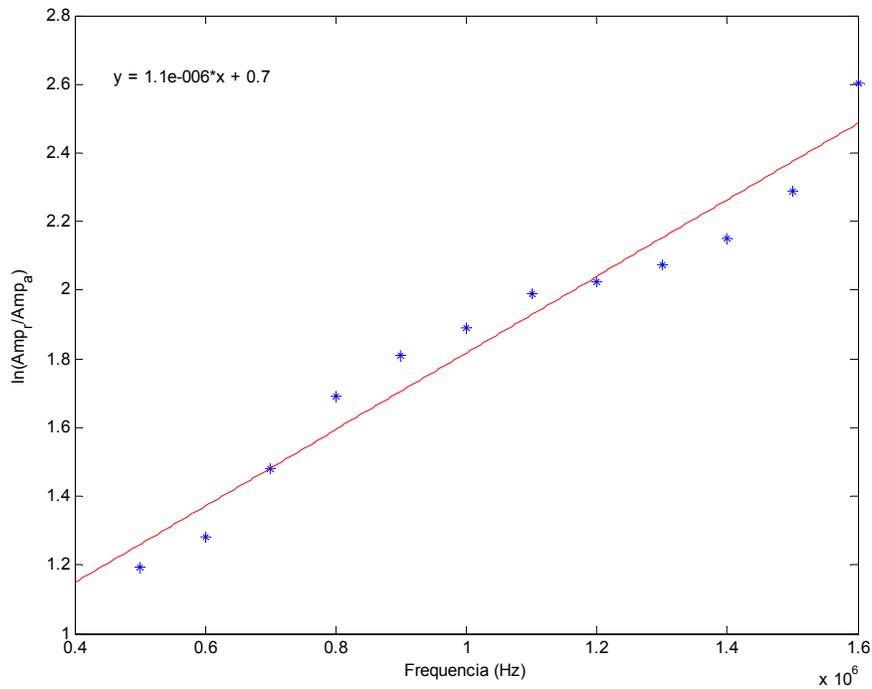


Figura 4.15 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 3000 psi.

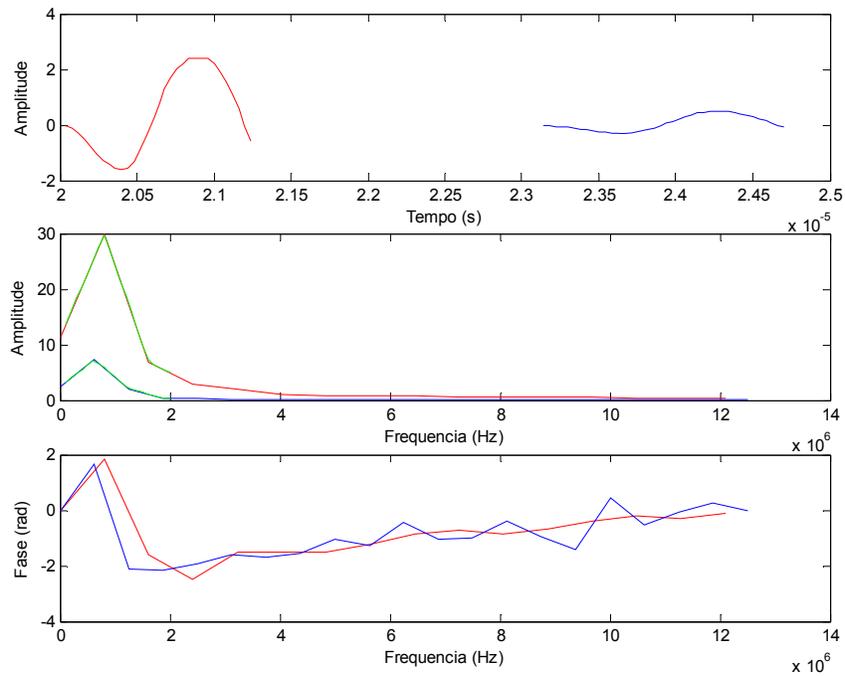


Figura 4.16 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 4000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

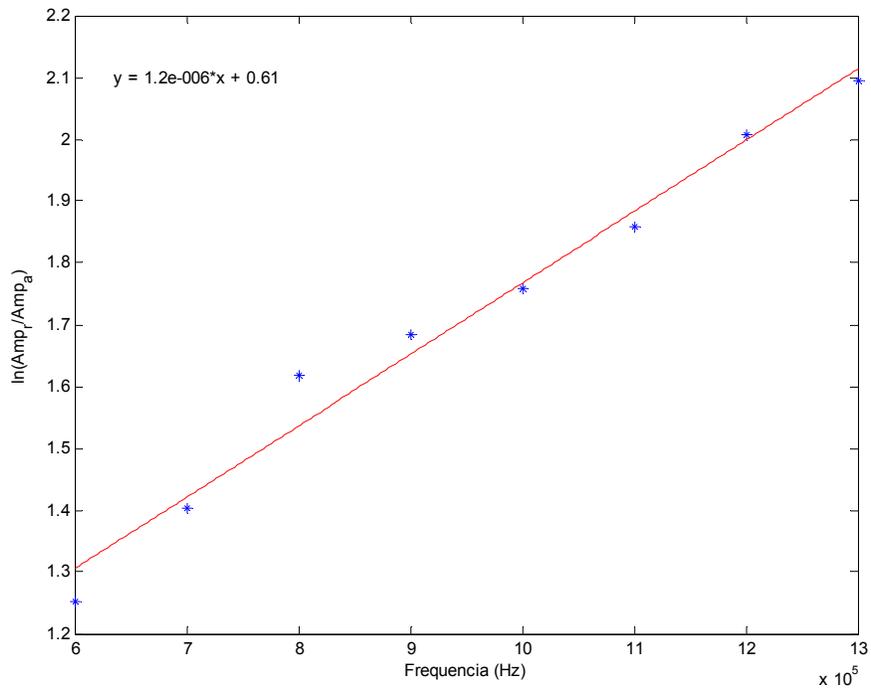


Figura 4.16b – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 4000 psi.

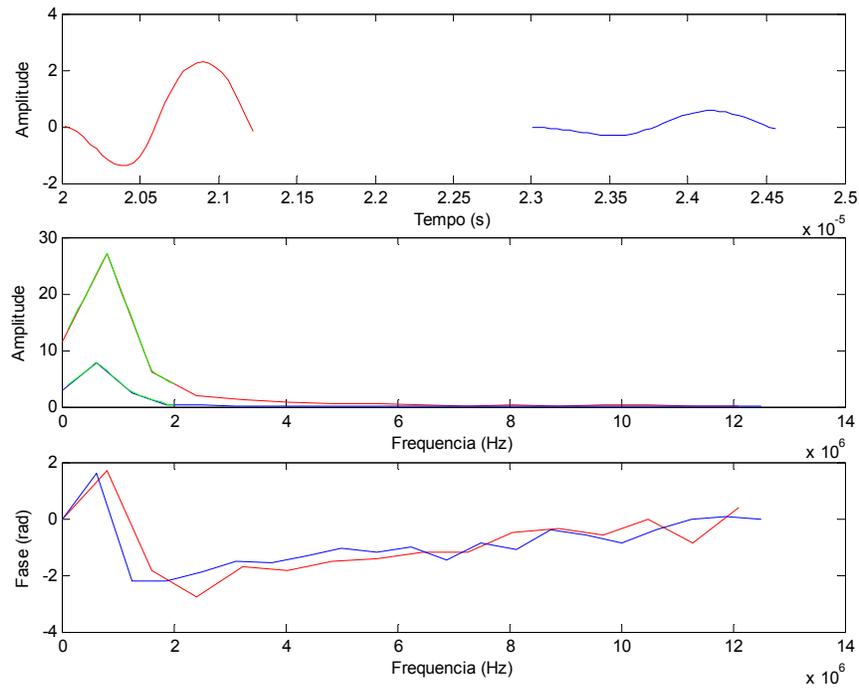


Figura 4.17 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P a 5000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

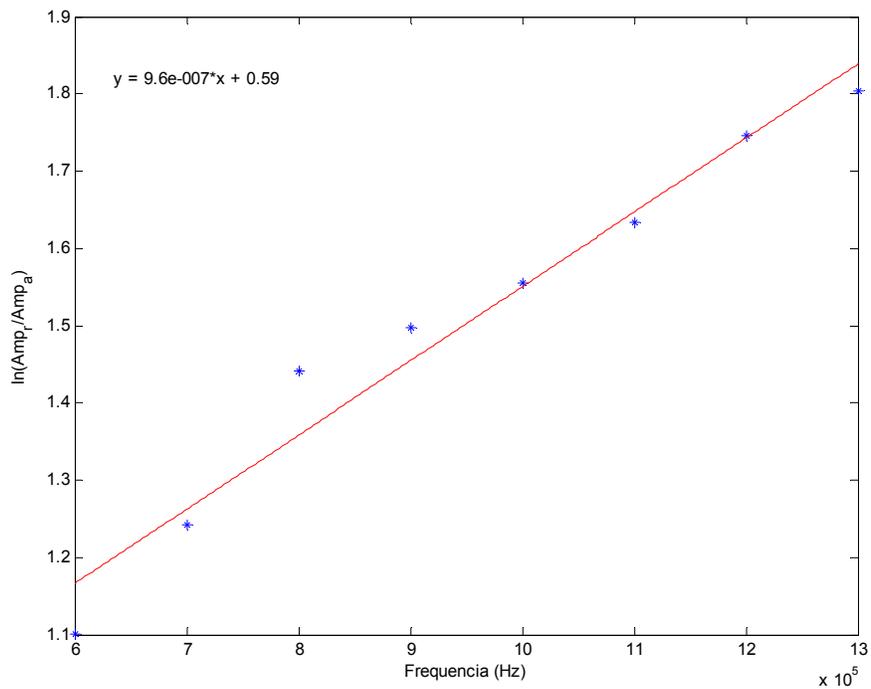


Figura 4.18 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZAF-19 a 5000 psi.

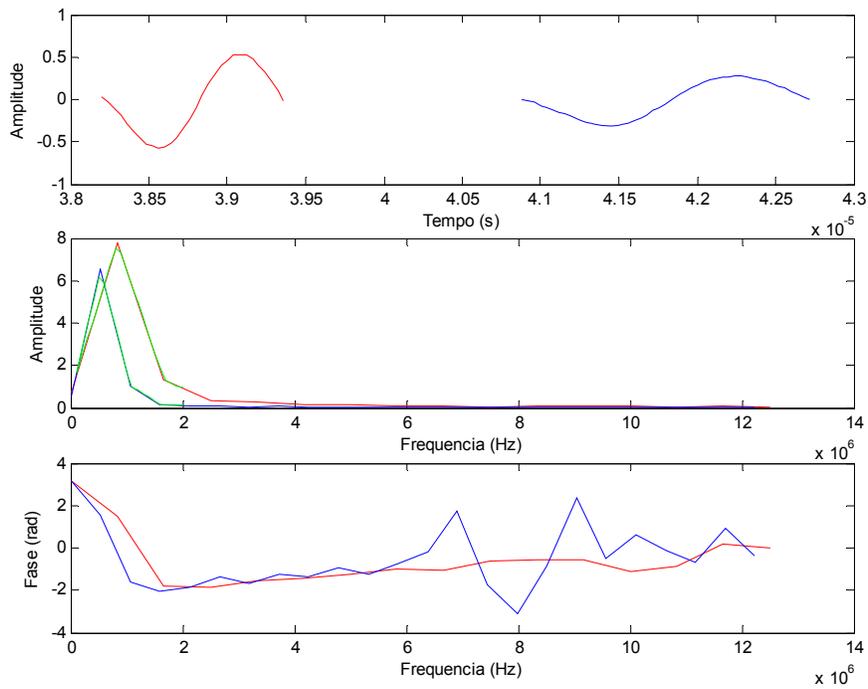


Figura 4.19 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S a 2000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

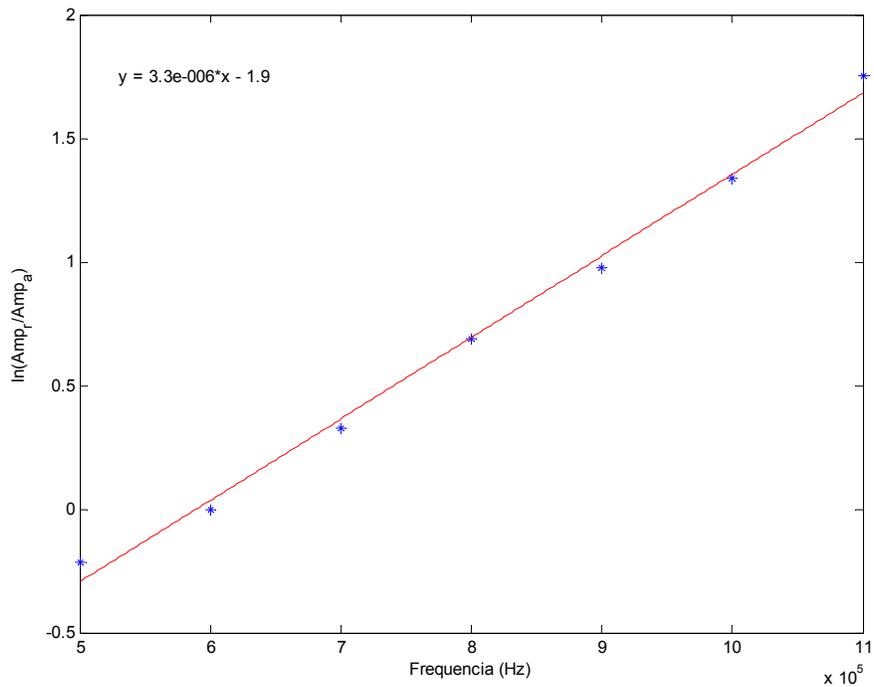


Figura 4.20 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZAF-19 a 2000 psi.

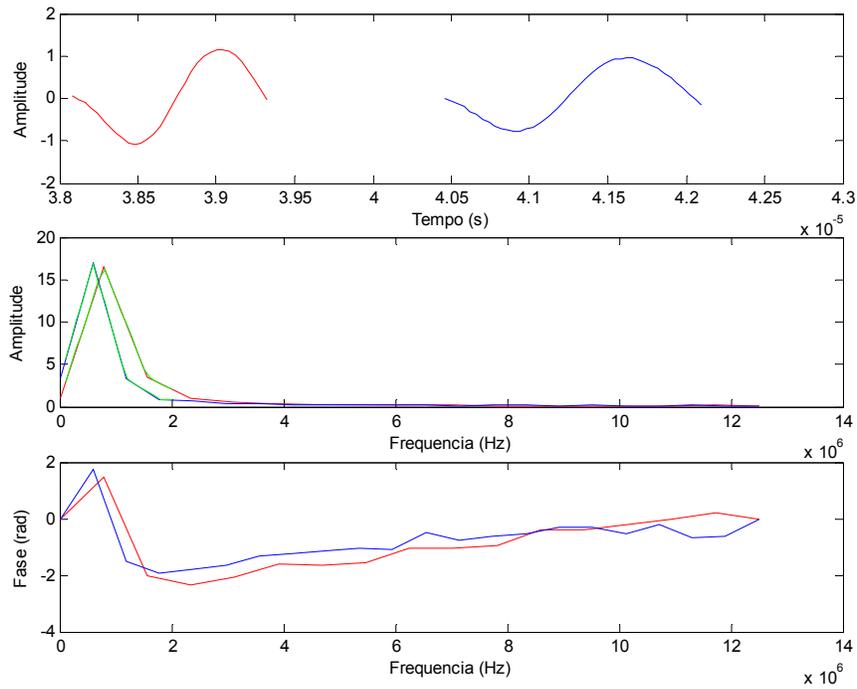


Figura 4.21 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S a 3000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

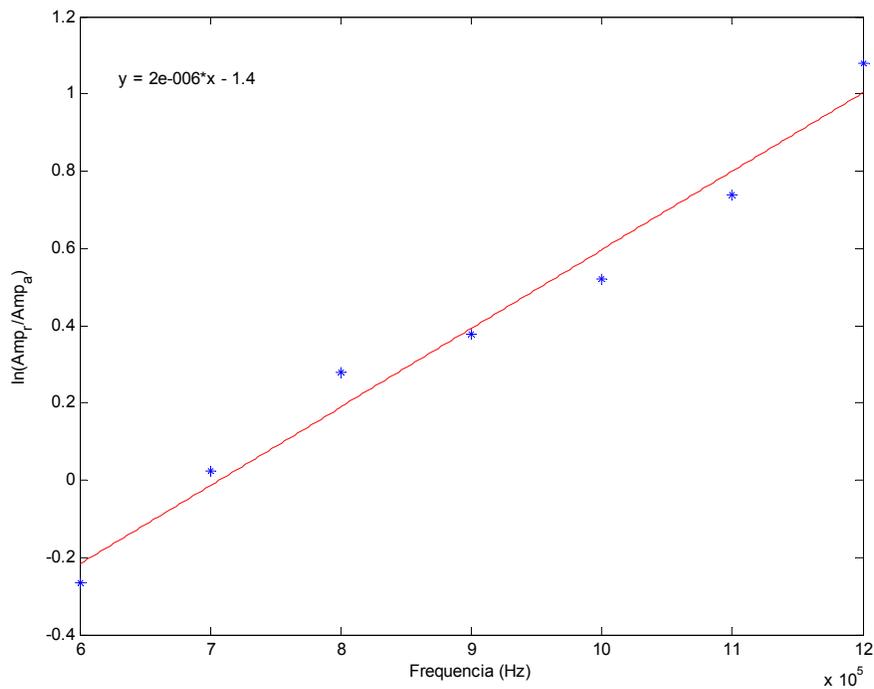


Figura 4.22 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZAF-19 a 3000 psi.

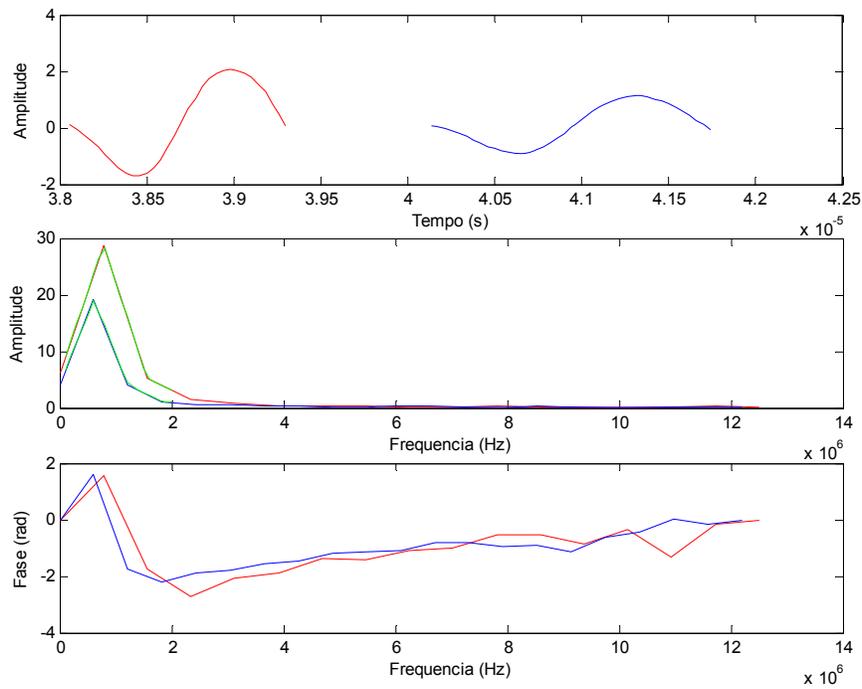


Figura 4.23 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S a 4000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

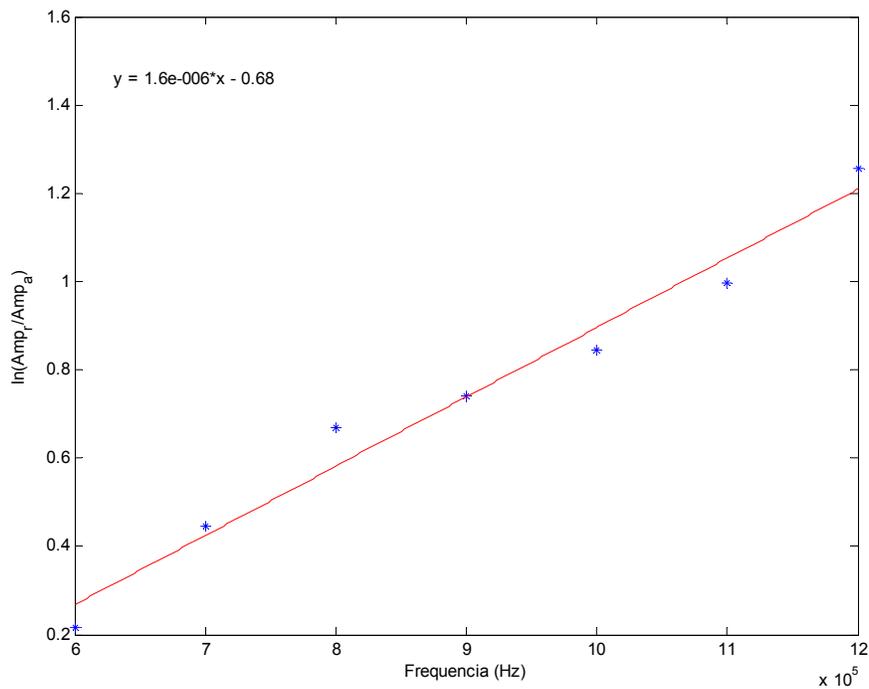


Figura 4.24 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZAF-19 a 4000 psi.

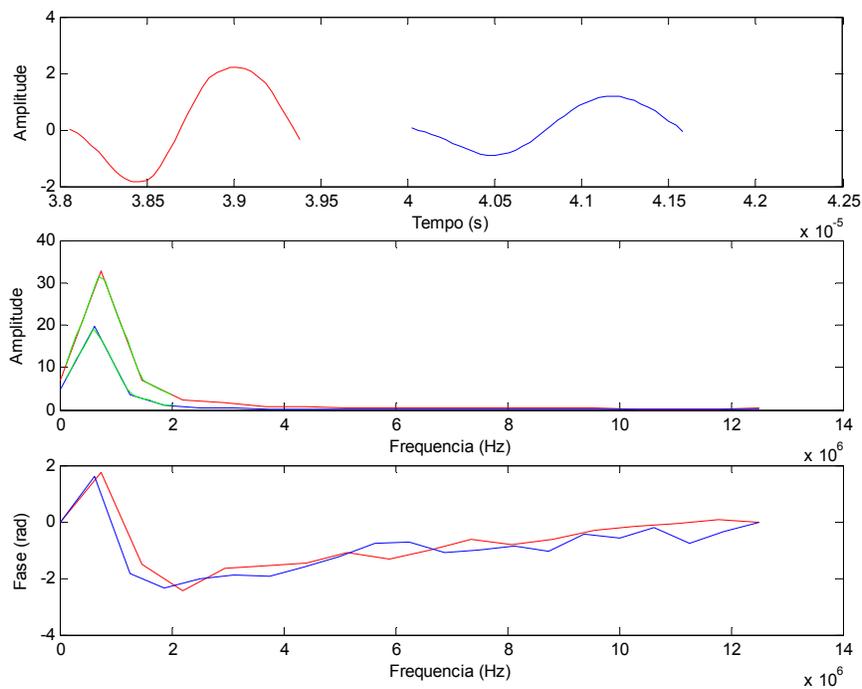


Figura 4.25 – Trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S a 5000 psi da amostra ZAF-19 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul).

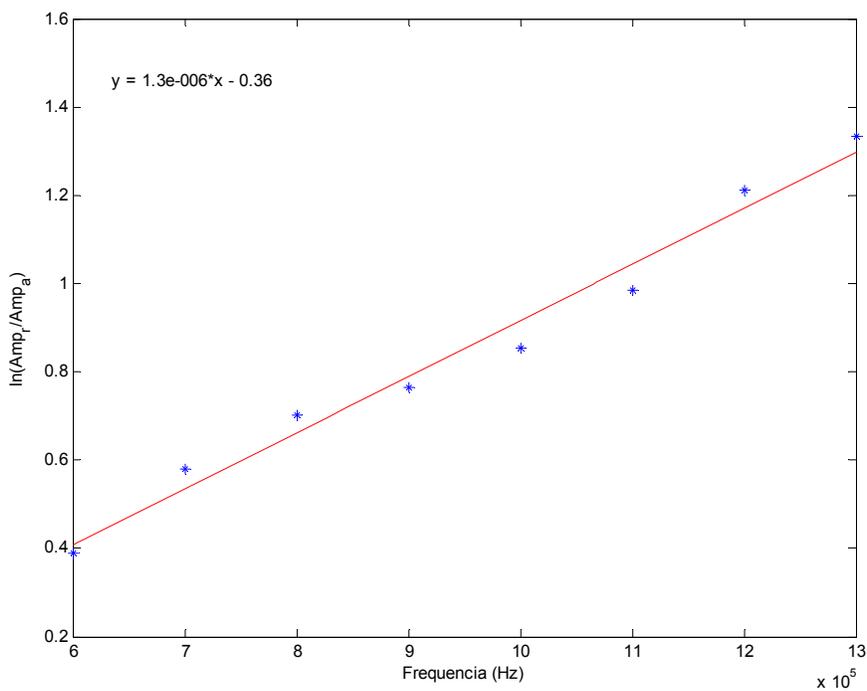


Figura 4.26 – Determinação do coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZAF-19 a 5000 psi.

Amostra ZP-05

Onda P

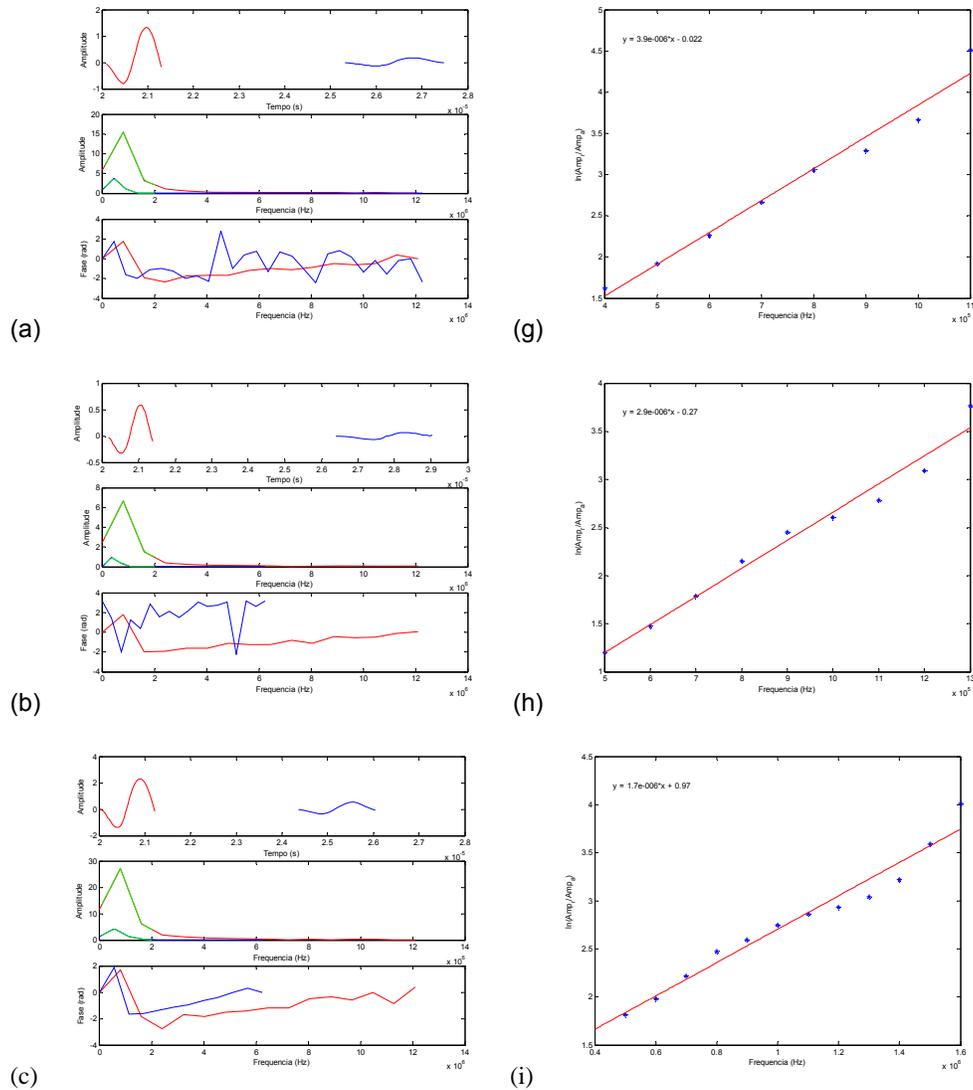


Figura 4.27 – As figuras (a), (b), (c), representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 1000, 2000 e 3000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZP-05 a 1000, 2000 e 3000psi, com seus respectivos valores $3,9e-06$, $2,9e-06$ e $2e-06$.

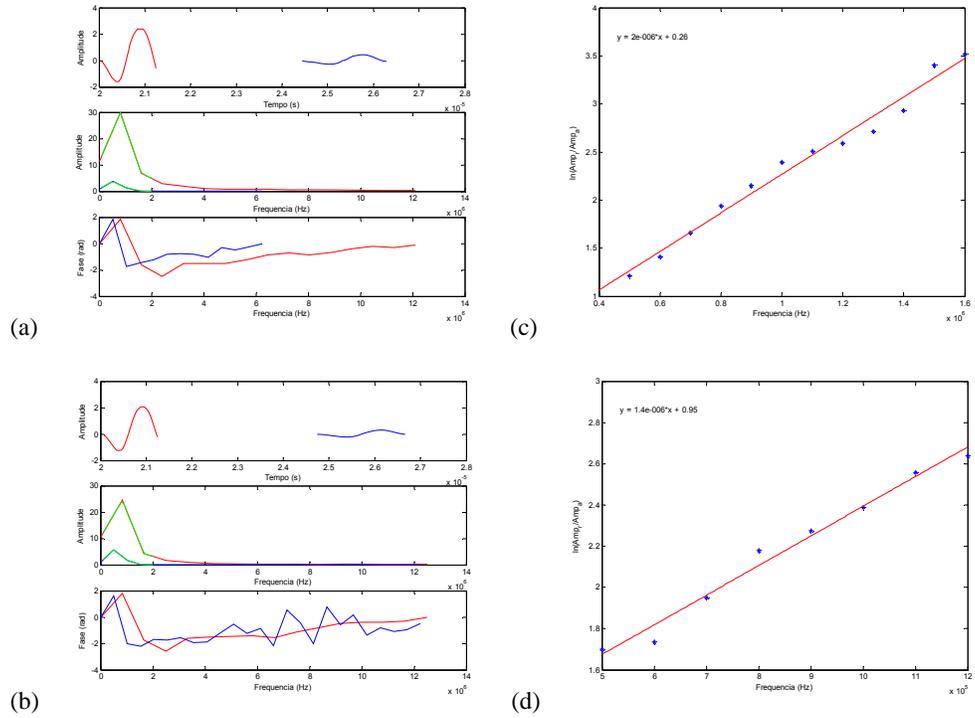


Figura 4.28 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000 e 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZP-05 a 4000 e 5000psi, com seus respectivos valores $1,4e-06$ e $1,7e-06$.

Onda S

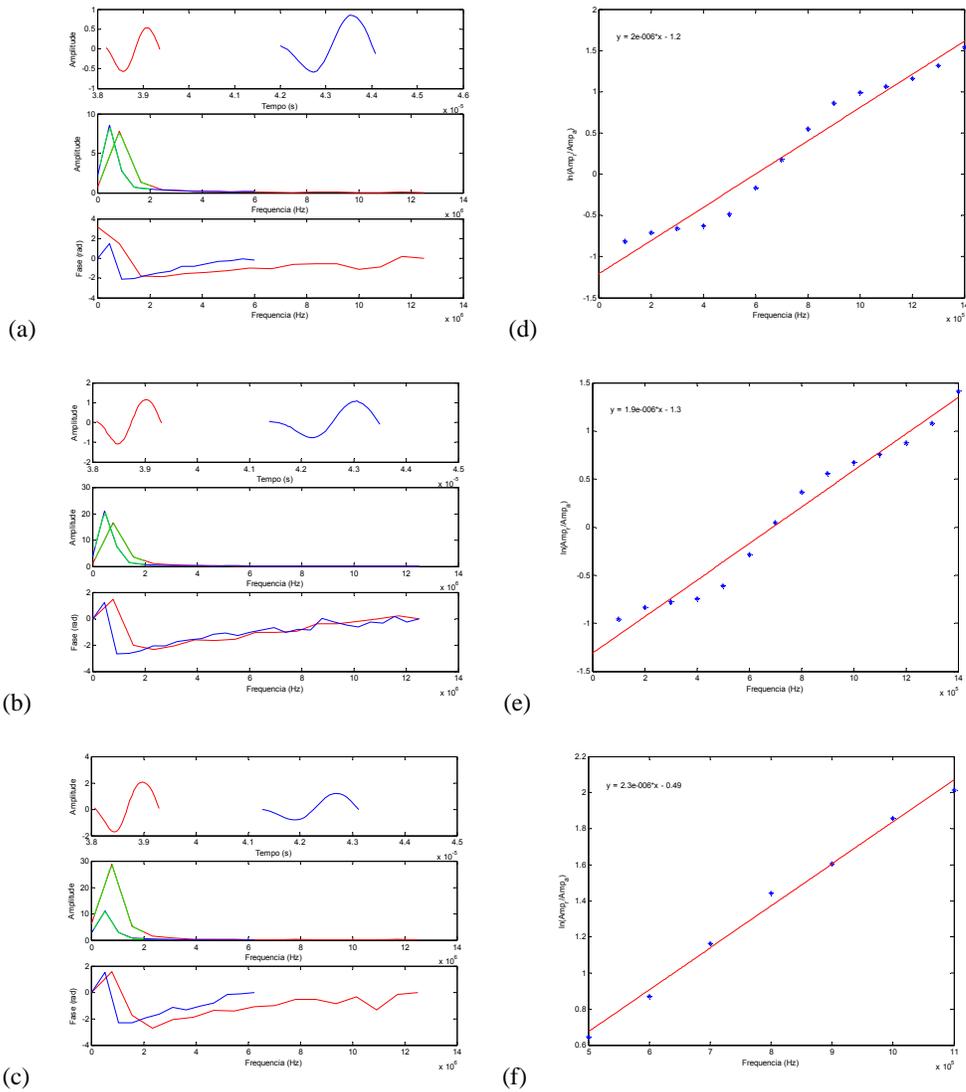
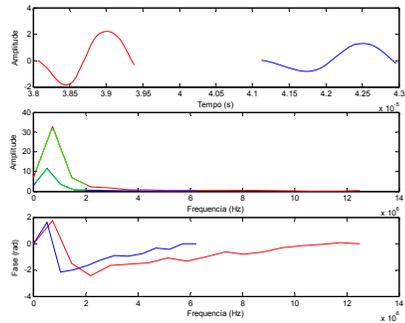
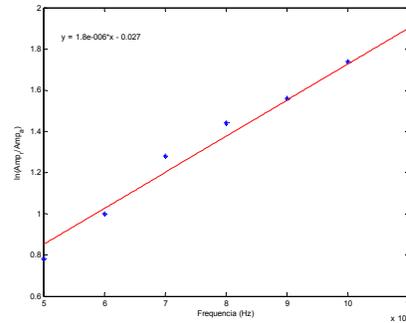


Figura 4.29 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000 e 4000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-05 a 2000, 3000 e 4000psi, com seus respectivos valores $2e-06$, $1,9e-06$, $2,3e-006$.



(a)



(b)

Figura 4.30 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-05 a 5000psi com valor $1,8e-06$.

Amostra ZF-01

Onda P

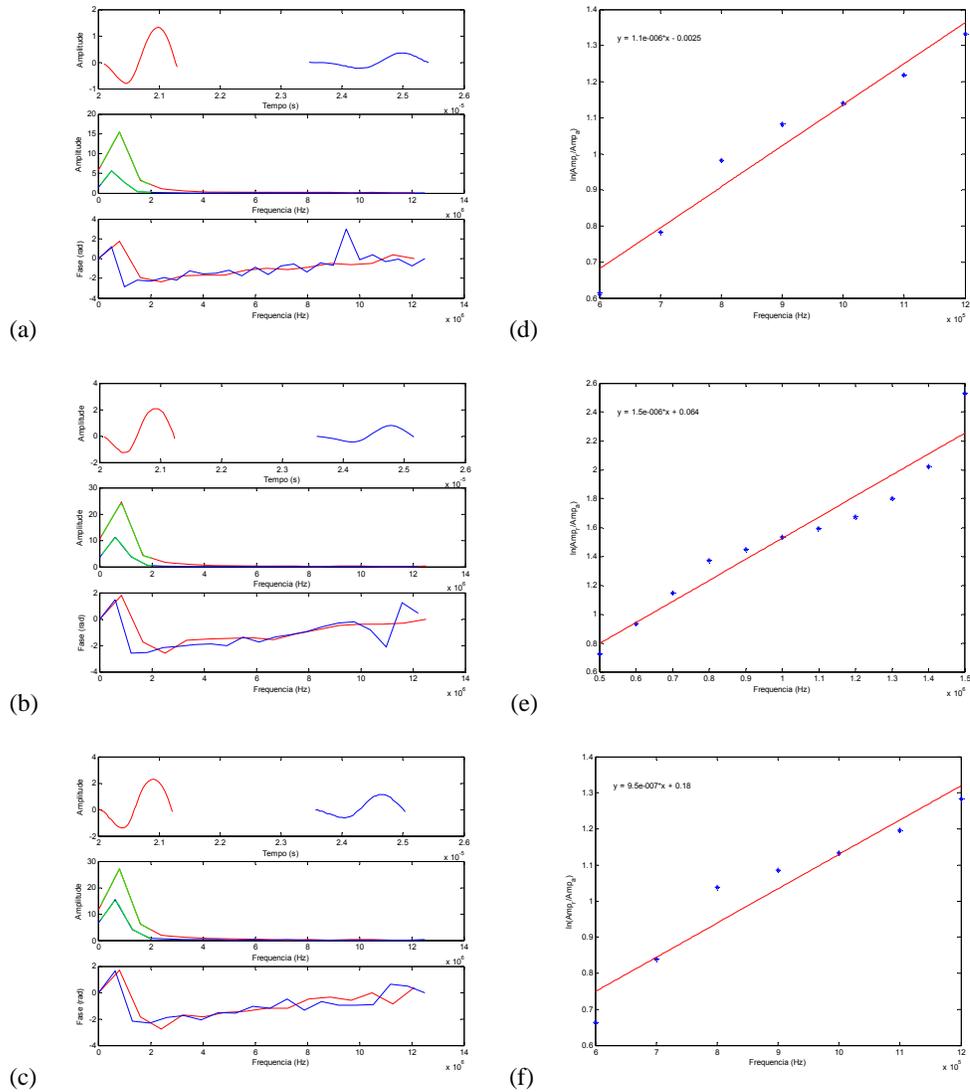


Figura 4.31 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-01(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000 e 4000psi. As figuras (d),(e) e determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-01 a 2000, 3000 e 4000psi, com seus respectivos valores 1,5e-06, 1,1e-06 e 9,5e-07

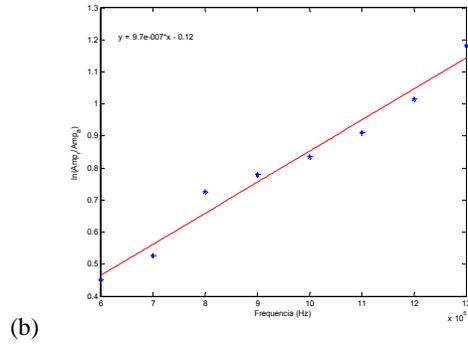
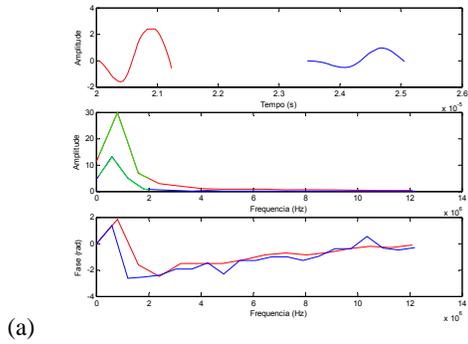


Figura 4.32 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-05(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-05 a 5000psi com valor $9,7e-07$.

Onda S

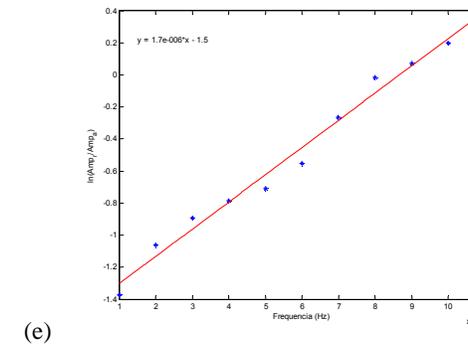
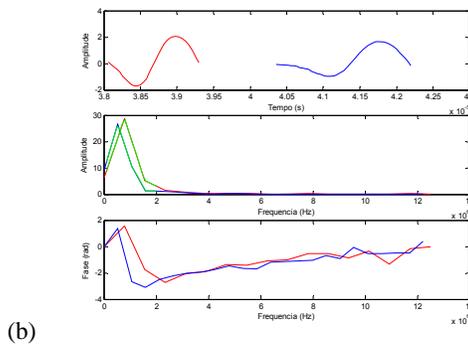
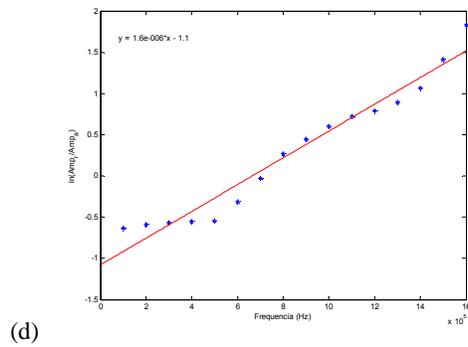
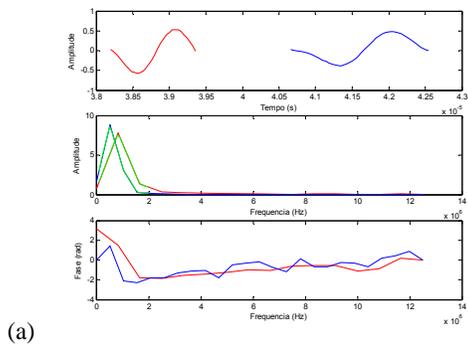


Figura 4.33 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-01 (em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000 e 3000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-01 a 2000 e 3000psi, com seus respectivos valores $1,6e-06$, $1,7e-06$.

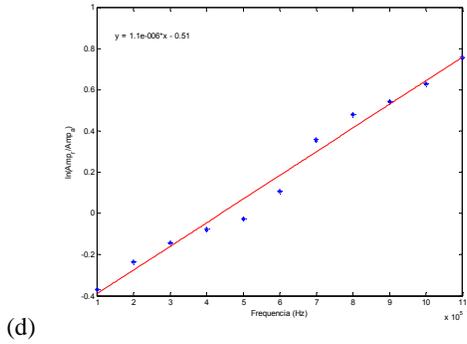
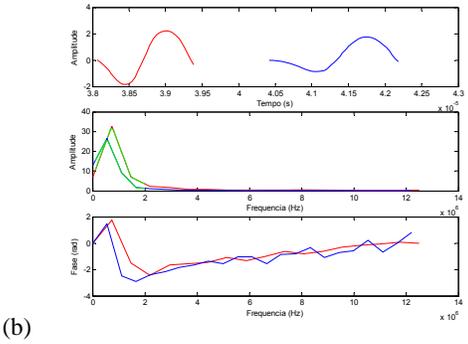
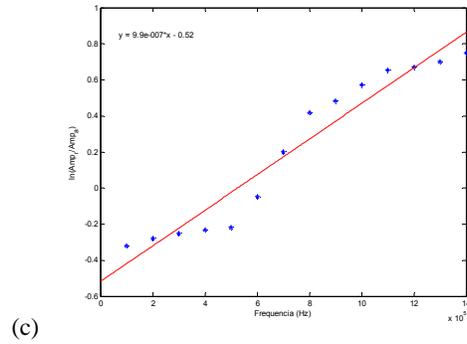
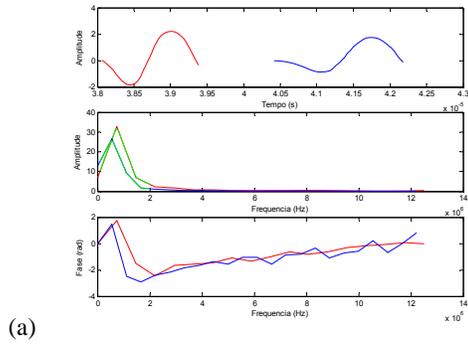


Figura 4.34 - As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-01(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000 e 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-01 a 4000 e 5000psi, com seus respectivos valores e $9,9e-07$ e $1,1e-06$.

Amostra ZF-10

Onda P

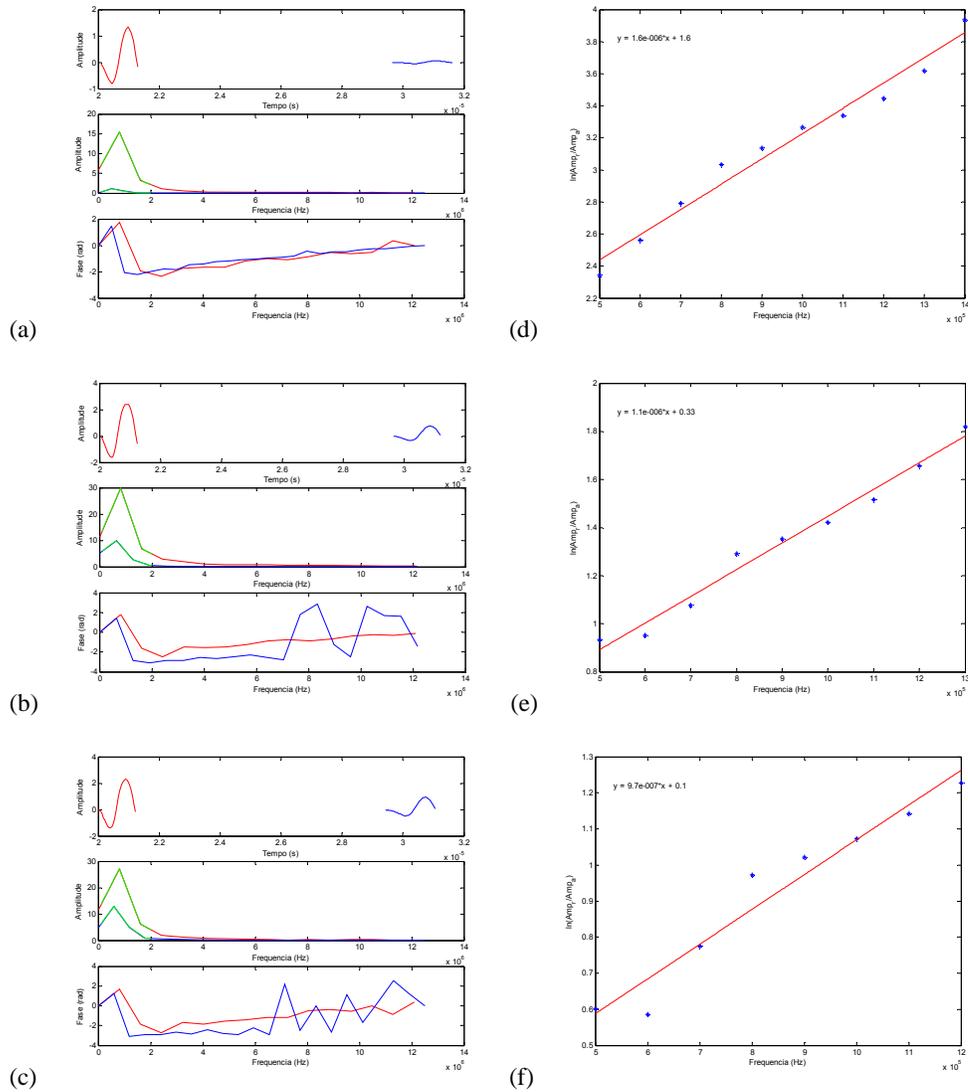


Figura 4.35 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-10(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 4000 e 5000psi. As figuras (d), (e) (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-10 a 2000, 4000 e 5000psi, com seus respectivos valores $1,6e-06$, $1,1e-06$ e $9,7e-07$.

Onda S

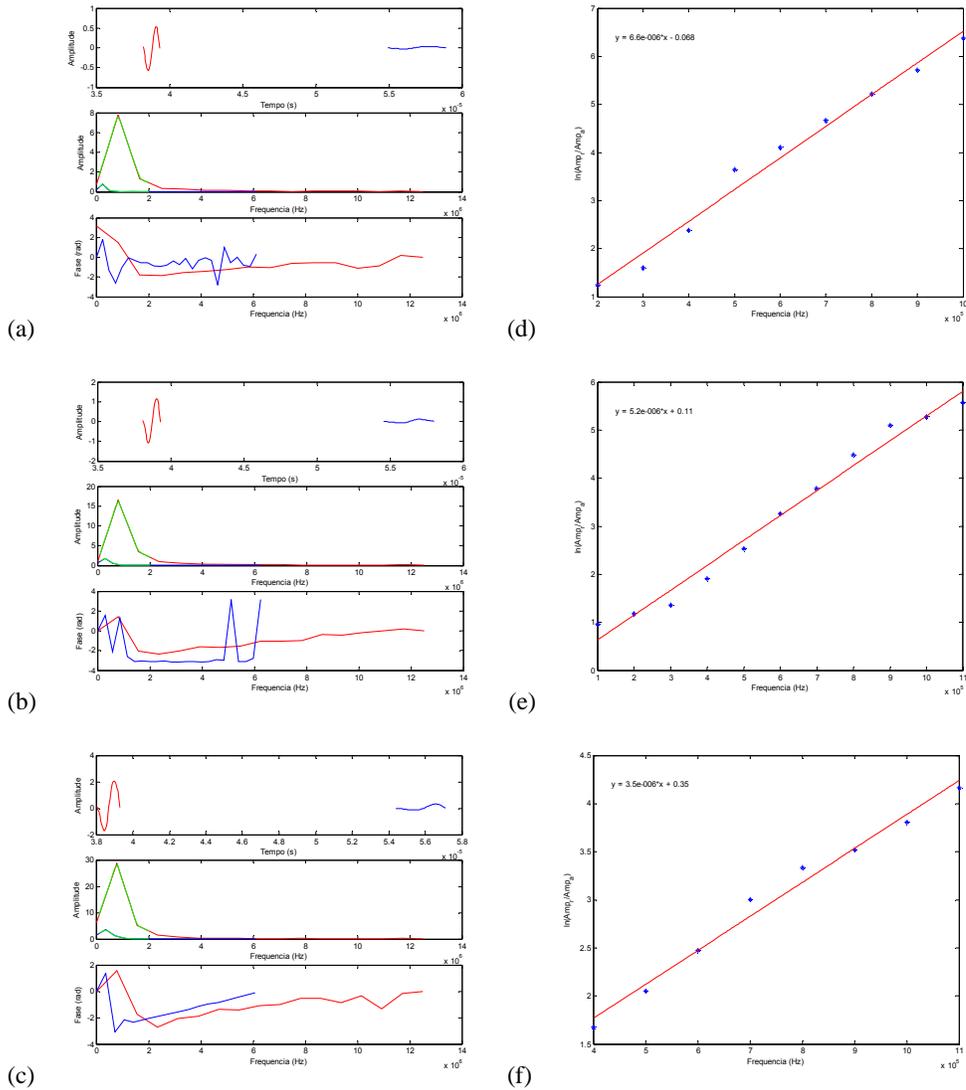
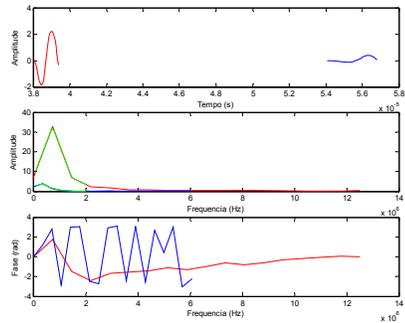
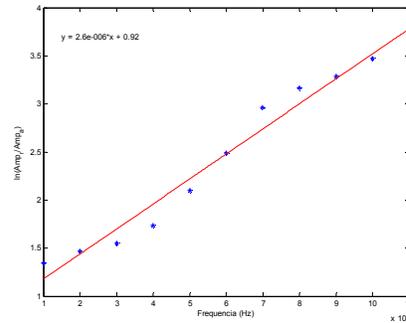


Figura 4.36a – As figuras (a), (b) (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-10(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000, 4000psi. As figuras (d),(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-10 a 2000, 3000 e 4000 psi, com seus respectivos valores $6,6e-06$, $5,2e-06$ e $3,5e-06$.



(a)



(b)

Figura 4.36 b– A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-10(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para a pressão de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-10 a 5000psi com valor $2,6e-06$.

Amostra ZF17

Onda P

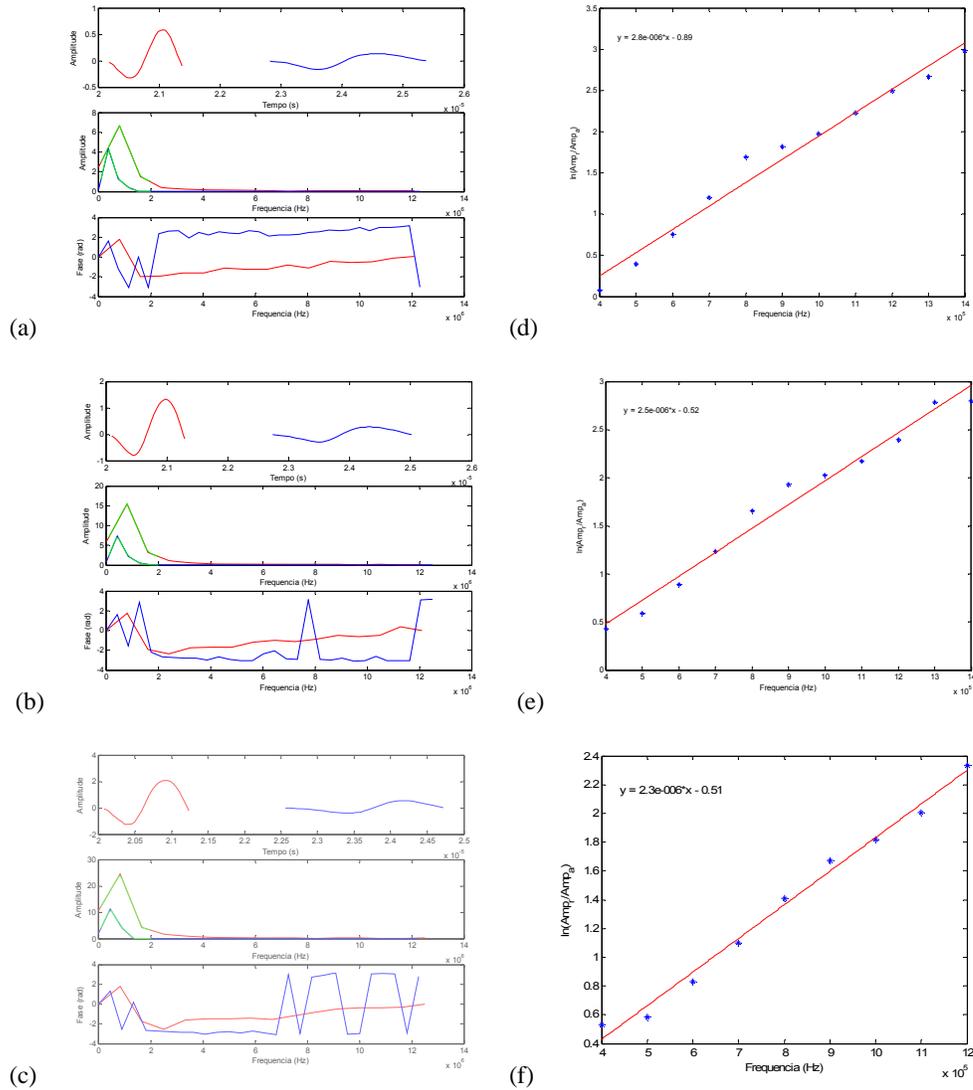
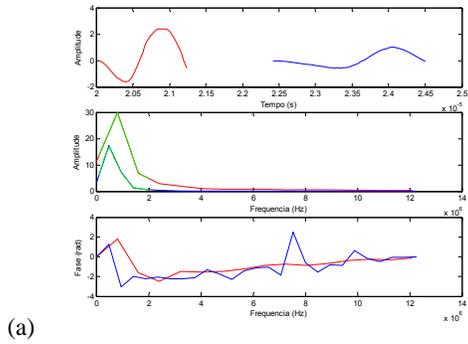
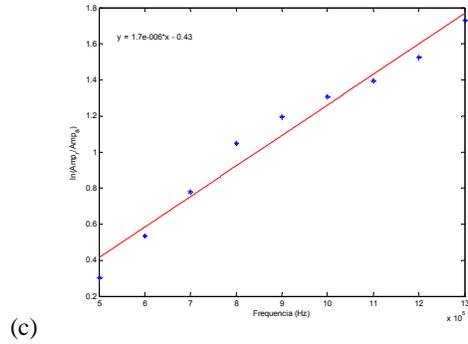


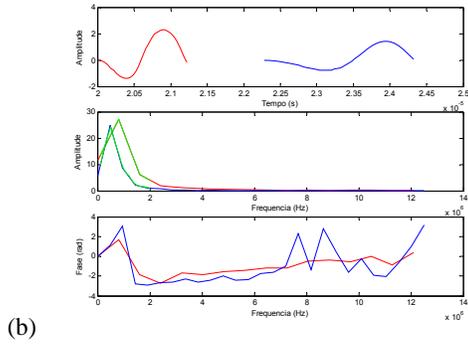
Figura 4.37 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-17(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 1000, 2000 e 3000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-17 a 1000, 2000 e 3000 psi, com seus respectivos valores $2,8e-06$, $2,5e-06$ e $2,3e-06$.



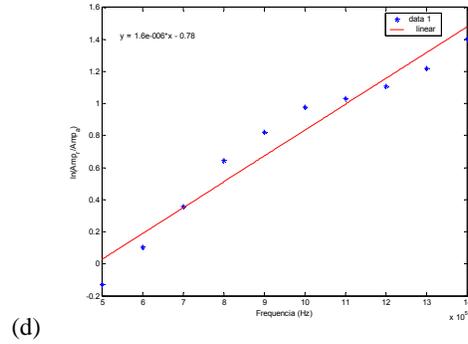
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 4.38 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-17(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000 e 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-17 a 4000 e 5000 psi, com seus respectivos valores 1,7e-06 e 1,6e-06.

Onda S

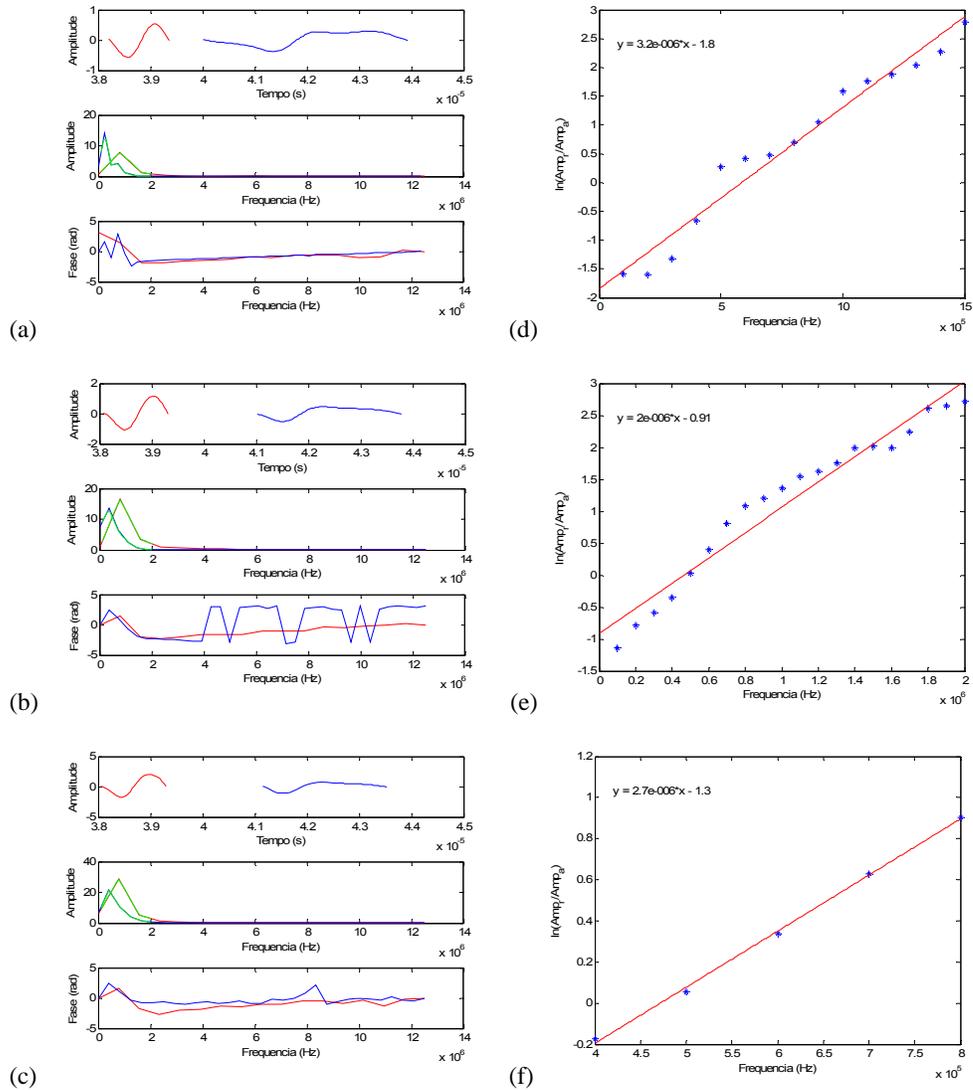


Figura 4.39 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-17(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000, 4000psi. As figuras (d)(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-17 a 2000, 3000 4000psi, com seus respectivos valores $3,2e-06$, $2e-06$ e $2,7e-06$.

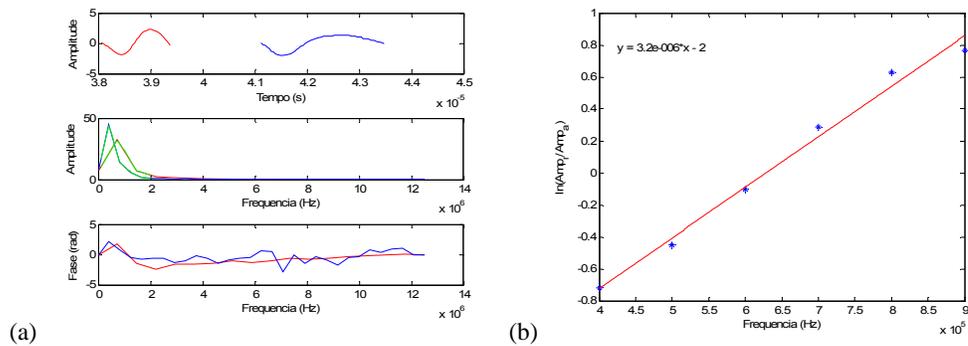


Figura 4.40 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-17(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-17 a 5000psi com valor $3,2e-06$.

Amostra ZF-22

Onda P

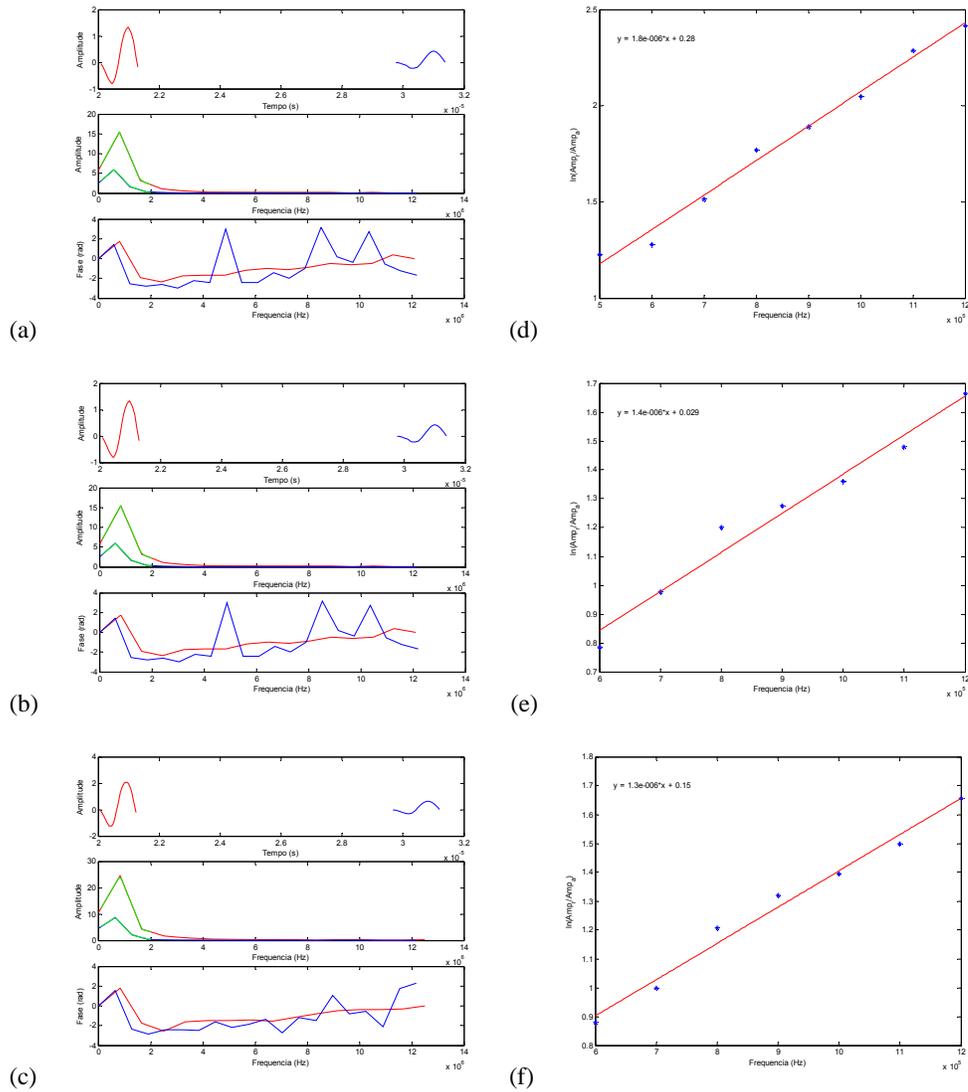


Figura 4.41 – As figuras (a), (b) (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-22(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 1000, 2000 e 3000psi. As figuras (d) (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-22 a 1000, 2000 e 3000psi, com seus respectivos valores 1,8e-06, 1,4e-06 e 1,3e-06,

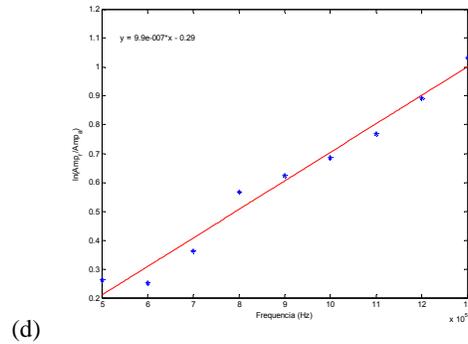
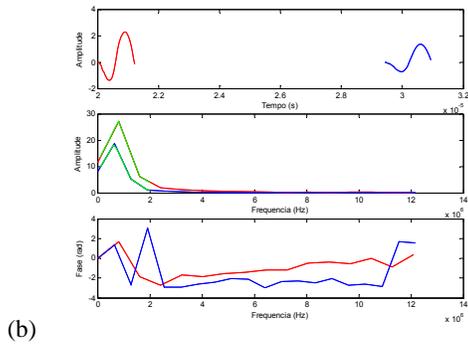
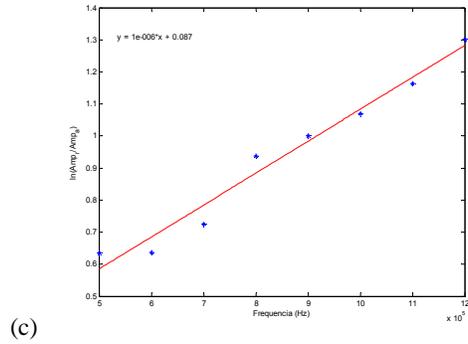
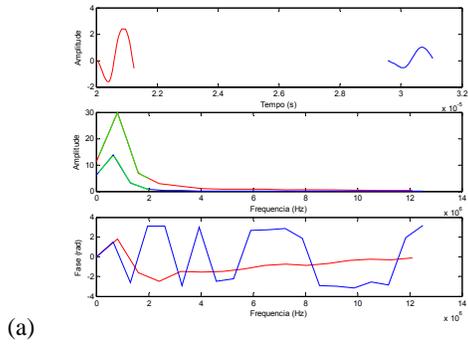


Figura 4.42 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-22(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000, 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-22 a 4000 e, 5000psi, com seus respectivos valores $1e-06$ e $9,9e-07$.

Onda S

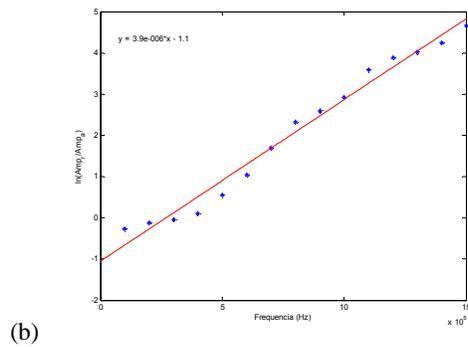
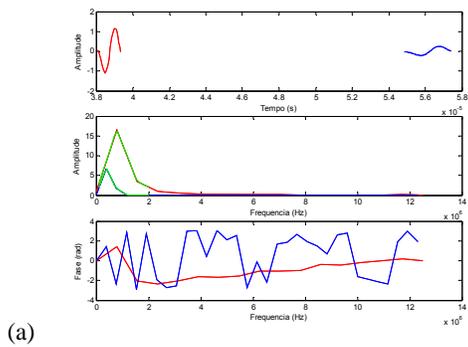


Figura 4.43 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-22(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-22 a 2000psi, com valor $3,9e-06$.

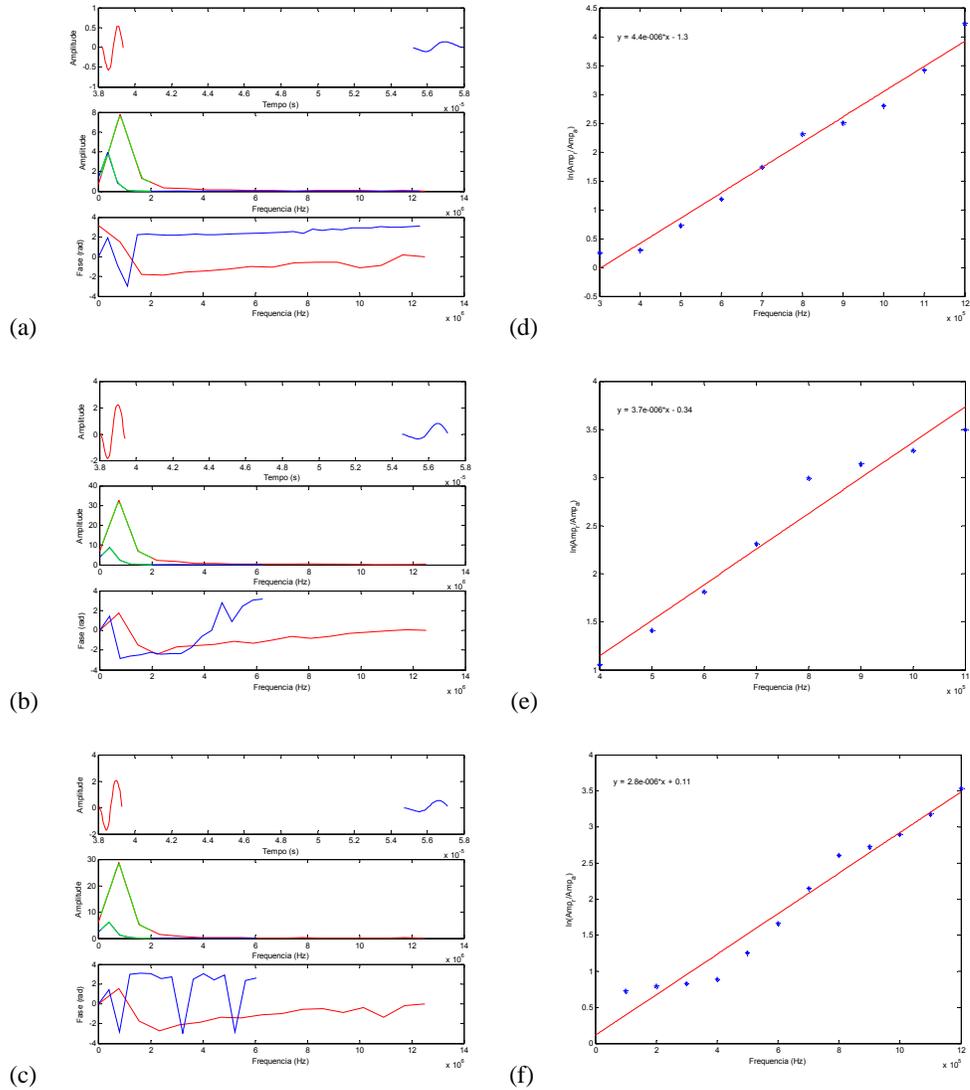


Figura 4.44 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-22(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 3000, 4000 e 5000psi. As figuras (d),(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-22 a 3000 4000 e 5000psi,com seus respectivos valores $4,4e-06$, $3,7e-06$ e $2,8e-06$.

Amostra ZF-13

Onda P

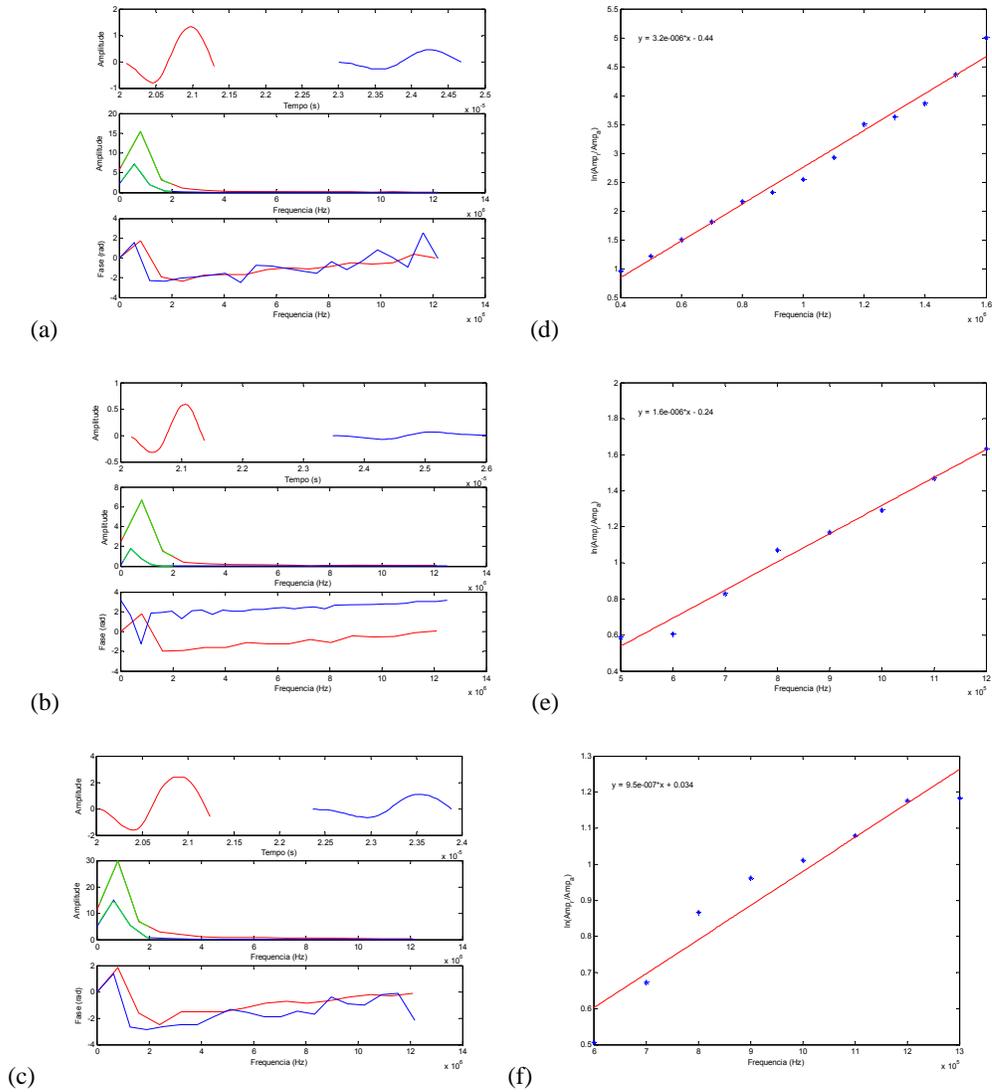


Figura 4.45 – As figuras (a) (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-13(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 1000, 2000 e 3000psi. As figuras (d),(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-13 a 1000, 2000, 3000 psi, com seus respectivos valores $3,2e-06$, $1,6e-06$, $9,5e-07$.

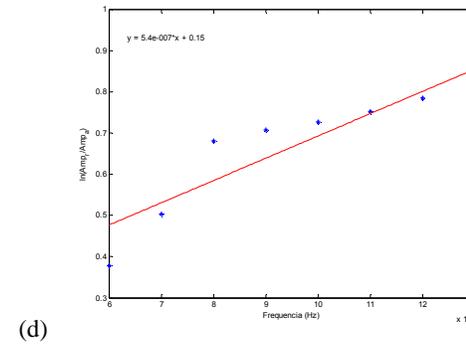
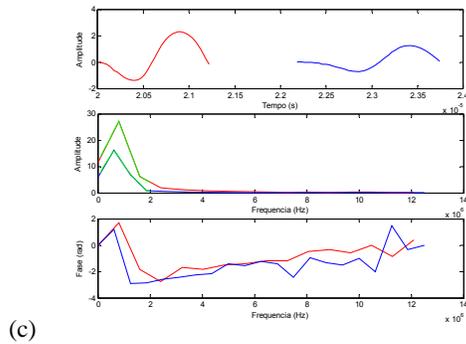
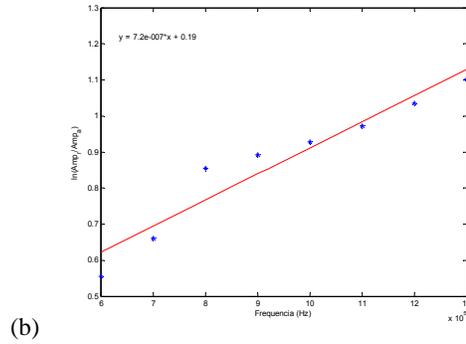
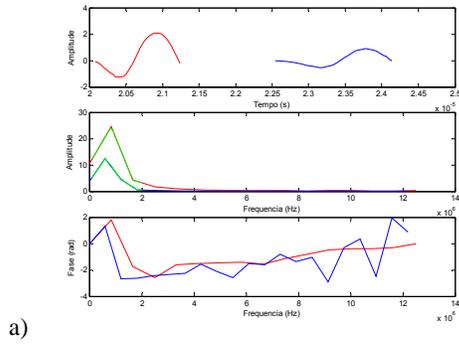


Figura 4.46 – As figuras (a) e (b) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZF-13(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 4000 e 5000psi. As figuras (c) e (d) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZF-13 a 4000 e 5000psi, com seus respectivos valores $7,2e-07$ e $5,4e-07$.

Onda S

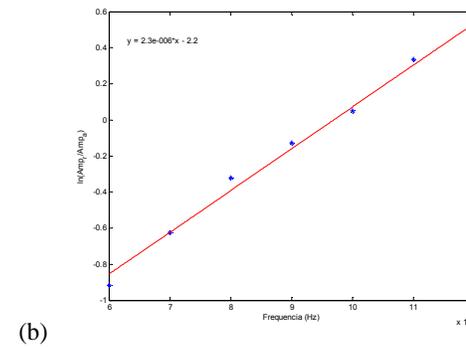
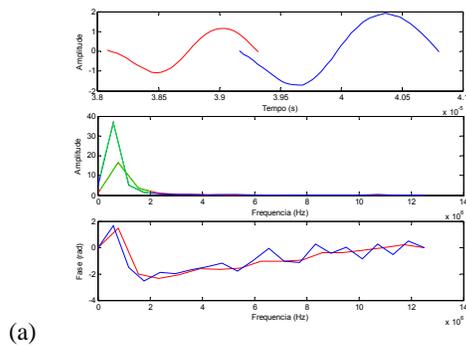
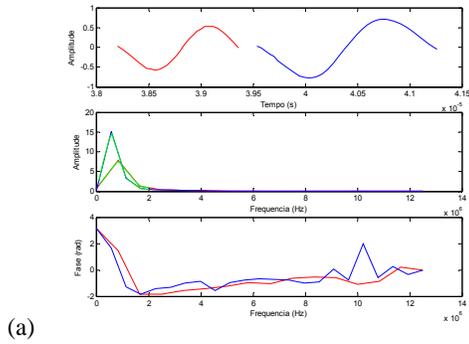
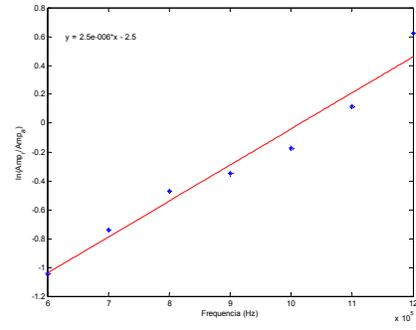


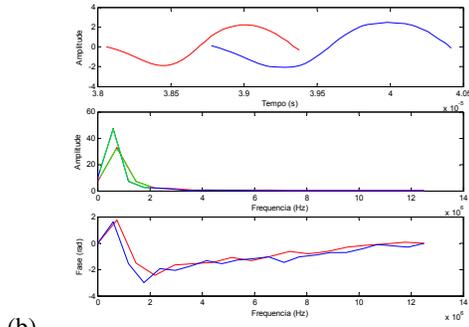
Figura 4.47 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-13(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-13 a 2000psi, com valor $2,3e-06$.



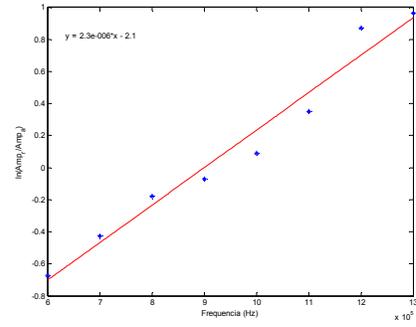
(a)



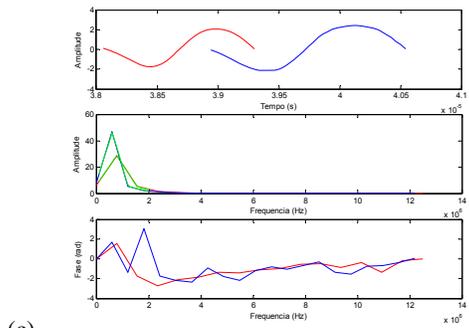
(d)



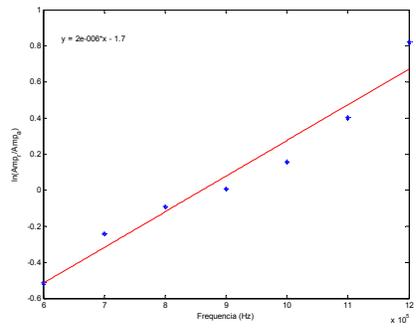
(b)



(e)



(c)



(f)

Figura 4.48 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZF-13(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 3000, 4000 e 5000psi. As figuras (d),(e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZF-13 a 3000 4000 e 5000psi, com seus respectivos valores $2,5e-06$, $2,3e-06$ e $2e-06$.

Amostra ZP-28

Onda P

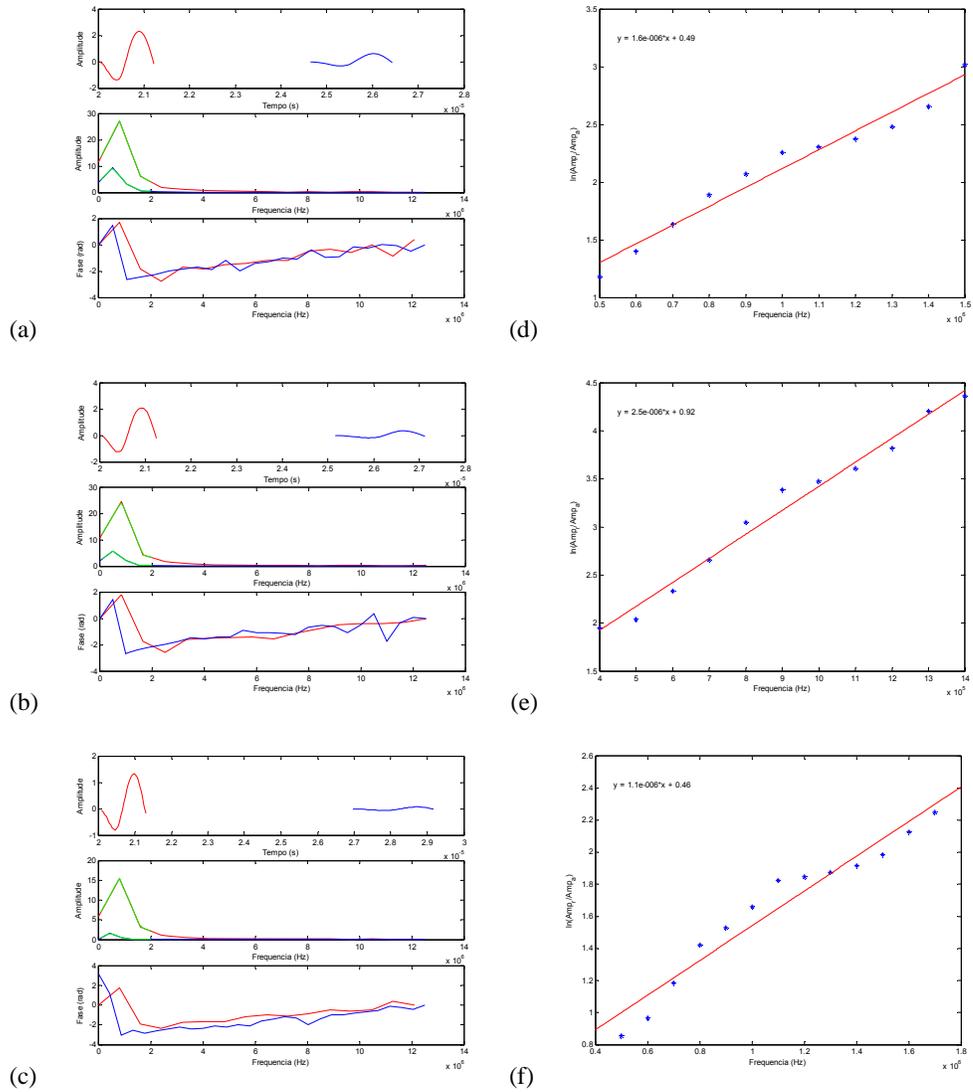


Figura 4.49 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda P da amostra ZP-28(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000 e 5000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda P da amostra ZP-28 a 2000, 3000 e 5000 psi, com seus respectivos valores 2,5e-06, 1,6e-06 e 1,1e-06

Onda S

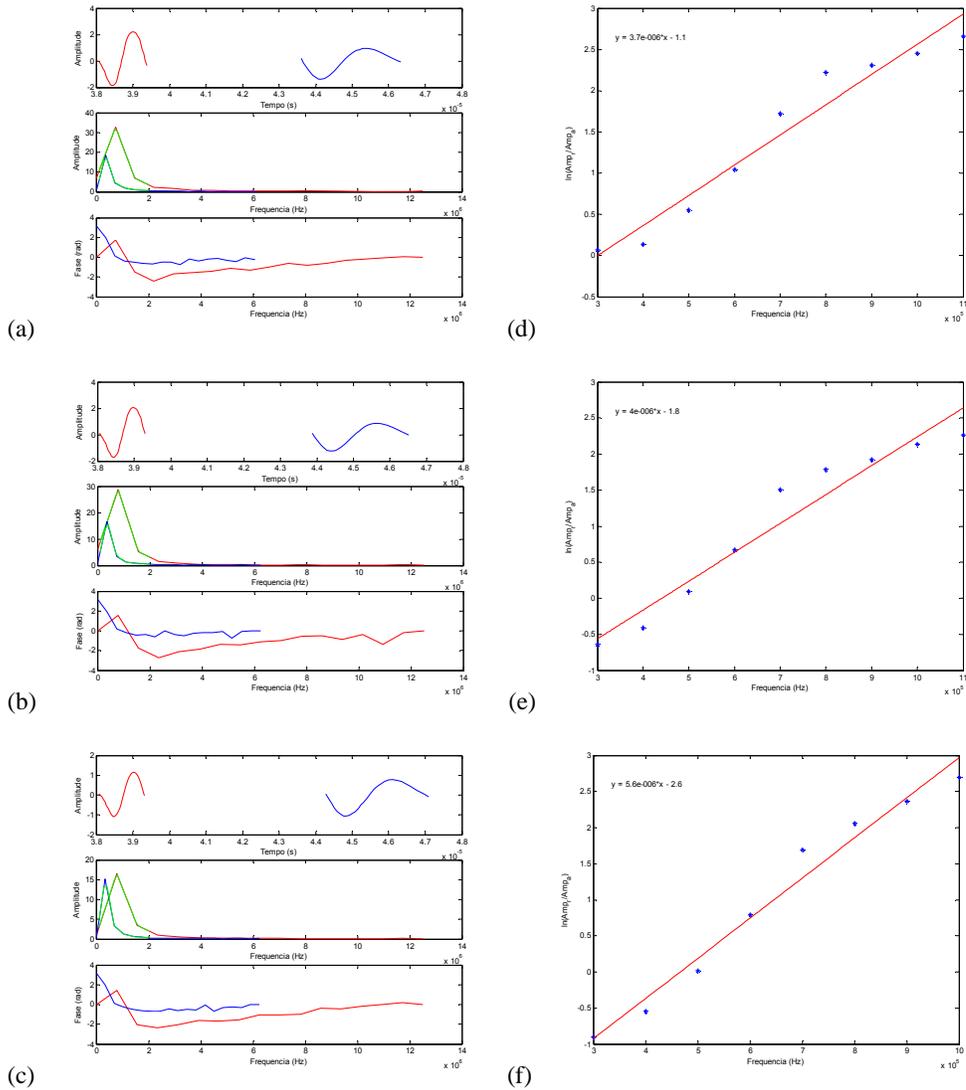
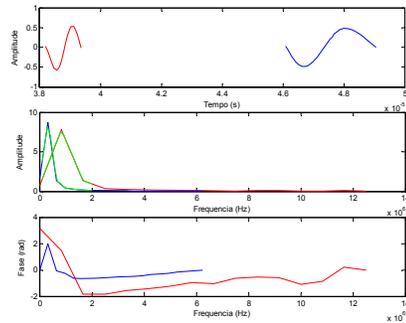
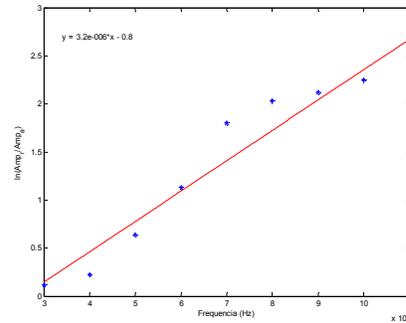


Figura 4.50 – As figuras (a), (b) e (c) representam respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-28(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 2000, 3000, 4000psi. As figuras (d), (e) e (f) determinam o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-28 a 2000, 3000 4000 psi, com seus respectivos valores $5,6e-06$, $4e-06$, $3,7e-06$ e $3,2e-06$.



(d)



(b)

Figura 4.51 – A figura (a) representa respectivamente os trechos selecionados e espectros de amplitude e de fase para a onda S da amostra ZP-28(em vermelho) e da amostra de referência (em azul), para as pressões de 5000psi. A figura (b) determina o coeficiente angular descrito na equação (2.20) para a onda S da amostra ZP-28 a 5000psi, com o valor $3,2e-06$.

Tabela 4.1 – Coeficientes de atenuação, onde utilizamos para seu calculo a frequência de corte, e fator Q para as ondas P e S das amostras da primeira campanha de ensaios.

ZAF-19				
psi	α_P (m ⁻¹)	α_S (m ⁻¹)	Q _P	Q _S
1000	84,7		8,2	
2000	55,6	61,2	13,7	15,7
3000	25,5	41,7	28,7	25,0
4000	26,4	33,4	25,6	30,7
5000	21,1	28,6	31,5	37,5
ZP-05				
psi	α_P (m ⁻¹)	α_S (m ⁻¹)	Q _P	Q _S
1000	69,3		10,9	
2000	61,8	33,2	13,1	27,8
3000	47,4	31,5	18,1	28,5
4000	40,3	43,6	20,6	23,1
5000	28,2	34,1	24,7	29,2
ZF-01				
psi	α_P (m ⁻¹)	α_S (m ⁻¹)	Q _P	Q _S
1000				
2000	35,6	30,4	21,8	32,1
3000	23,5	15,7	29,4	46,2
4000	20,3	16,5	33,8	51,1
5000	20,7	15,7	32,9	45,9
ZF-10				
psi	α_P (m ⁻¹)	α_S (m ⁻¹)	Q _P	Q _S
1000				
2000	35,5	92,4	32,4	14,8
3000	37,8	72,8	28,6	18,6
4000	23,1	61,2	46,7	27,3
5000	19,2	36,4	52,6	36,4
ZF-17				
psi	α_P (m ⁻¹)	α_S (m ⁻¹)	Q _P	Q _S
1000				
2000	53,2	242,1	12,1	16,1
3000	48,9	94,6	13,0	26,0
4000	36,2	102,2	17,4	32,5
5000	35,9	136,2	18,1	28,9
ZF-22				
psi	α_P (m ⁻¹)	α_S (m ⁻¹)	Q _P	Q _S
1000				
2000	38,5	68,6	28,4	24,9
3000	29,9	77,4	36,2	22,0
4000	26,2	65,1	38,8	26,0
5000	20,9	39,4	51,1	34,1
ZF-13				
psi	α_P (m ⁻¹)	α_S (m ⁻¹)	Q _P	Q _S
1000	74,3		10,2	
2000	31,6	48,1	19,0	20,6
3000	21,0	52,3	30,8	18,4
4000	15,9	50,7	39,7	19,7
5000	12,4	41,8	50,3	22,4
ZP-28				
psi	α_P (m ⁻¹)	α_S (m ⁻¹)	Q _P	Q _S
1000				
2000	53,9	87,2	17,5	12,2
3000	38,3	67,1	23,6	15,6
4000		62,1		16,5
5000	29,0	53,7	32,7	18,8

CAPÍTULO V - ANÁLISES DOS RESULTADOS

Na primeira campanha de ensaios as velocidades medidas foram, em todas as amostras, compatíveis com tipo de rocha estudada, conforme relatado na literatura (Bourbié *et al.*, 1987; Mavko *et al.*, 2003).

A Figura 5.1 apresenta as velocidades de propagação da onda P medidas em função da pressão confinante para todas as amostras de rocha analisadas na primeira campanha de ensaios. Desta Figura vê-se que as amostras de arenito mal selecionado (ZF-13, ZAF-19, ZP-05 e ZP-28), por apresentarem um maior grau de heterogeneidade, exibem diferentes níveis de velocidade. Nota-se uma tendência, nas amostras de arenito com maior participação de finos na sua composição (ZP-28 e ZP-05), de apresentarem velocidades mais baixas em relação àquelas amostras de arenito com composição mais grosseira (ZF-13 e ZAF-19). Observa-se também na Figura 5.1 uma separação importante, em termos de velocidade da onda P, entre as amostras de folhelho imaturo (ZF-10 e ZF-22) e as amostras de folhelho supermaturo (ZF-01 e ZF-17), de acordo com a classificação apresentada por Guimarães (2004). O folhelho imaturo apresenta velocidades de onda P muito inferiores em relação ao folhelho supermaturo. Esse comportamento é interpretado por Guimarães (2004) como sendo consequência da maior participação de matéria orgânica jovem na composição dos folhelhos imaturos.

A Figura 5.2 apresenta as velocidades de propagação da onda S medidas em função da pressão confinante para todas as amostras da primeira campanha de ensaios. Observa-se um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 5.1, com amostras de um mesmo tipo de rocha apresentando velocidades diferenciadas em relação às demais espécies. No caso dos folhelhos, observa-se uma separação muito clara entre os folhelhos imaturos e supermaturos.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam os resultados da extração dos atributos de atenuação das ondas P e S, respectivamente, como função da pressão confinante, para todas as amostras analisadas na primeira campanha de ensaios. Para a pressão de 1000 psi quase sempre não foi possível extrair, de forma confiável, os atributos de atenuação devido a uma relação sinal/ruído desfavorável. De modo geral os valores de fator Q, tanto para onda P quanto para onda S, crescem com o aumento da pressão confinante. Esse comportamento é esperado, uma vez que o aumento da

pressão confinante impõe uma maior rigidez às amostras, aproximando os contatos entre os grãos das amostras, o que resulta numa menor atenuação das ondas. Os valores de fator Q medidos neste trabalho são da mesma ordem de grandeza daqueles relatados por Toksöz et al. (1979a).

É interessante observar da Figura 5.3 que as amostras de folhelho imaturo apresentam um alto fator Q, indicando uma pequena atenuação da onda P em relação às demais rochas. O senso comum indicaria o contrário: rochas que apresentam velocidades mais baixas são consideradas como rochas mais friáveis, com maior tendência para amortecer o movimento ondulatório, portanto se esperaria dessas rochas um fator Q pequeno. Este resultado ilustra o quanto a velocidade e a atenuação são propriedades independentes do fenômeno de propagação de ondas elásticas no meio geológico. No caso do fator Q da onda S (Figura 5.4) esse fenômeno não se observa com a mesma intensidade.

As Figuras 5.5 e 5.6 indicam um comportamento distinto, em termos do fator Q das ondas P e S, entre as amostras de folhelho imaturo e supermaturo. A Figura 5.5 apresenta valores medidos de fator Q da onda P (linha cheia) e da onda S (tracejado) para as amostras de folhelho imaturo. Já a Figura 5.6 apresenta os mesmos dados para as amostras de folhelho supermaturo. Enquanto que nas amostras de folhelho imaturo $Q_P > Q_S$, para o folhelho supermaturo $Q_S > Q_P$. Uma vez que o folhelho imaturo é uma rocha rica em matéria orgânica ainda preservada, sem perda significativa de fluidos, e o folhelho supermaturo é uma rocha já submetida a condições de alta temperatura, com perda considerável de fluidos, este resultado parece indicar uma correspondência com os resultados apresentados por Winkler & Nur (1979) que concluíram que para amostras totalmente saturadas $Q_P > Q_S$, enquanto que em amostras parcialmente saturadas $Q_S > Q_P$. Nas amostras de arenito mal selecionado não se observou um comportamento uniforme: duas amostras (ZF-13 e ZP-28) apresentaram $Q_P > Q_S$ e outras duas amostras (ZAF-19 e ZP-05) exibiram $Q_S > Q_P$.

Esta constatação sugere um novo método para distinção entre folhelho gerador (imaturo) e selante (maturo): observar a razão entre o fator de qualidade das ondas P e S. Obviamente, para a consolidação desse método a massa de dados precisa ser adensada em trabalhos futuros.

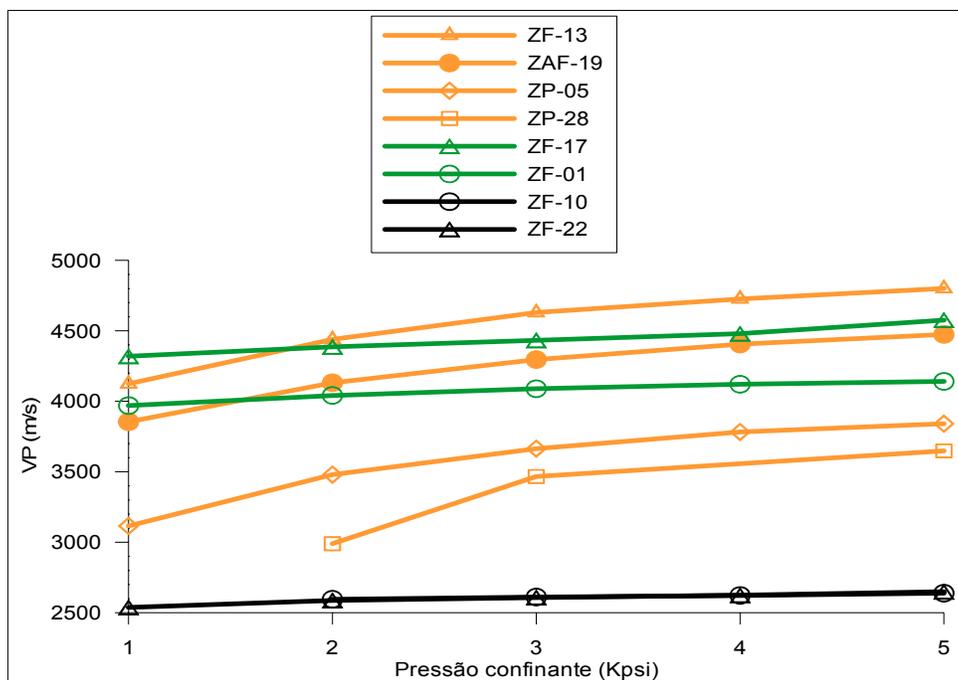


Figura 5.1 – Velocidade da onda P em função da pressão confinante para todas as amostras. A cor laranja indica amostras de arenito mal selecionado, a cor verde folhelhos supermaturos e a cor preta folhelhos imaturos.

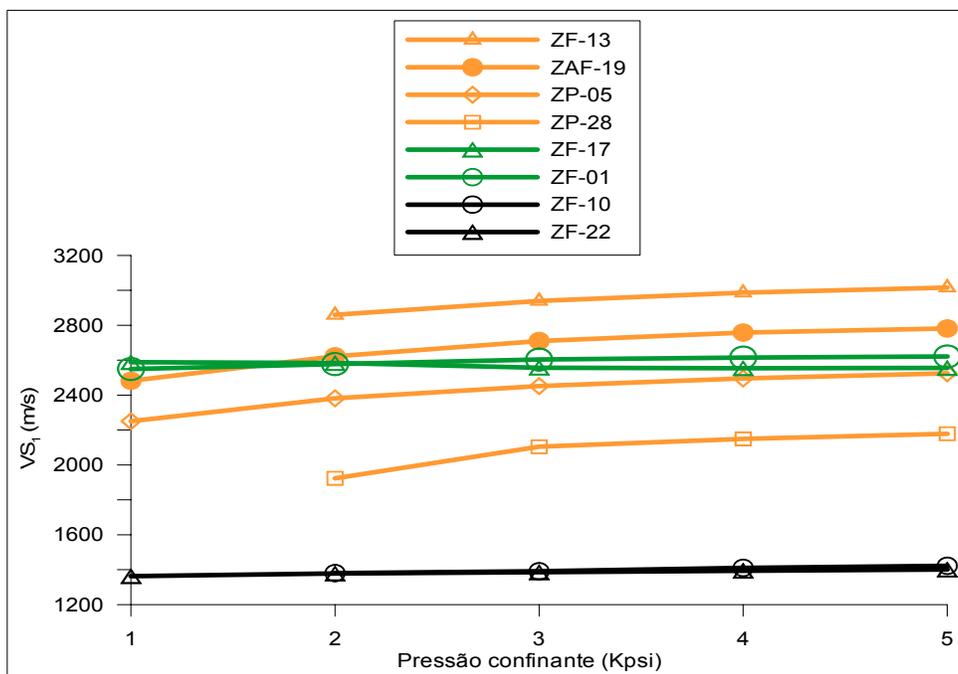


Figura 5.2 – Velocidade da onda S em função da pressão confinante para todas as amostras. As amostras indicadas com símbolos de cor laranja são de arenito mal selecionado, as amostras com símbolos na cor verde são de folhelhos supermaturos e as representadas por símbolos pretos são de folhelhos imaturos.

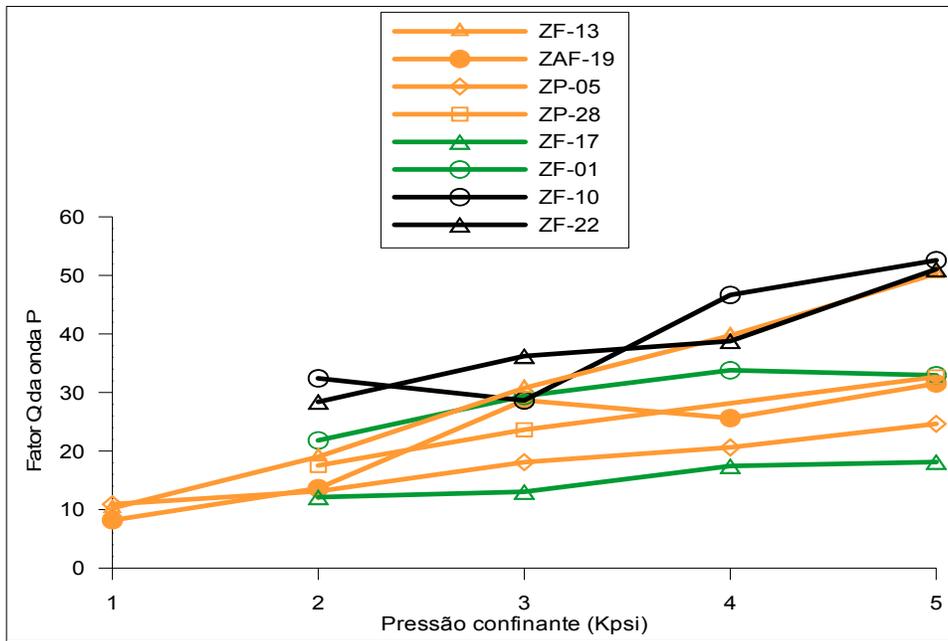


Figura 5.3 – Fator de qualidade Q da onda P em função da pressão confinante para todas as amostras. A cor laranja indica amostras de arenito mal selecionado, a cor verde folhelhos supermaturos e a cor preta folhelhos imaturos.

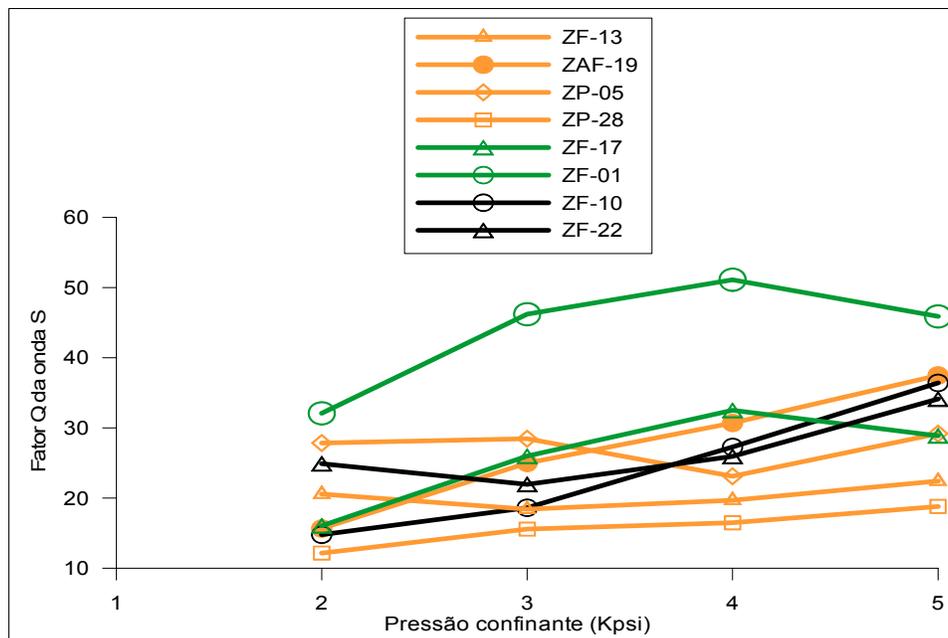


Figura 5.4 – Fator de qualidade Q da onda S em função da pressão confinante para todas as amostras. A cor laranja indica amostras de arenito mal selecionado, a cor verde folhelhos supermaturos e a cor preta folhelhos imaturos.

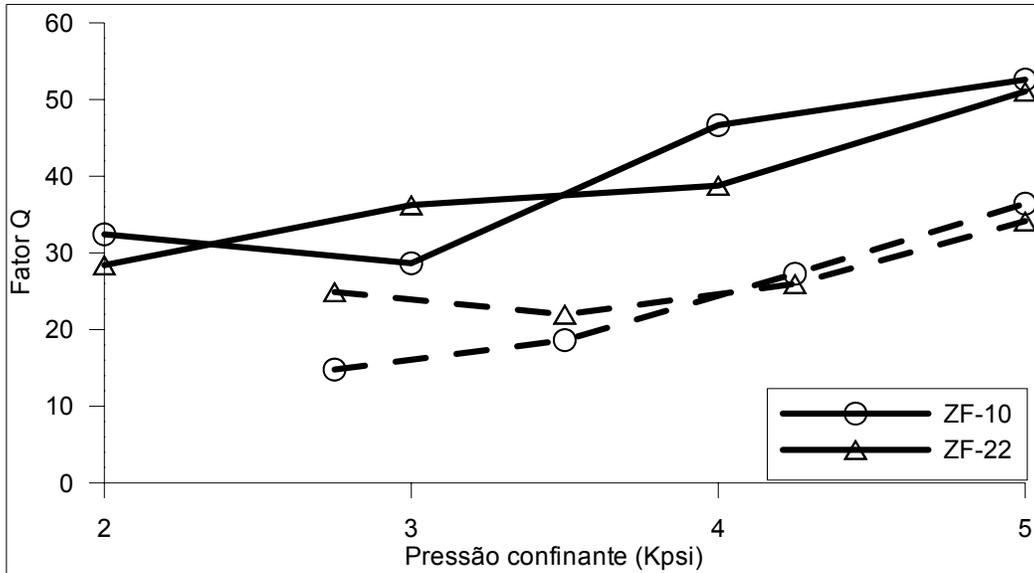


Figura 5.5 – Fator Q da onda P (linha cheia) e da onda S (tracejado) para as amostras de folhelho imaturo.

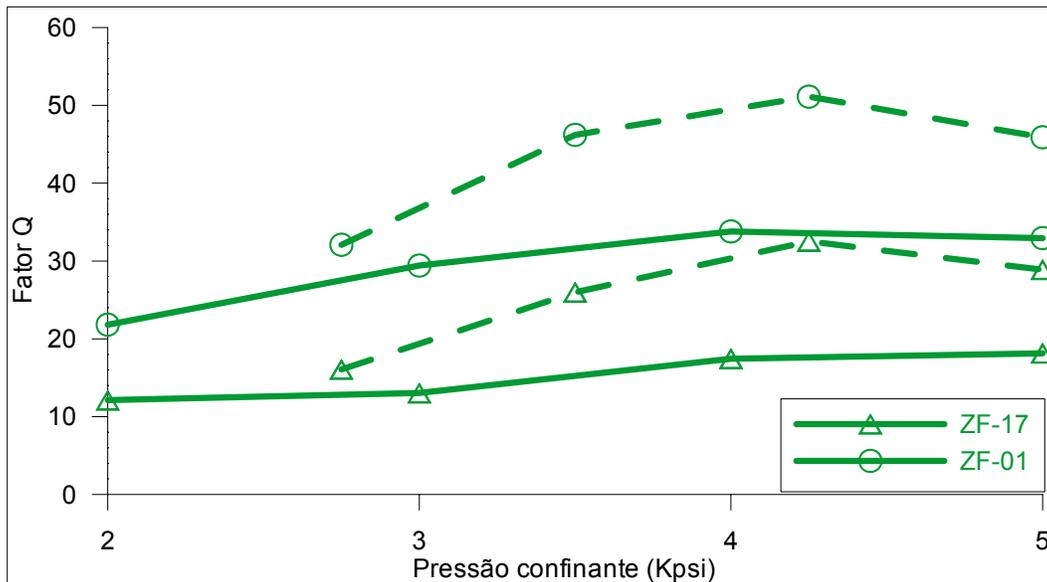


Figura 5.6 – Fator Q da onda P (linha cheia) e da onda S (tracejado) para as amostras de folhelho supermaturo.

CAPÍTULO VI- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O procedimento adotado para extração dos atributos de atenuação se mostrou eficiente, na primeira campanha de ensaios, no sentido de fornecer valores compatíveis de fator Q com os apresentados na literatura. As medições das ondas P e S nas amostras de rocha e de referência foram todas realizadas com uma só configuração do equipamento: mesma potência do sinal de entrada, mesma amplificação do sinal de saída, uso dos mesmos filtros de frequência. Essa configuração constante permite medições mais rápidas e confiáveis, no entanto, nos níveis mais baixos de pressão confinante a razão sinal/ruído pode tornar-se desfavorável. Esta é a causa para a ausência dos atributos de atenuação nos níveis mais baixos de pressão confinante, especialmente no caso da onda S.

Problemas de registro das formas de onda nos ensaios da segunda campanha de medição reduzem drasticamente a confiança nos seus resultados, de modo que as conclusões desta dissertação são relativas apenas aos ensaios da primeira campanha de medição.

Neste trabalho foi desenvolvido um programa, em linguagem Matlab®, para extração dos atributos de atenuação de ondas. Tal programa se mostrou eficiente e adequado para as análises laboratoriais realizadas no âmbito desta pesquisa, embora também possa ser utilizado, com pequenos ajustes, para a extração de atributos de atenuação de ondas registradas em situações diversas, tais como aquelas registradas por perfis sônicos em poços.

Com relação às velocidades da onda P, as amostras de arenito mal selecionado, por apresentarem um maior grau de heterogeneidade, exibem níveis variados de velocidade. Há uma tendência de diminuição das velocidades com o aumento da participação de finos na composição das amostras de arenito. O folhelho imaturo apresenta velocidades de onda P muito inferiores em relação ao folhelho supermaturo. Quanto à onda S, observa-se um comportamento semelhante ao apresentado pela onda P, com amostras de um mesmo tipo de rocha apresentando velocidades diferenciadas em relação às demais espécies. No caso dos folhelhos, observa-se uma separação muito clara, em termos de velocidade das ondas P e S, entre os folhelhos imaturos e supermaturos.

O fator Q das ondas P e S tende a aumentar com o aumento da pressão confinante. As amostras de folhelho imaturo apresentam baixas velocidades e altos valores para o fator Q, especialmente no caso da onda P. Em termos do fator Q das ondas P e S, os folhelhos imaturos e supermaturos apresentam comportamentos díspares. Enquanto $Q_P > Q_S$ nos folhelhos imaturos, relação inversa ocorre nos folhelhos supermaturos. Isto sugere um potencial método para distinção entre folhelhos geradores e selantes.

Recomenda-se como trabalho futuro adensar os dados desta pesquisa com a realização de ensaios para extração de atributos de atenuação em mais amostras de rochas sedimentares, incluindo novos litotipos como rochas carbonáticas e evaporíticas. Com advento do pré-sal na costa leste brasileira a extração de atributos de atenuação nestes litotipos torna-se uma necessidade premente. Desenvolver técnicas de extração desses atributos em dados de campo, como dados sísmicos e perfis geofísicos de poços, é uma necessidade para aumentar a representatividade areal desses atributos. Uma linha complementar de pesquisa é a investigação do efeito da saturação fluida sobre os atributos de atenuação de tais litotipos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATZLE, M. L., HAN, D., CASTAGNA, J. P.. Attenuation and velocity dispersion at seismic frequencies, 66 ANNUAL INTERNATIONAL SEG MEETING, Denver, 1996.
- BOURBIÉ, T.; COUSSY, O.; ZINSZNER, B. (1987). Acoustics of porous media. Éditions Technip.
- BRENNAN, B.J., STACEY, F. D.. Frequency dependence of elasticity of rock - Test of seismic velocity dispersion, Nature, v.268, p220-222, 1977.
- FUTTERMAN, W.L. (1962). Dispersive body waves. Journal of Geophysical Research, v. 67, p. 5279-5291.
- GARDNER, G.H.F.; WYLLIE, M.R.J.; DROSCAK, D.M. (1964). Effects of pressure and fluid saturation on the attenuation of elastic waves in sands. Journal of Petroleum Technology, v. 16, p. 189-198.
- GARDNER, G.H.F.; WYLLIE, M.R.J.; DROSCAK, D.M. (1964). Effects of pressure and fluid saturation on the attenuation of elastic waves in sands. Journal of Petroleum Technology, v. 16, p. 189-198.
- GORDON, R. B., DAVIS, L. A.. Velocity and attenuation of seismic waves in imperfectly elastic rock, Journal of Geophysical Research, v.73, p.3917-3935, 1968.
- GUIMARÃES, Margareth da Silva Brasil (2004).Análise Integrada de Propriedades Petrofísicas, Petrográficas e Geoquímicas de Folhelhos.Instituto de Geociências-UFRJ p 142-152.
- HAMILTON, E. L.. Compressional-wave attenuation in marine sediments, Geophysics, v.37, p.620-646, 1972.
- KJARTANSSON, E. (1979). Constant Q-wave propagation and attenuation. Journal of Geophysical Research, v. 84, p. 4737-4748

- MAVKO, G.; MUKERJI, T.; DVORKIN, J. (2003). The rock physics handbook. Tools for seismic analysis in porous media. Cambridge University Press.
- McKAVANAGH, B., STACEY, F. D.. Mechanical hysteresis in rocks at low strain amplitudes and seismic frequencies, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v.8, p246-250, 1974.
- PESELNICK, L.; ZIETZ, I. (1959). Internal friction of fine grained limestone at ultrasonic frequencies. *Geophysics*, v. 24, p. 285-296.
- PESELNICK, L., OUTERBRIDGE, W. F.. Internal friction in shear and shear modulus of Solenhofen limestone over a frequency range of 10 cycles per seconds, *Journal of Geophysical Research*, v.66, p. 581-588, 1961.
- O'CONNELL, R. J., BUDIANSKY, B.. Measures of dissipation in viscoelastic media, *Geophysical Research Letters*, v.5,,p.5-8, 1978.
- SILVA, F.B.; ROSA, A.L.R.; VARELA, C.L.; DAMASCENO, R.D.; VASQUEZ, A.C.R.; OLIVEIRA, R. (1997). Estimativa do fator Q em águas profundas: implicações nos parâmetros de aquisição. 5º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo.
- SPENCER Jr., J. W., CATES, M. E., THOMPSON, D. D.. Frame moduli of unconsolidated sands and sandstones, *Geophysics*, v.59, p.1352-1361, 1994.
- TOKSÖZ, M.N; JOHNSTON, D.H.; TIMUR, A. (1979). Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements. *Geophysics*, v. 44, p. 681-690.
- Toksoz, M.N.; Johnston, D.H. (Eds).(1981) *Seismic Wave Attenuation*. Society of Exploration Geophysicists. *Geophysics Reprint Series*, Nº 2.
- TRUELL, R.; OATES, W. (1963). Effect of lack of parallelism of sample faces on the measurement of ultrasonic attenuation. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.35, p.1382-1386.

TRUELL, R.; ELBAUM, C.; CHICK, B.B. (1969). Ultrasonic methods in solid state physics. Academic Press, New York.

VASQUEZ, G.F. (2000). Comportamento viscoelástico do arenito Namorado e suas relações com atributos faciológicos. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp.p.2-25.

WINKLER, K.; NUR, A. (1979). Pore fluids and seismic attenuation in rocks. Geophysical Research Letters, Vol. 6, p. 1-4.

WYLLIE, R. J., GARDNER, G. H. F., GREGORY, A. R.. Studies of elastic wave attenuation in porous media, Geophysics, v.27, p.569-589, 1962

WINKLER, K., NUR, A., GLADWIN, M.. Friction and seismic attenuation in rocks, Nature, v.277, p.528-531, 1979.

ANEXO I

Programa Matlab para extração de atributos de atenuação

A fim de extrair os atributos de atenuação das ondas registradas nos ensaios laboratoriais, foi desenvolvido o programa em linguagem Matlab contido no anexo I:

```
%FFT da amostra de referencia
load -ascii alum4175p.dat;
datar=alum4175p(82:131,2);
dtr=2e-07;
nsampler=length(datar);
spectrumr=fft(datar);
scr=.5/dtr;
dsr=2*scr/nsampler;
sindexr=[0:dsr:scr];
ampr=abs(spectrumr(1:length(sindexr)));
phaser=angle(spectrumr(1:length(sindexr)));

%FFT da amostra de rocha
load -ascii zf04_p.dat;
data=zf04_p(64:133,2);
dt=2e-07;
nsample=length(data);
spectrum=fft(data);
sc=.5/dt;
ds=2*sc/nsample;
sindex=[0:ds:sc];
amp=abs(spectrum(1:length(sindex)));
phase=angle(spectrum(1:length(sindex)));

% Dados para determinação do coeficiente de atenuação
xampr=transp(sindexr);
fitampr=fit(xampr,ampr,'linearinterp');

xamp=transp(sindex);
fitamp=fit(xamp,amp,'linearinterp');

df=1e004;
for i=1:20,
    yraz(i)=i.*df;
    raz(i)=log(fitampr(yraz(i))./fitamp(yraz(i)));
end

%Saídas gráficas
subplot(3,1,1)
plot(alum4175p(82:131,1),datar,'r')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Amplitude')
hold on
subplot(3,1,2)
plot(sindexr,ampr(:,1),'r',yraz(:),fitampr(yraz(:)),'g')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Amplitude')
hold on
subplot(3,1,3)
```

```

plot(sindexr(:),phaser(:),'r')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Fase (radian)')
hold on
subplot(3,1,1)
plot(zf04_p(64:133,1),data,'b')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Amplitude')
subplot(3,1,2)
plot(sindex(:),amp(:),'b',yraz(:),fitamp(yraz(:)),'g')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Amplitude')
subplot(3,1,3)
plot(sindex(:),phase(:),'b')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Fase (rad)')
figure
plot(yraz(7:15),raz(7:15),'b*')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('ln(Amp_r/Amp_a)')

```

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)