

Louis Dostoievsky Gomes Tabosa

**Atenuação Elástica das  
Rochas da Bacia do Rio do Peixe**

**Campina Grande**

**Abril, 2016**

Louis Dostoievsky Gomes Tabosa

## **Atenuação Elástica das Rochas da Bacia do Rio do Peixe**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande, como parte obrigatória para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN  
Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral

Orientador: Prof. Dr. José Agnelo Soares

Campina Grande

Abril, 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

T114a      Tabosa, Louis Dostoievsky Gomes.  
              Atenuação elástica das rochas Bacia do Rio do Peixe / Louis  
              Dostoievsky Gomes Tabosa. – Campina Grande, 2016.  
              105 f. : il. color.

              Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) –  
              Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e  
              Recursos Naturais, 2016.  
              "Orientação: Prof. Dr. José Agnelo Soares.  
              Referências.

              1. Petrofísica.    2. Atenuação.    3. Bacia do Rio do Peixe.  
              I. Soares, José Agnelo.    II. Título.

CDU 624.131.1(043)

Louis Dostoievsky Gomes Tabosa

## **Atenuação Elástica das Rochas da Bacia do Rio do Peixe**


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande, como parte obrigatória para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Campina Grande, 04 de abril de 2016:



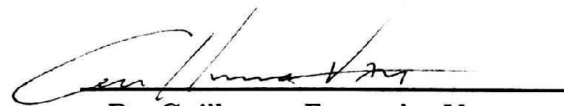
---

**Prof. Dr. José Agnelo Soares**  
Orientador



---

**Prof. Dr. Francisco César Nogueira**  
Examinador



---

**Dr. Guilherme Fernandes Vasquez**  
Examinador Externo (CENPES/PETROBRAS)

Campina Grande  
Abril, 2016

# Agradecimentos

Aos meus pais, Mozart e Penha, por toda a dedicação e apoio aos longo dos anos.

Ao orientador José Agnelo Soares, que tanto contribuiu em minha formação acadêmica/pessoal/profissional e que pelo qual tenho imenso respeito.

À Karina Fischer, pelo carinho e compreensão.

Aos amigos do LabPetro UFCG, que tornam o ambiente de trabalho ainda mais divertido.

Ao prof. Dr. Francisco César Nogueira, pela discussão dos mais variados aspectos da geologia da Bacia do Rio do Peixe.

Ao prof. Dr. Jadsom Figueiredo (UFPA), pela contribuição na implementação do método do deslocamento de frequência.

Aos geofísicos do Laboratório de Física de Rochas (CENPES/PETROBRAS), Guilherme Vasquez, Márcio Morschbacher e Julio Justen, por compartilharem seus conhecimentos sobre petrofísica e atenuação elástica.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, pela competência e disponibilidade em discutir ideias.

À CAPES, pelo auxílio financeiro no início desta pesquisa.

Ao convênio PETROBRAS/UFCG TC 0050.0057323.10.9 pelo financiamento da pesquisa.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado.

*"O primeiro gole do copo das ciências naturais te tornará um ateu.  
Mas, no fundo do copo, Deus está esperando por ti."  
(Werner Heisenberg)*

# Resumo

TABOSA, Louis Dostoievsky Gomes. *Atenuação Elástica das Rochas da Bacia do Rio do Peixe*. Campina Grande, 2016. 105p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Universidade Federal de Campina Grande.

Neste trabalho são obtidas e analisadas propriedades petrofísicas e elásticas de amostras de rochas oriundas da Bacia do Rio do Peixe, através de ensaios laboratoriais e computacionais, obtendo-se informações sobre a densidade de grãos, a porosidade, a permeabilidade, as velocidades de propagação e os atributos de atenuação de ondas elásticas, estabelecendo-se correlações entre o comportamento viscoelástico e as propriedades faciológicas para aquela Bacia. Compara-se, também, duas diferentes aproximações, no domínio da frequência, para a determinação do fator de qualidade  $Q$  (o qual corresponde a uma descrição quantitativa que sintetiza os complexos processos associados à atenuação): a razão espectral e o deslocamento de frequência. As análises mostram boa correlação das velocidades elásticas com a porosidade e a densidade, resultado da cimentação carbonática, amplamente presente em muitas áreas da Bacia. Já os fatores de qualidade obtidos não correlacionam-se fortemente, de modo fundamentado, às outras propriedades medidas, sendo mais influenciados pelas estruturas tectônicas presentes. Em geral observa-se um comportamento viscoelástico particular, atribuído à complexidade estrutural e diagenética da Bacia.

**Palavras-chave:** Atenuação. Petrofísica. Bacia do Rio do Peixe.

# Abstract

TABOSA, Louis Dostoievsky Gomes. *Elastic Attenuation of Rocks from Rio do Peixe Basin*. Campina Grande, 2016. 104p. Master' Thesis - Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Universidade Federal de Campina Grande.

In this work petrophysical and elastic properties of rocks from the Rio do Peixe Basin - Brazil - were obtained and analyzed through laboratory and computational assays, providing information about grain density, porosity, permeability, velocity and attenuation attributes from elastic waves. Correlations were established between the viscoelastic behavior and the facies units. Moreover, two different methods to determine the quality factor  $Q$  (which corresponds to a quantitative description of complex processes associated to wave attenuation) in the frequency domain were compared: the spectral ratio and the frequency shift methods. The analysis shows good correlation of the elastic velocities with porosity and, also, with the density, which results from carbonatic cementation, extensively present in the Basin. The quality factors does not correlate strongly with other measured properties. Those are more affected by tectonic structures. In general, a particular viscoelastic behavior is observed, which is attributed to the diagenetic and structural complexity of the Basin.

**Keywords:** Attenuation. Petrophysics. Rio do Peixe Basin.



# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Localização das bacias interiores do Nordeste do Brasil, representadas pelas bacias de Araripe (BA), Rio do Peixe (BRP), Iguatú (BI), Nazaré (BN) e Icozinho (BIc). As bacias da margem equatorial também estão indicadas, através das bacias Potiguar (BP) e Paraíba (BPB) (SANTIAGO, 2015). | 2  |
| Figura 2 – Mapa de localização das sub-bacias de Brejo das Freiras (SBBF), Sousa (SBS) e Pombal (SBP). Neste mapa são indicados os principais traços estruturais na bacia.   | 3  |
| Figura 3 – Carta estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe (modificado de Nogueira <i>et al.</i> (2015)). Períodos: Barremiano (Brm), Hauteriviano (Hau), Valangiano (Vlg) e Berriasiano (Ber).  | 4  |
| Figura 4 – Deformações elásticas e movimento das partículas associadas à passagem das ondas de corpo. (a) - Ondas compressonais e (b) Ondas cisalhantes (KEAREY <i>et al.</i> , 2002).   | 7  |
| Figura 5 – Relações entre tensão e deformação para os diferentes módulos elásticos: (a) Módulo de Young E; (b) Módulo Volumétrico K; (c) Módulo de Rigidez $\mu$ e; (d) Módulo Axial $\psi$ (KEAREY <i>et al.</i> , 2002).   | 8  |
| Figura 6 – Efeito da heterogeneidade sobre a amplitude das ondas elásticas (ZINSZNER; PELLERIN, 2007).   | 9  |
| Figura 7 – Esquema do sistema de medidas de porosidade.  | 21 |
| Figura 8 – Esquema do sistema de medidas de permeabilidade (modificado de VASQUEZ, 2000.)  | 22 |
| Figura 9 – Esquema para medições das velocidades de propagação de ondas elásticas (MORSCHBACHER <i>et al.</i> , 2010).   | 23 |
| Figura 10 – Determinação do tempo de propagação da onda elástica na amostra.   | 24 |
| Figura 11 – Exemplo das formas de onda e seus respectivos espectros no domínio da frequência, utilizadas para a estimativa de Q  | 25 |
| Figura 12 – Exemplo da obtenção do termo $(\gamma_2 - \gamma_1)l$ .  | 26 |
| Figura 13 – (a) Representação esquemática do ensaio sem amostra e com amostra. (b) Sinal obtido da propagação no sistema sem amostra (superior) e com amostra (inferior). (c) Os correspondentes espectros no domínio da frequência (modificado de Figueiredo <i>et al.</i> (2013)).                     | 27 |
| Figura 14 – Tela inicial do software desenvolvido para a estimativa do fator Q.  | 28 |
| Figura 15 – Captura de tela do software após a estimativa do fator Q para a amostra de rocha F9.   | 29 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 16 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A43. . . . . | 31 |
| Figura 17 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade Q, obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A43. . . . .                               | 31 |
| Figura 18 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A73. . . . . | 32 |
| Figura 19 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade Q, obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A73. . . . .                               | 33 |
| Figura 20 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F23. . . . . | 34 |
| Figura 21 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade Q, obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F23. . . . .                               | 35 |
| Figura 22 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F25. . . . . | 35 |
| Figura 23 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade Q, obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F25. . . . .                               | 36 |
| Figura 24 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A2. . . . .  | 41 |
| Figura 25 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade Q, obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A2. . . . .                                | 41 |
| Figura 26 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A6. . . . .  | 42 |
| Figura 27 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade Q, obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A6. . . . .                                | 43 |
| Figura 28 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F7. . . . .  | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 29 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F7. . . . .                                     | 44 |
| Figura 30 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F9. . . . .  | 44 |
| Figura 31 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F9. . . . .                                     | 45 |
| Figura 32 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A85. . . . . | 46 |
| Figura 33 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A85. . . . .                                    | 46 |
| Figura 34 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A86. . . . . | 47 |
| Figura 35 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A86. . . . .                                    | 47 |
| Figura 36 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F34. . . . . | 48 |
| Figura 37 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F34. . . . .                                    | 49 |
| Figura 38 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F35. . . . . | 49 |
| Figura 39 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F35. . . . .                                    | 50 |
| Figura 40 – Fator de Qualidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo P. . . . .  | 52 |
| Figura 41 – Fator de Qualidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo S1. . . . .   | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 42 – Fator de Qualidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo S2. . . . .                            | 53 |
| Figura 43 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade, para as ondas compressoriais, obtidos através dos diferentes métodos. . . . .  | 55 |
| Figura 44 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade, para as ondas cisalhantes (a) S1 e (b) S2 , obtidos através dos diferentes métodos. . .  | 55 |
| Figura 45 – Relação entre $V_P$ e a porosidade para as amostras da BRP. . . . .  | 56 |
| Figura 46 – Relação entre a velocidade de propagação das ondas cisalhantes e a porosidade para as amostras da BRP( a) $V_{S1}$ e b) $V_{S2}$ ). . . . .  | 57 |
| Figura 47 – Relação entre Fator de Qualidade e Porosidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo P. . . . .  | 58 |
| Figura 48 – Relação entre Fator de Qualidade e Porosidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo S1. . . . . | 59 |
| Figura 49 – Relação entre Fator de Qualidade e Porosidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo S2. . . . . | 59 |
| Figura 50 – Relação entre o Módulo de Incompressibilidade ( <i>Bulk modulus</i> ) e a Porosidade. . . . .  | 60 |
| Figura 51 – Densidades de grão medidas para as amostras da BRP. . . . .  | 61 |
| Figura 52 – Relação entre $V_P$ e densidade total para as amostras da BRP. . . . .   | 62 |
| Figura 53 – Relação entre o fator de qualidade $Q_P$ e a densidade total para as amostras da BRP. . . . .  | 63 |
| Figura 54 – Relação entre o fator de qualidade $Q_{S1}$ e a densidade total para as amostras da BRP. . . . .   | 63 |
| Figura 55 – Relação entre o fator de qualidade $Q_{S2}$ e a densidade total para as amostras da BRP. . . . .   | 64 |
| Figura 56 – Relação entre a velocidade de propagação cisalhante (S1) e compressional(P) para as amostras da BRP. . . . .   | 65 |
| Figura 57 – Relação entre as velocidades de propagação cisalhantes para as amostras da BRP. . . . .  | 67 |
| Figura 58 – Relação entre os fatores de qualidade (razão espectral) das ondas cisalhantes, para as amostras da BRP. . . . .  | 68 |
| Figura 59 – Relação entre a permeabilidade e a velocidade compressional $V_P$ para as amostras da BRP. . . . .   | 69 |
| Figura 60 – Relação entre a permeabilidade e as velocidades cisalhantes (a) $V_{S1}$ e (b) $V_{S2}$ para as amostras da BRP. . . . .   | 69 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 61 – Relação entre a permeabilidade e os fatores de qualidade compressional $Q_P$ para a (a)razão espectral e o (b)shift de frequência para as amostras da BRP. . . . .   | 70 |
| Figura 62 – Relação entre a permeabilidade e os fatores de qualidade cisalhante $Q_{S1}$ para a (a)razão espectral e o (b)shift de frequência para as amostras da BRP. . . . .   | 71 |
| Figura 63 – Relação entre a permeabilidade e os fatores de qualidade cisalhante $Q_{S2}$ para a (a)razão espectral e o (b)shift de frequência para as amostras da BRP. . . . .   | 71 |
| Figura 64 – Relação entre a permeabilidade e a porosidade para as amostras da BRP.   | 72 |
| Figura 65 – <i>Snapshot</i> e traços da onda P simulados para ângulos de $0^\circ$ , $15^\circ$ , $30^\circ$ e $45^\circ$ . A espessura e a separação das juntas é de 0,5mm e 3mm, respectivamente (DIAS <i>et al.</i> , 2014). . . . .                    | 74 |
| Figura 66 – <i>Snapshot</i> e traços da onda P simulados para ângulos de $60^\circ$ , $75^\circ$ e $90^\circ$ . A espessura e a separação das juntas é de 0,5mm e 3mm, respectivamente. Modificado de Dias <i>et al.</i> (2014). . . . .                   | 74 |
| Figura 67 – <i>Snapshot</i> e traços da onda P simulados para juntas de deformação separadas por 3mm, 3 - 6mm, e 6 - 12mm, respectivamente. A espessura é de 0,5mm com de $0^\circ$ de inclinação (DIAS <i>et al.</i> , 2014). . . . .                     | 75 |
| Figura 68 – <i>Snapshot</i> e traços da onda P simulados para juntas de deformação separadas por 3mm, 3 - 6mm e 6 - 12mm, respectivamente. A espessura é de 0,5mm com de $45^\circ$ de inclinação (DIAS <i>et al.</i> , 2014). . . . .                     | 76 |
| Figura 69 – <i>Snapshot</i> e traços da onda P simulados para juntas de deformação separadas por 3mm, 3 - 6mm e 6 - 12mm, repectivamente. A espessura é de 0,5mm com de $90^\circ$ de inclinação (DIAS <i>et al.</i> , 2014). . . . .                      | 76 |
| Figura 70 – <i>Snapshot</i> e traços da onda P simulados para juntas de deformação com espessura de 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm, respectivamente. A separação entre as juntas é de 3mm e 6mm com de $0^\circ$ de inclinação (DIAS <i>et al.</i> , 2014). . . . .  | 77 |
| Figura 71 – <i>Snapshot</i> e traços da onda P simulados para juntas de deformação com espessura de 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm, respectivamente. A separação entre as juntas é de 3mm e 6mm com de $45^\circ$ de inclinação (DIAS <i>et al.</i> , 2014). . . . . | 77 |
| Figura 72 – <i>Snapshot</i> e traços da onda P simulados para juntas de deformação com espessura de 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm, respectivamente. A separação entre as juntas é de 3mm e 6mm com de $90^\circ$ de inclinação (DIAS <i>et al.</i> , 2014). . . . . | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 73 – Equipamentos utilizados, presentes na sala de preparação de amostras do LabPetro UFCG. (a) Serra de bancada, (b) plugadeira de bancada e (c) retificador. . . . . | 88 |
| Figura 74 – Balança e paquímetro digitais utilizados para obter o peso e as dimensões de cada amostra. . . . .  | 88 |
| Figura 75 – Permoporosímetro presente no LabPetro UFCG. . . . .   | 89 |
| Figura 76 – Sistema Autolab500, presente no LabPetro UFCG. . . . .  | 89 |
| Figura 77 – Detalhe da câmara de pressão e do conjunto receptor-amostra-receptor, do sistema autolab500. . . . .  | 90 |

# Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Exemplos de valores de $Q$ para alguns sólidos e rochas, selecionados de Knopoff (1964). . . . .  | 13 |
| Tabela 2 – Medidas em laboratório para as amostras dos afloramentos da BRP (velocidades obtidas à pressão confinante de 40 MPa). . . . .                       | 37 |
| Tabela 3 – Medidas em laboratório para as amostras oriundas dos poços perfurados pela UFRJ (velocidades obtidas à pressão confinante de 40 MPa). . . . .       | 40 |
| Tabela 4 – Medidas em laboratório para as amostras oriundas do poço perfurado pelo LabPetro UFCG (velocidades obtidas à pressão confinante de 40 MPa). . . . . | 51 |
| Tabela 5 – Estimativa do Fator de Qualidade para as diferentes condições espaciais das juntas de deformação, pelo método da Razão Espectral. . . . .           | 79 |
| Tabela 6 – Módulos elásticos obtidos e Fatores de Qualidade estimados para as amostras da BRP (dados obtidas à pressão confinante de 40MPa). . . . .           | 91 |

# Lista de símbolos

|           |   |
|-----------|---|
| $V$       | Velocidade de propagação para uma onda de corpo |
| $V_P$     | V para o modo de propagação compressional       |
| $V_S$     | V para o modo de propagação cisalhante          |
| $K$       | Módulo de incompressibilidade                   |
| $G$       | Módulo de rigidez ou cisalhante                 |
| $\rho$    | Densidade                                       |
| $E$       | Módulo de Young                                 |
| $\psi$    | Módulo Axial                                    |
| $Q$       | Fator de Qualidade                              |
| $\alpha$  | Coefficiente de atenuação                       |
| $\delta$  | Decremento logarítmico                          |
| $f$       | Frequência                                      |
| $A$       | Amplitude                                       |
| $k$       | Número de onda                                  |
| $x$       | Distância percorrida por uma onda elástica      |
| $\omega$  | Frequência Angular                              |
| $t$       | Tempo   |
| $\lambda$ | Comprimento de onda                             |
| <b>E</b>  | Energia   |
| $W$       | Energia elástica armazenada em um período       |
| $\phi$    | Porosidade                                      |
| <b>V</b>  | Volume  |
| $C$       | Teor de argila                                  |



|            |   |
|------------|---|
| $\kappa$   | Permeabilidade                                      |
| $u$        | Velocidade do fluido                                |
| $q$        | Vazão   |
| $\eta$     | Viscosidade   |
| $P$        | Pressão   |
| $l$        | Comprimento da amostra                              |
| $\rho_g$   | Densidade do grão                                   |
| <b>G</b>   | Fator geométrico                                    |
| $\gamma$   | Constante de proporcionalidade entre $\alpha$ e $f$ |
| $\sigma^2$ | Variância   |

# Sumário

|          |  |             |
|----------|--|-------------|
|          | <b>Lista de Figuras</b> . . . . .                              | <b>viii</b> |
|          | <b>Lista de Tabelas</b> . . . . .                              | <b>xiv</b>  |
| <b>1</b> | <b>CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA</b> . . . . .                  | <b>1</b>    |
| 1.1      | Introdução . . . . .   | 1           |
| 1.2      | A Bacia do Rio do Peixe . . . . .                              | 2           |
| <b>2</b> | <b>PROPRIEDADES PETROFÍSICAS</b> . . . . .                     | <b>6</b>    |
| 2.1      | <b>Velocidades e Módulos Elásticos</b> . . . . .               | <b>6</b>    |
| 2.1.1    | Onda Sísmica . . . . .   | 6           |
| 2.1.2    | Velocidades de Propagação e Elasticidade . . . . .             | 6           |
| 2.2      | <b>Atenuação de Ondas Sísmicas</b> . . . . .                   | <b>8</b>    |
| 2.2.1    | Absorção Sísmica . . . . .                                     | 8           |
| 2.2.2    | Fator $Q$ . . . . .  | 11          |
| 2.3      | <b>Fatores que Afetam o Comportamento Sísmico</b> . . . . .    | <b>13</b>   |
| 2.3.1    | Porosidade . . . . .   | 13          |
| 2.3.2    | Litologia . . . . .  | 15          |
| 2.3.3    | Permeabilidade . . . . .                                       | 16          |
| 2.3.4    | Pressão . . . . .  | 17          |
| 2.3.5    | Frequência . . . . .   | 18          |
| 2.3.6    | Outros Fatores . . . . .                                       | 18          |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .                           | <b>19</b>   |
| 3.1      | <b>Amostras de Rochas da Bacia do Rio do Peixe</b> . . . . .   | <b>19</b>   |
| 3.1.1    | Preparação das Amostras . . . . .                              | 19          |
| 3.2      | <b>Métodos Laboratoriais</b> . . . . .                         | <b>20</b>   |
| 3.2.1    | Densidade de Grãos e Porosidade . . . . .                      | 20          |
| 3.2.2    | Permeabilidade . . . . .                                       | 21          |
| 3.2.3    | Velocidades de Propagação . . . . .                            | 22          |
| 3.3      | <b>Métodos Computacionais - Fator <math>Q</math></b> . . . . . | <b>24</b>   |
| 3.3.1    | Razão Espectral . . . . .                                      | 25          |
| 3.3.2    | Deslocamento de Frequência . . . . .                           | 27          |
| 3.3.3    | <i>Software</i> para Estimativa do Fator $Q$ . . . . .         | 28          |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .                       | <b>30</b>   |
| 4.1      | <b>Amostras de Afloramento</b> . . . . .                       | <b>30</b>   |

|          |  |               |
|----------|--|---------------|
| 4.2      | <b>Amostras dos Poços UFRJ-2-SS-1-PB e UFRJ-2-FC-PB . . . . .</b>                          | <b>39</b>     |
| 4.3      | <b>Amostras do Poço 1-BSB01-PB . . . . .</b>   | <b>45</b>     |
| 4.4      | <b>Fator de Qualidade - Uma Análise Comparativa . . . . .</b>                              | <b>52</b>     |
| 4.5      | <b>A Bacia Rio do Peixe - Análise Integrada dos Dados . . . . .</b>                        | <b>56</b>     |
| 4.5.1    | Porosidade . . . . .   | 56            |
| 4.5.2    | Densidade . . . . .  | 61            |
| 4.5.3    | Velocidades de ondas compressoriais e cisalhantes . . . . .                                | 64            |
| 4.5.4    | Anisotropia das Ondas Cisalhantes . . . . .  | 66            |
| 4.5.5    | Permeabilidade . . . . .   | 68            |
| <b>5</b> | <b>ATENUAÇÃO ELÁSTICA EM MODELOS SINTÉTICOS . . . . .</b>                                  | <b>73</b>     |
| 5.1      | <b>Estimativa do Fator de Qualidade . . . . .</b>  | <b>78</b>     |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES . . . . .</b>  | <b>81</b>     |
|          | <b>Referências . . . . .</b>   | <b>83</b>     |
|          | <br><b>ANEXOS</b>  | <br><b>87</b> |
|          | <b>ANEXO A – MATERIAIS E EQUIPAMENTOS . . . . .</b>  | <b>88</b>     |
|          | <b>ANEXO B – MÓDULOS ELÁSTICOS E FATORES DE QUALI-<br/>DADE . . . . .</b>                  | <b>91</b>     |
|          | <b>ANEXO C – ALGORITMO MATLAB PARA EXTRAÇÃO DOS ATRI-<br/>BUTOS DE ATENUAÇÃO . . . . .</b> | <b>95</b>     |

# 1 Contextualização do Problema

## 1.1 Introdução

As bacias sedimentares interiores do nordeste brasileiro são praticamente desconhecidas, quando considerados os aspectos petrofísicos, ou seja, as propriedades físicas das rochas que as compõem. Contudo, uma caracterização petrofísica é indispensável para a qualificação e quantificação destas bacias como possíveis produtoras de hidrocarbonetos. Parâmetros como o delineamento do arcabouço estrutural, os tipos litológicos que preenchem esse arcabouço, a distribuição espacial em termos de área e de espessura dos estratos, as saturações fluidas, o espaço poroso, sua forma de ocorrência e consequente efeito sobre a produção de fluidos, necessários à quantificação de uma reserva, são obtidos através da integração de dados geológicos, geofísicos e petrofísicos.

As principais bacias interiores da região nordeste, na parte boreal, são as bacias do Araripe, Cedro e São José do Belmonte (Pernambuco/Ceará), Rio do Peixe (Paraíba), Iguatu-Icó (Ceará) e Rio Nazaré (Rio Grande do Norte). Estas bacias têm sido recentemente estudadas a fim de melhor entender seus aspectos geológicos, especialmente após a ocorrência de petróleo de boa qualidade (MENDONÇA FILHO *et al.*, 2006) na Bacia do Rio do Peixe. Entretanto, os estudos destas bacias interiores são importantes não somente no sentido da qualificação e quantificação destas, como possíveis produtoras de hidrocarbonetos, mas também como casos análogos, auxiliando na compreensão das rochas e processos de outras bacias de margem continental, onde a amostragem é mais difícil. Analisando trabalhos anteriores, como os de Rand (1984), Carvalho & Leonardi (1992), Castro & Branco (1999), Nogueira *et al.* (2004), entre outros, percebe-se a ausência de estudos petrofísicos nessas bacias, porém, estes trabalhos fornecem informações geológicas que permitiram guiar a coleta de amostras para investigações laboratoriais, bem como a locação de áreas prioritárias para levantamentos de campo.

Assim, motivados pela ocorrência de petróleo de boa qualidade e munidos de importantes informações geológicas sobre a Bacia do Rio do Peixe, estudamos esta do ponto de vista petrofísico, medindo propriedades como porosidade, permeabilidade, densidade e velocidades de propagação de ondas, obtendo principalmente informações sobre a atenuação elástica, através do fator  $Q$  (discutido no capítulo 2). As características da atenuação elástica podem revelar muitas informações como litologia, estado físico, grau e tipo de saturação das rochas, tornando-a uma ferramenta importante para a correta caracterização petrofísica de materiais visco-elásticos, como por exemplo, as rochas.

## 1.2 A Bacia do Rio do Peixe

A Bacia do Rio do Peixe (BRP) tem idade eocretácica e está localizada no extremo oeste do estado da Paraíba. Segundo Ponte *et al.* (1991), a BRP apresenta uma coluna sedimentar atribuída ao estágio rifte. A BRP se encontra imediatamente ao norte do lineamento Patos (direção E-W), na junção com a zona de cisalhamento Portalegre (de direção SW-NE), figura 1, formando duas sub-bacias principais: a sub-bacia de Sousa - a norte do Lineamento Patos - e a sub-bacia Brejo das Freiras, a oeste da Falha de Portalegre. Há ainda uma terceira sub-bacia de menor porte e localizada na extremidade leste da BRP: a sub-bacia de Pombal (figura 2).

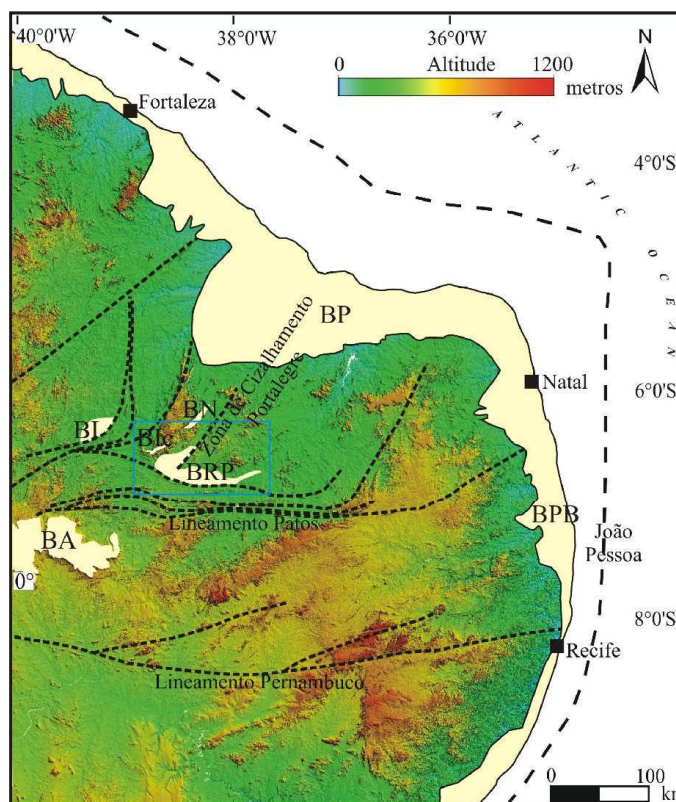


Figura 1 – Localização das bacias interiores do Nordeste do Brasil, representadas pelas bacias de Araripe (BA), Rio do Peixe (BRP), Iguatú (BI), Nazaré (BN) e Icozinho (Bic). As bacias da margem equatorial também estão indicadas, através das bacias Potiguar (BP) e Paraíba (BPB) (SANTIAGO, 2015).

Lima Filho (1991) caracterizou litofaciologicamente três formações que compõem a BRP, que foram denominadas da base para o topo de Formações: Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. A Formação Antenor Navarro é composta por conglomerados e arenitos arcólios grossos, associados a arenitos médios a finos, intercalados com siltitos e argilitos. Esta formação teria sido gerada em ambiente fluvial anastomosado e leques aluviais. Na Formação Sousa há predominância de folhelhos e siltitos avermelhados, delgadas lentes de calcário, e intercalações de arenitos finos a grossos. Possivelmente a gênese da Fm

Sousa ocorreu em águas calmas, em ambiente lacustre raso ou de planície de inundação com influência fluvial. A Formação Rio Piranhas é composta por arenitos grossos a conglomeráticos, com intercalações de siltitos e argilitos avermelhados.

A figura 3 apresenta a estratigrafia com a proposta para a distribuição temporal das formações na BRP. Contudo, segundo Silva (2009) a distribuição espacial das formações é mais complexa, apresentando severas intercalações e orientações de camadas não usuais.

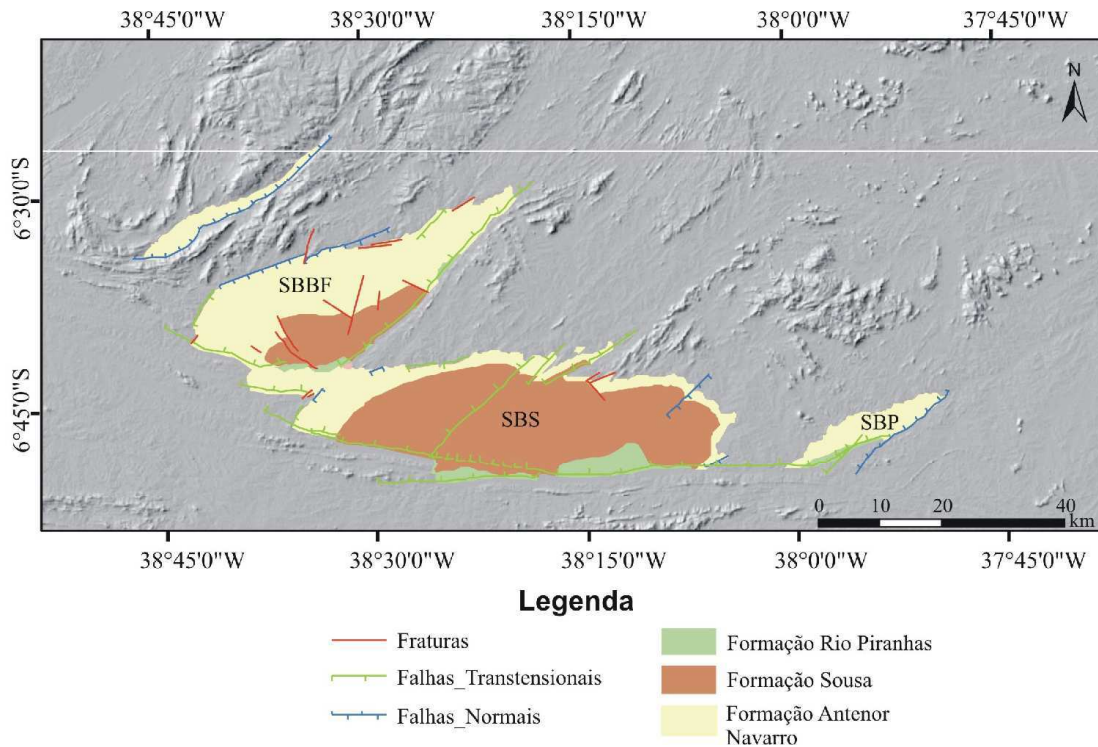


Figura 2 – Mapa de localização das sub-bacias de Brejo das Freiras (SBBF), Sousa (SBS) e Pombal (SBP). Neste mapa são indicados os principais traços estruturais na bacia.

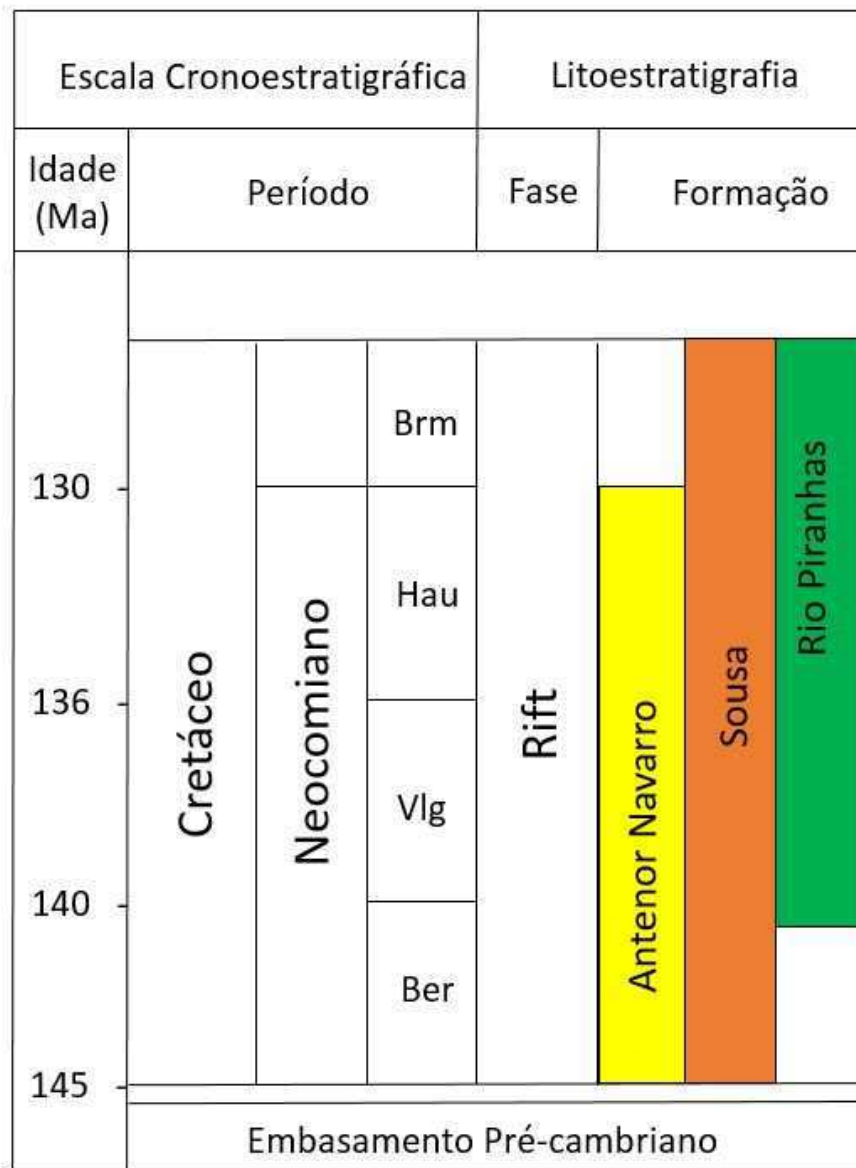


Figura 3 – Carta estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe (modificado de Nogueira *et al.* (2015)). Períodos: Barremiano (Brm), Hauteriviano (Hau), Valangiano (Vlg) e Berriasiano (Ber).

Assim, desenvolvemos nas páginas seguintes uma análise petrofísica para a Bacia do Rio do Peixe, buscando associar as principais características geológicas - neste caso, associando as propriedades utilizadas para distinguir tais características - as análises laboratoriais.



## 2 Propriedades Petrofísicas

Neste capítulo serão revisadas as principais propriedades físicas relevantes a esta dissertação, seus fundamentos e, quando pertinente, algumas correlações.

### 2.1 Velocidades e Módulos Elásticos

#### 2.1.1 Onda Sísmica

Segundo Nussenzveig (2002), uma onda é um pulso energético que se propaga através de um meio (líquido, sólido ou gasoso), com velocidade definida. Assim, uma onda transmite energia de um ponto a outro. Uma vibração mecânica se propagando através de um material rochoso define uma onda sísmica (THOMPSON; TURK, 1998). A análise destas ondas permite estimar, com certa confiança, algumas propriedades físicas do meio pelo qual estas se propagaram.

O termo *Onda Elástica* é utilizado para uma onda sísmica que não causa deformações permanentes no material ao se propagar, ou seja, a energia do pulso ao longo da propagação não ultrapassa o limite elástico do material.

Existem dois tipos de ondas que despertam interesse sísmico: as ondas superficiais, que, em um sólido, se propagam ao longo da superfície que o limita (ondas Rayleigh e Love) e as ondas de corpo, que se propagam através do volume de um sólido elástico. Uma vez que boa parte do sinal útil nos dados sísmicos é composto pelas ondas de corpo, aqui é dada maior atenção a estas.

As ondas de corpo podem ser de dois tipos. As ondas compressionais – ondas longitudinais, primárias ou simplesmente ondas P – que oscilam por deformação uniaxial na direção de propagação da onda. As do segundo tipo são as ondas de cisalhamento – ondas transversais, secundárias ou simplesmente ondas S – que oscilam por cisalhamento puro em uma direção perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 5).

#### 2.1.2 Velocidades de Propagação e Elasticidade

Em uma vibração mecânica, a onda se propaga devido ao deslocamento das partículas que compõem o meio. Este deslocamento é transmitido como um esforço à partícula seguinte e assim sucessivamente. A velocidade deste deslocamento é proporcional ao módulo elástico do material. Supondo deformações infinitesimais, onde o limite elástico do material não é ultrapassado, podemos determinar os módulos elásticos da rocha analisada com base nas velocidades medidas, visto que são atributos dependentes.

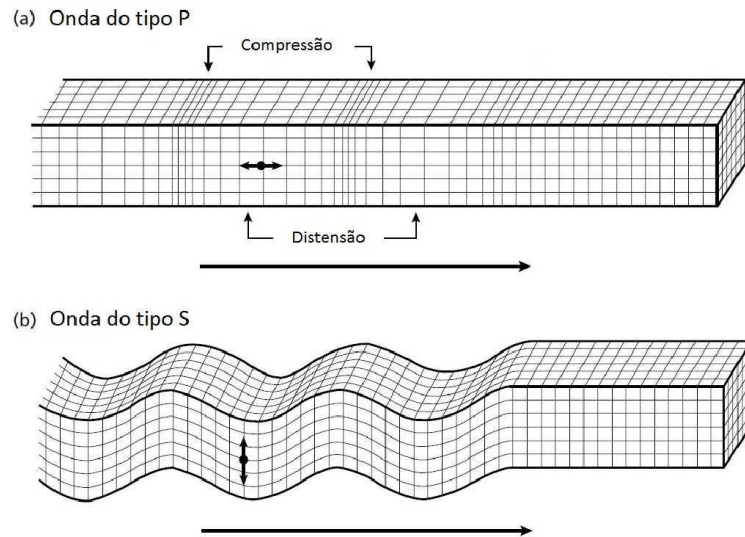


Figura 4 – Deformações elásticas e movimento das partículas associadas à passagem das ondas de corpo. (a) - Ondas compressoriais e (b) Ondas cisalhantes (KEAREY *et al.*, 2002)

Vale ressaltar que a velocidade de propagação de uma onda em um meio indica o quão rápido a deformação em uma partícula é transmitida para a partícula seguinte e não representa a velocidade com que a partícula se movimenta (ROSA, 2010).

Para um material qualquer, a velocidade de uma onda de corpo é dada por:

$$V = \left[ \frac{\text{módulo elástico do material}}{\text{massa específica do material}} \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

onde o módulo elástico do material deve ser aquele que corresponde ao tipo de deformação que a onda provoca. A figura 6 ilustra os diferentes módulos elásticos.

Por exemplo, a velocidade de propagação de uma onda P, que gera uma deformação compressional uniaxial, pode ser obtida através da equação:

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (2.2)$$

onde  $K$  é o módulo de incompressibilidade ou módulo volumétrico;  $G$  o módulo de rigidez ou de cisalhamento e  $\rho$  a densidade do material pelo qual a onda se propaga.

E a velocidade de propagação para a onda do tipo S, onde ocorre cisalhamento puro, é dada por:

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.3)$$

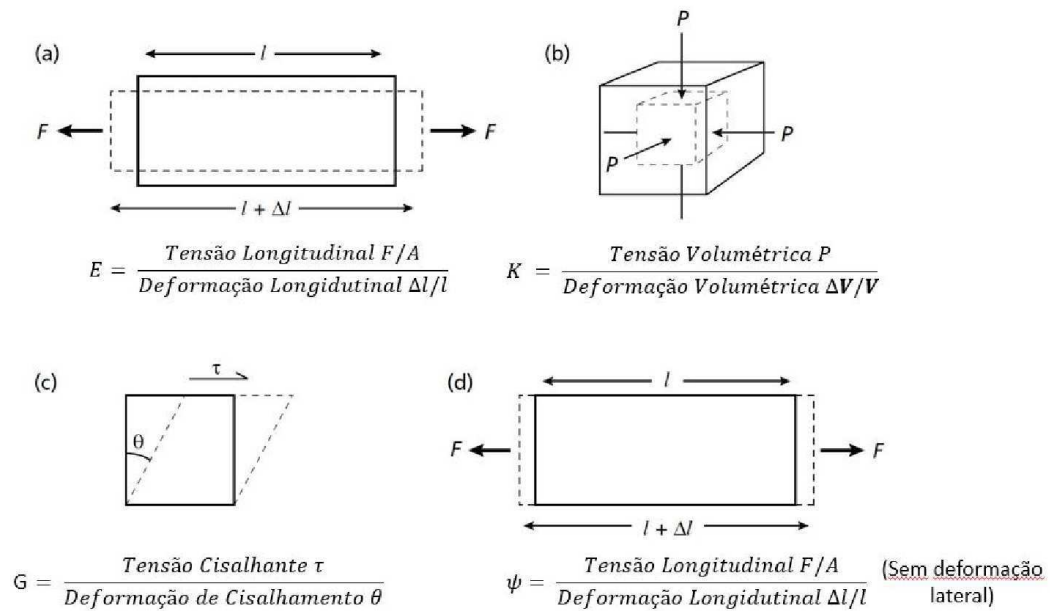


Figura 5 – Relações entre tensão e deformação para os diferentes módulos elásticos: (a) Módulo de Young  $E$ ; (b) Módulo Volumétrico  $K$ ; (c) Módulo de Rigidez  $\mu$  e; (d) Módulo Axial  $\psi$  (KEAREY *et al.*, 2002).

Observando a equação (2.2) vemos que a rigidez afeta a velocidade das ondas do tipo P. Isto ocorre porque a rigidez atua no sentido de impedir a distribuição homogênea dos esforços, fazendo com que a deformação volumétrica em um sólido seja menor do que aquela em um fluido para o mesmo esforço compressional, já que os fluidos, em geral, não oferecem resistência ao cisalhamento (excluem-se desta regra aqueles que apresentam viscosidade elevada).

De acordo com as equações anteriores, as velocidades de propagação das ondas compressoriais (P) são sempre maiores que as das ondas cisalhantes (S).

## 2.2 Atenuação de Ondas Sísmicas

### 2.2.1 Absorção Sísmica

Knopff (1964) introduz seu trabalho afirmando que "se não fosse a atenuação do som no interior da Terra, a energia dos terremotos do passado ainda reverberariam através do interior da Terra hoje". Tal afirmação baseia-se no fato de que as rochas não são materiais perfeitamente elásticos. Assim, na propagação de ondas nestes materiais, efeitos inelásticos também influenciam o comportamento destas ondas.

Na propagação de ondas sísmicas, há dissipação de parte da energia inicial no meio, caracterizada pela redução das amplitudes de tais ondas à medida que se propagam.

Parte desta redução é devido à conversão de alguma fração da energia inicial em calor (TOKZÖZ; JOHNSTON, 1981). Existem inúmeros outros fatores que provocam a redução de amplitude de uma onda sísmica, como o mau acoplamento de fontes e receptores com o meio de propagação, acarretando perda de energia de forma praticamente imprevisível, a presença de obstáculos de dimensões maiores ou da ordem do comprimento de onda do pulso, que leva ao espalhamento de energia tipo Rayleigh (heterogeneidades), ilustrado na figura 7, ou difração (falhas, etc.) (VASQUEZ, 2000). Entretanto, o interesse deste trabalho é o fenômeno da dissipação da energia elástica, convertida em calor de forma irreversível durante a propagação da onda. Tal fenômeno é chamado de *absorção sísmica*.

Podemos dividir a absorção sísmica em outros dois fenômenos: dispersão, onde as velocidades de propagação são dependentes da frequência, devido ao efeito da absorção sísmica sobre a fase da onda e; atenuação intrínseca, quando, como efeito da absorção sísmica, há redução da amplitude e mudança na forma do pulso da onda elástica. No domínio do tempo, estes efeitos resultam na mudança da forma no sinal, enquanto que no domínio da frequência, os efeitos atuam na deformação dos espectros de amplitudes e de fase. Segundo Zhang (2008) a dispersão é geralmente causada por heterogeneidades que distribuem a energia da onda em direções arbitrárias. Já a atenuação é causada pela fricção interna resultante do deslizamento relativo ao longo do contato entre os grãos na rocha matriz, e do fluxo de fluidos dentro do espaço poroso, que causa um movimento relativo e dissipativo entre a matriz rochosa sólida e o fluido no poro.

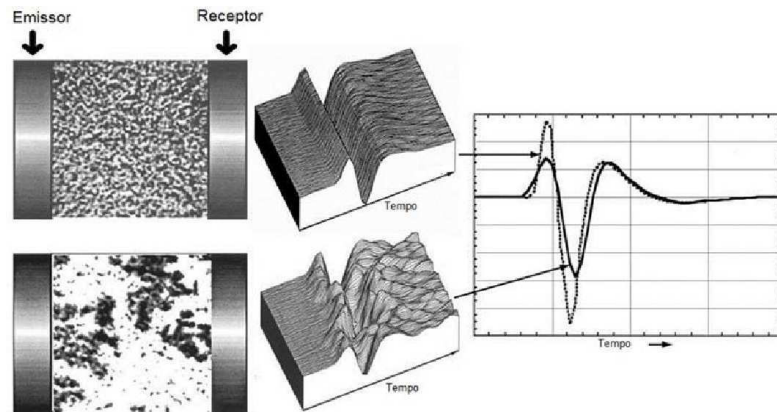


Figura 6 – Efeito da heterogeneidade sobre a amplitude das ondas elásticas (ZINSZNER; PELLERIN, 2007).

As medidas quantitativas da atenuação são, comumente, expressas pelo fator de qualidade  $Q$ , ou pelo coeficiente de atenuação  $\alpha$ , ou ainda pelo decremento logarítmico  $\delta$ . Estes parâmetros se relacionam da seguinte maneira:

$$\frac{1}{Q} = \frac{\alpha V}{\pi f} = \frac{\delta}{\pi} \quad (2.4)$$

onde  $V$  é a velocidade de propagação e  $f$  a frequência.

Em um meio homogêneo e elástico, a amplitude de uma onda plana pode ser expressa por:

$$A(x, t) = A_0 e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.5)$$

onde  $A_0$  é a amplitude inicial,  $k$  o número de onda,  $x$  a distância percorrida pela onda,  $\omega$  a frequência angular e  $t$  o tempo de propagação.

Podemos adicionar o efeito da atenuação na equação acima:

$$A(x, t) = A_0 e^{-\alpha x} e^{i(k_r x - \omega t)} \quad (2.6)$$

onde o termo  $k_r$  é a parte real do número de onda, visto que com a adição do efeito da atenuação, tal grandeza se torna complexa ( $k = k_r + i\alpha$ ), e  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação.

Representando a atenuação como uma função da distância percorrida pela onda, tem-se:

$$A(x, t) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.7)$$

assim, pode-se expressar o coeficiente de atenuação como:

$$\alpha = -\frac{1}{A(x)} \frac{dA(x)}{dx} = -\frac{d}{dx} (\ln A(x)) \quad (2.8)$$

Assim, para medidas de amplitudes em dois pontos no percurso da onda, o coeficiente  $\alpha$  é:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left[ \frac{A(x_2)}{A(x_1)} \right] \quad (2.9)$$

Utilizando a definição do decremento logarítmico  $\delta$ :

$$\delta = \ln \left[ \frac{A_1}{A_2} \right] \Rightarrow \alpha \lambda = \frac{\alpha V}{f} \quad (2.10)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda.

As relações definidas nas equações (2.9) e (2.10) auxiliarão na compreensão do fator  $Q$ , definido na seção seguinte.

As propriedades elásticas das rochas são, em geral, descritas pelos módulos elásticos e/ou pelas velocidades de propagação de ondas de corpo e massa específica. Por outro lado, existem diversos parâmetros que buscam caracterizar as propriedades atenuativas e dissipativas das rochas. A descrição de todos estes métodos foge ao escopo deste trabalho. Aqui, a atenuação de ondas elásticas é considerada como a absorção efetiva, ou seja, com os efeitos combinados da atenuação e dissipação, visto que não há um meio confiável para separar estes efeitos. Assim, optamos por utilizar o *Fator Q* para a caracterização das propriedades atenuativas das rochas da Bacia do Rio do Peixe.

### 2.2.2 Fator $Q$

Em geral, para sintetizar todos os processos atenuativos em um meio visco-elástico, descrevendo-os quantitativamente, utiliza-se o fator de qualidade  $Q$  (ou o seu inverso ( $Q^{-1}$ )). O fator  $Q$  é uma grandeza adimensional, intrínseca à cada material e, segundo Knopoff & McDonald (1958), pode-se expressá-lo da seguinte forma:

$$Q = 2\pi \frac{E_0}{\Delta E} \quad (2.11)$$

onde, deduzida para ondas senoidais,  $E_0$  representa a máxima energia de deformação em um ciclo, e  $\Delta E$  é a energia dissipada neste ciclo. Assim, quanto maior o fator  $Q$ , menor é a atenuação no meio. Existem diversas outras definições para o fator  $Q$ , baseadas também na propagação de pulsos (O'Connell & Budiansky (1978); Hamilton (1972)), ou na observação das relações de tensão-deformação (Gordon & Davis (1968); Brennan & Stacey (1977)), entre outras. Entretanto, por definição, todas baseiam-se no princípio da perda de energia e, assim, relacionam-se àquela apresentada anteriormente. Assim, embora hajam discussões mais complexas, a equação (2.4) representa de forma geral o significado do fator  $Q$ . De maior complexidade é o que causa tais perdas de energia durante a propagação de um pulso.

O valor intrínseco do fator  $Q$ , sob certas condições, pode ser diferente dos valores de  $Q$  derivados de processos como a propagação de ondas. Ainda assim, estes processos são ferramentas valiosas para as medidas das propriedades anelásticas das rochas (TOKZÖZ; JOHNSTON, 1981).

De acordo com Zhang (2008), a fim de obter informações mais detalhadas de um meio visco-elásticos, deve-se incorporar os efeitos da atenuação na descrição da propagação de um pulso, que usualmente é realizada utilizando apenas a densidade e a velocidade do meio. A figura 07 representa, simplificada, o comportamento de um pulso em um meio visco-elástico e absorsoivo.

As várias definições do fator  $Q$  são equivalentes ao  $Q$  intrínseco se as perdas são pequenas ( $Q > 10$ ) (TOKZÖZ; JOHNSTON, 1981). Tal condição é geralmente satisfeita para a maioria dos processos de interesse geofísico. Segundo O'Connell & Budiansky (1978)

o  $Q$  intrínseco pode ser definido como:

$$Q = \frac{wE}{-dE/dt} = \frac{2\pi W}{\Delta W} \quad (2.12)$$

onde  $-dE/dt$  é a taxa de perda de energia,  $W$  é a energia elástica armazenada na posição de máxima deformação, e  $\Delta W$  é a perda de energia por ciclo em uma excitação harmônica. Observe que para pequenas perdas, as equações 2.11 e 2.12 são idênticas.

Na época de tais definições, era prática comum assumir que o valor de  $Q$  era substancialmente independente da frequência. As suposições de amostras de rocha homogêneas e de baixa frequência nos ensaios, eram claramente importantes, visto o que hoje se entende sobre potenciais mecanismos de dissipação de energia em rochas microfraturadas, com planos de acamamento e/ou juntas.

Experimentos em laboratório, em muitos sólidos homogêneos, mostram que para altas e moderadamente altas frequências, o valor adimensional do fator  $Q$  é independente da frequência (BARTON, 2007). Tal resultado indica que o mecanismo pelo qual a energia é dissipada das ondas elásticas em sólidos, não é o mesmo mecanismo para a atenuação em fluidos, onde a atenuação é dependente da frequência.

Vários mecanismos têm sido propostos para explicar a atenuação sísmica em rochas, e cada um possui maior ou menor grau de importância na atenuação total, dependendo das condições físicas. Segundo Jonhston *et al.* (1979), estes mecanismos incluem:

- Matriz inelástica;
- Dissipação friccional devido ao movimento relativo entre os grãos e através de fraturas;
- Fluxo de fluido causando o relaxamento devido ao movimento nos limites do poro;
- Movimento relativo do arcabouço sólido com respeito à inclusão de fluido, no caso de rochas completamente saturadas;
- Compressão de bolhas de gás, quando parcialmente saturadas as amostras;
- Efeitos geométricos devido ao tamanho e forma dos poros, irregularidades e acamamentos.

Observando as equações 2.11 e 2.12, seria sensato sugerir que os valores de  $Q$  nunca fossem menores que  $2\pi$ . Entretanto, valores menores que este são frequentemente registrados, principalmente perto da superfície, incluindo valores negativos, os quais podem refletir alguma dificuldade de interpretação, na maioria das vezes relacionado às rochas inconsolidadas.

Tabela 1 – Exemplos de valores de  $Q$  para alguns sólidos e rochas, selecionados de Knopoff (1964).

| Material | $Q$  |
|----------|------|
| Aço      | 5000 |
| Cobre    | 2140 |
| Sílica   | 1250 |
| Vidro    | 490  |
| Diorito  | 125  |
| Calcário | 110  |
| Arenito  | 21   |
| Folhelho | 10   |

## 2.3 Fatores que Afetam o Comportamento Sísmico

### 2.3.1 Porosidade

A porosidade é definida como a fração de um volume, que não é ocupada por um arcabouço sólido (TIAB; DONALDSON, 2011). Nas rochas sedimentares, como arenitos e calcários, visto que os grãos usualmente são bastante irregulares e não permitem um bom acoplamento, a porosidade é obtida da razão deste espaço vazio, entre os grãos, com o volume total da rocha. Matematicamente:

$$\phi = \frac{V_b - V_{gr}}{V_b} = \frac{V_p}{V_b} \quad (2.13)$$

onde  $\phi$  é a porosidade (em fração),  $V_b$  é o volume total (*bulk volume*),  $V_{gr}$  o volume de grãos e  $V_p$  é o volume de poros.

Observando a equação acima, a porosidade poderia assumir qualquer valor entre 0 e 1. Entretanto, o conceito de porosidade só é válido para porosidades menores ou iguais à porosidade crítica ( $\phi_{cr}$ ), onde acima deste valor, a matriz rochosa seria apenas uma suspensão no fluido que satura a amostra. O valor de  $\phi_{cr}$  depende do tipo de material, mas em geral é menor que 50% para rochas sedimentares.

Para a geofísica de exploração petrolífera, o volume poroso é o espaço de interesse, visto que nestes interstícios acumulam-se os fluidos (líquidos e/ou gases) economicamente explotáveis.

### Porosidade e Velocidade Sísmica

Wyllie *et al.* (1956) mostram que existe uma relação linear entre a velocidade compressional e a porosidade para rochas sedimentares, expressa pela chamada equação



do tempo médio.

$$\frac{1}{V_P} = \frac{\phi}{V_F} + \frac{1-\phi}{V_{PG}} \quad (2.14)$$

sendo  $V_P$  a velocidade de propagação compressional na rocha,  $V_F$  a velocidade do fluido saturante, lembrando que esta também é uma velocidade compressional, já que o fluido não oferece resistência ao cisalhamento; e  $V_{PG}$  é a velocidade de propagação compressional na matriz sólida. Esta equação mostra que o tempo total de trânsito ( $1/V_P$ ) é a soma dos tempos de propagação na matriz e no fluido que preenche o espaço poroso. Vale ainda ressaltar que a equação do tempo médio foi definida a partir de ensaios em laboratório para um compósito de alumínio e lucita, e é associada à rochas sedimentares que possuem mineralogia relativamente uniforme, saturadas e submetidas à uma pressão efetiva elevada.

Em geral, para uma dada mineralogia, as velocidades de propagação compressionais e cisalhantes diminuem com o aumento da porosidade. Observa-se isso na equação 2.14, visto que as velocidades de propagação possuem valores mais elevados na matriz rochosa do que no fluido. Contudo, para rochas com a mineralogia um pouco mais complexa, a equação do tempo médio de Wyllie deve ser vista como uma correlação empírica, visto que outros materiais, quando presentes na matriz rochosa, alteram  $V_{PG}$  em maior ou menor grau. Por exemplo, a presença de argila, bastante comum em arenitos, reduz a velocidade estimada da equação do tempo médio.

Diversos trabalhos buscam obter outras correlações a partir da equação do tempo médio, incluindo outros parâmetros. Raymer *et al.* (1982) propõem um refinamento da equação 2.14, dividindo em faixas de porosidade a relação com a velocidade compressional. São as chamadas relações de Raymer-Hunt-Gardner, obtidas à partir de um grande número de observações, principalmente de perfis.

$$\phi < 37\% \longrightarrow V_P = (1 - \phi)^2 V_{PG} + \phi V_F \quad (2.15a)$$

$$\phi > 47\% \longrightarrow V_P = \left[ \rho \left( \frac{\phi}{\rho_F V_F} + \frac{1 - \phi}{\rho_{gr} V_{PG}^2} \right) \right]^{-1/2} \quad (2.15b)$$

$$37\% < \phi < 47\% \longrightarrow V_P = \left( \frac{0,47 - \phi}{0,1 V_{P37}} + \frac{\phi - 0,37}{0,1 V_{P47}} \right)^{-1} \quad (2.15c)$$

onde  $\rho_{gr}$  é a densidade de grãos,  $\rho_F$  a densidade do fluido e  $V_{P37}$  e  $V_{P47}$  são as velocidades compressionais para as porosidades de 37 e 47% respectivamente.

Já para as ondas cisalhantes, utilizamos a relação com a porosidade somente até a porosidade crítica, ou seja, até 37% para as observações de Raymer *et al.* (1982), visto que as ondas do tipo S não se propagam no fluido, e as rochas tornam-se uma suspensão

fluido-sólido acima da  $\phi_{cr}$ .

$$V_S = \left[ \frac{1 - \phi}{V_{SG}} + \frac{\phi}{871,4} \right]^{-1} \quad (2.16)$$

onde  $V_{SG}$  é a velocidade de propagação da onda S nos grãos, ou seja, na parte sólida da rocha.

Há também estudos que consideram o percentual de argila presente na rocha, como os de Vernik & Nur (1992) e Vernik (1994), onde, empiricamente, as rochas siliciclásticas são classificadas em quatro grupos:

$$V_P(km/s) = 6,07 - 7,97\phi, \quad R = 0.99 \quad (C < 2\%) \quad (2.17a)$$

$$V_P(km/s) = 5,52 - 6,91\phi, \quad R = 0.97 \quad (2\% < C < 15\%) \quad (2.17b)$$

$$V_P(km/s) = 5,19 - 7,21\phi, \quad R = 0.96 \quad (15\% < 35\%) \quad (2.17c)$$

$$V_P(km/s) = 4,93 - 9,03\phi, \quad R = 0.97 \quad (35\% < C) \quad (2.17d)$$

onde C é a porcentagem de argila presente na amostra. O percentual de argila presente na amostra é um indicador de como a litologia afeta o comportamento sísmico das rochas e será discutido na seção seguinte. Contudo, é importante notar nas relações acima que a porosidade ainda é o principal fator, sendo o teor de argila o segundo fator de influência mais importante sobre as velocidades sísmicas (NUR; WANG, 1989).

### 2.3.2 Litologia

Os módulos elásticos são diferentes para cada tipo de mineral e, sendo a rocha um composto de minerais, tanto a velocidade quanto a atenuação são afetadas diretamente pela composição mineralógica. Soma-se a isto o efeito proveniente do tipo de cimentação presente, também resultado da litologia, que pode conferir maior ou menor rigidez à rocha. Por exemplo, em uma matriz formada por grãos de quartzo, cimentos também de quartzo e carbonáticos, produzem maiores velocidades e menores atenuações que uma cimentação argilosa, visto que esta última, devido à menor rigidez, atuaria como um amortecedor, reduzindo a velocidade de transmissão dos esforços e absorvendo mais energia.

Buscando um melhor indicador litológico, comumente utiliza-se a razão  $V_P/V_S$ , pois é independente da densidade da rocha, enquanto a análise somente da velocidade é ambígua, visto que a velocidade é dependente de outras propriedades (KEAREY *et al.*, 2002). Através de estudos em rochas consolidadas com diferentes porosidades, Picket

(1963), obteve as seguintes relações:

$$V_P/V_S = 1,6 \sim 1,7 \quad (\text{Arenitos limpos})$$

$$V_P/V_S = 1,8 \quad (\text{Dolomitos})$$

$$V_P/V_S = 1,9 \quad (\text{Calcários})$$

Castagna *et al.* (1985) também investigaram as relações entre velocidades de propagação e litologia, obtendo, para rochas saturadas com água, as seguintes relações:

$$V_S = 0,80416V_P - 0,85588 \quad (\text{Arenitos}) \quad (2.19a)$$

$$V_S = -0,05508V_P^2 + 1,01677V_P - 1,03049 \quad (\text{Calcários}) \quad (2.19b)$$

$$V_S = 0,5832V_P - 0,07775 \quad (\text{Dolomitos}) \quad (2.19c)$$

$$V_S = 0,76969V_P - 0,86735 \quad (\text{Folhelhos}) \quad (2.19d)$$

onde as unidades de velocidade são em  $km/s$ .

Como citado na seção anterior, o teor de argila é o fator de influência mais importante sobre as velocidades sísmicas depois da porosidade. Somando-se a este fato a importância do teor de argila para a qualidade de um reservatório petrolífero, é justificado o interesse na busca de relações, na geofísica de exploração, entre o teor de argila e as velocidades sísmicas. Assim, Han *et al.* (1986) obtiveram para a velocidade, a porosidade e o teor de argila, as seguintes relações:

$$V_P = 5,59 - 6,93\phi - 2,18C \quad (2.20a)$$

$$V_S = 3,52 - 4,91\phi - 1,89C \quad (2.20b)$$

para  $40MPa$  e saturadas com água. As unidades de porosidade e do teor de argila são em frações decimais e da velocidade em  $km/s$ .

Segundo Minear (1982), o tipo de argila não é o mais importante, mas sim a forma como esta ocorre.

### 2.3.3 Permeabilidade

A permeabilidade é definida como a capacidade da rocha de conduzir fluidos pelo seu interior, através dos poros interconectados (TIAB; DONALDSON, 2011). Assim, uma rocha não-porosa não possui permeabilidade.

Henry Darcy, em 1856, desenvolveu uma equação de fluxo de fluido - conhecida como a Lei de Darcy - inicialmente para descrever o fluxo através de areias, mas que foi

generalizada para uma variedade de situações. Na forma diferencial, a equação é expressa por:

$$u = \frac{q}{A_C} = -\frac{\kappa}{\eta} \frac{\partial P}{\partial l} \quad (2.21)$$

onde  $\kappa$  é a permeabilidade (com unidade em *Darcy* –  $D$ ),  $u$  é a velocidade do fluido ( $cm/s$ ),  $q$  é a vazão ( $cm^3/s$ ),  $A_C$  é a área da seção reta da amostra de rocha ( $cm^2$ ),  $\eta$  a viscosidade do fluido (*centipoises* –  $cP$ ),  $l$  o comprimento da amostra ( $cm$ ) e  $\partial P/\partial l$  o gradiente de pressão na direção do fluxo ( $atm/cm$ ). A permeabilidade obtida pela equação (2.21) é dita absoluta caso exista apenas uma fase fluida na amostra, ou seja, apenas um tipo de fluido saturante para o qual é medido o fluxo. Caso existam outras fases, como, por exemplo, uma mistura de óleo, água e gás, presentes na amostra, a permeabilidade é dita efetiva, para cada fase. À razão entre a permeabilidade efetiva de uma fase e a permeabilidade absoluta dá-se o nome de permeabilidade relativa daquela fase.

A complexa interação entre o fluido e os canais porosos de uma rocha causa transformações na energia do sistema, geralmente associadas à diminuição da pressão exercida pelo fluido. A permeabilidade é, assim, uma propriedade não apenas do meio poroso ou do fluido, mas também da interação dinâmica entre ambos (SCHEIDEGGER, 1974).

A permeabilidade é uma das mais importantes características de um reservatório petrolífero, tornando comum a busca de relações entre esta e outras propriedades dos reservatórios. Na perfilagem geofísica é utilizado com frequência a relação entre uma onda de superfície, a Stoneley, e a permeabilidade (WINKLER *et al.*, 1989). Contudo, não há uma definição quanto às relações entre permeabilidade e ondas de corpo, as compressionais e cisalhantes. Klimentos (1991) e Best *et al.* (1994) afirmam a inexistência destas relações, enquanto Vasquez & Dillon (1994) e Shapiro & Müller (1999) apresentam evidências teóricas e experimentais de correlações entre estas propriedades. Assim, neste trabalho, busca-se definir correlações empíricas para as velocidades das ondas de corpo e a permeabilidade.

### 2.3.4 Pressão

Em geral, aumentando-se a pressão efetiva (que é a diferença entre a pressão confinante e a pressão de poros), as velocidades aumentam e a atenuação é reduzida. Tal fato é associado ao efeito da pressão sobre o espaço poroso, que tende a se fechar à medida que a pressão aumenta, enrijecendo o arcabouço da rocha (MAVKO; NUR, 1978); e também à compressão nos contatos entre os grãos, que com o aumento da pressão, torna toda a estrutura rochosa mais rígida (MURPHY *et al.*, 1984).

Neste estudo, como as pressões sequer atingem o limite elástico das amostras, supõe-se que as mudanças na velocidade e na atenuação são devidas ao fechamento de

microfraturas. Contudo a variação de velocidades e atenuações com a pressão, além do estado físico da rocha, também se deve à geometria do poro.

### 2.3.5 Frequência

A frequência da onda de investigação afeta o comportamento sísmico da rocha à medida que diferentes frequências produzem, proporcionalmente, diferentes velocidades de propagação, influenciando inversamente o comprimento de onda. Tal efeito é exemplificado pela seguinte equação:

$$V = \lambda f \quad (2.22)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $f$  a frequência.

O comprimento de onda reflete o quanto a onda elástica pode "enxergar" do meio por onde se propaga. Por exemplo, para velocidades médias de 3500 m/s, uma onda elástica com frequência média de 700KHz sofre influência de estruturas maiores ou iguais a 5mm.

Para a atenuação elástica, adota-se nesta dissertação que o fator de qualidade é independente da frequência, pelo menos na faixa de 200KHz a 1,0MHz (TOKZÖZ; JOHNSTON, 1981). Contudo, a literatura apresenta diversos resultados conflitantes em relação a esta dependência, havendo numerosos modelos que explicam várias situações, não sendo possível determinar, categoricamente, que a atenuação obedeça um ou outro modelo de dependência com a frequência (VASQUEZ, 2000).

### 2.3.6 Outros Fatores

Alguns autores citam outros importantes fatores que atuam sobre o comportamento sísmico em um material rochoso, como a idade, profundidade, estruturas tectônicas, saturação fluída, temperatura e outros. A idade da rocha relaciona-se fisicamente à litificação, onde sedimentos mais antigos apresentam-se mais litificados, o que aumenta a velocidade de propagação. Já a profundidade é associada à pressão de confinamento, visto que sedimentos mais profundos têm sobre si maior volume de material, exercendo pressão, o que também aumentaria as velocidades de propagação. As estruturas tectônicas podem reduzir as velocidades elásticas, caso tais estruturas gerem descontinuidades no material (falhas, por exemplo), ou aumentar as velocidades de propagação, a exemplo das bandas de deformação, que em alguns casos tornam a estrutura mais rígida, modificando, e melhorando, o contanto entre os grãos rochosos. Em relação à saturação, a importância deve-se ao fato do tipo de fluido ser capaz de alterar a densidade e a compressibilidade da rocha, e também a quantidade de fluido, que pode influenciar a dispersão da onda elástica. Os efeitos da saturação ocorrem de modo mais complexo, contudo, para esta dissertação utilizaram-se somente amostras secas.

## 3 Materiais e Métodos

Em geral, ao invés de utilizar as relações existente na literatura, como algumas apresentadas no capítulo anterior, é mais eficiente encontrar as relações empíricas para os dados experimentais obtidos, visto que as interpolações ocorrem dentro de um conjunto de dados representativos da área de interesse. Assim, neste capítulo aborda-se o conjunto de amostras que compõem este trabalho e os métodos pelos quais obtêm-se as informações necessárias à construção das relações empíricas.

### 3.1 Amostras de Rochas da Bacia do Rio do Peixe

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas 145 amostras de rochas sedimentares da Bacia do Rio do Peixe (BRP), onde 17 amostras são provenientes dos furos estratigráficos UFRJ-2-SS-1-PB e UFRJ-2-FC-PB, perfurados pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, e que foram anteriormente cedidas pelo Prof. Dr. Leonardo Borghi para a realização dos ensaios petrofísicos. Outras 30 amostras são provenientes do furo estratigráfico 1-BSB01-PB, perfurado pela Universidade Federal de Campina Grande, através do Laboratório de Petrofísica (LabPetro-UFCG), em parceria com a Petrobras. Cada testemunho apreciou um intervalo diferente da sub-bacia de Sousa. O poço UFRJ-2-SS-1-PB, com apenas 30m de profundidade, contemplou os arenitos em afloramento da formação Antenor Navarro e o poço UFRJ-2-FC-1-PB, com 198m de profundidade, contemplou os argilitos da formação Sousa. Já o furo estratigráfico 1-BSB01-PB, com 300 metros de profundidade, contemplou arenitos e folhelhos da formação Sousa. As outras 98 amostras foram coletadas em diversos afloramentos na bacia, também pela equipe do LabPetro-UFCG.

#### 3.1.1 Preparação das Amostras

Para a realização dos ensaios petrofísicos, as amostras de rochas devem apresentar certas características geométricas, a fim de garantir maior confiabilidade nos resultados. Para tal, plugues foram confeccionados, a partir das amostras coletadas, na sala de preparação de amostras do próprio LabPetro-UFCG. Esta preparação consiste inicialmente na serragem das amostras coletadas, em seguida com uma plugadeira de bancada se faz a extração de plugues destas amostras, e o posterior desbaste é realizado com uma retificadora, nas extremidades dos plugues. A finalidade do desbaste (retificação) é garantir faces planas e paralelas, necessárias aos ensaios de velocidade de onda, auxiliando também na determinação do volume total dos plugues, visto que este é obtido pela geometria da

amostra. Ao final da preparação, os plugues apresentam forma cilíndrica, com diâmetro de 38mm e altura de aproximadamente 50mm.

Em seguida os plugues são colocados em uma estufa, onde são submetidos à secagem por 24 horas sob temperatura constante de 80°C. Posteriormente, faz-se a pesagem dos plugues em uma balança eletrônica de precisão. Por fim, realiza-se a medição de suas dimensões, comprimento e diâmetro, com o auxílio de um paquímetro digital.

## 3.2 Métodos Laboratoriais

### 3.2.1 Densidade de Grãos e Porosidade

Como visto no capítulo 02, a porosidade fornece uma medida da capacidade da rocha de armazenar fluidos. No LabPetro-UFCG, as porosidade foram calculadas a partir das medições do volume total e do volume de grãos das amostras. Os valores para o volume total foram obtidos através da geometria das amostras, observando a forma cilíndrica das mesmas, utilizando a relação  $V_{total} = \pi r^2 h$ , onde  $V_{total}$  é o volume da amostra cilíndrica,  $r$  é o raio de sua seção transversal e  $h$ , sua altura. Para determinar o volume de grãos, utilizou-se um permoporosímetro a gás. Através da Lei de Boyle-Mariotte, para a temperatura constante:

$$P_1 \mathbf{V}_1 = P_2 \mathbf{V}_2 \quad (3.1)$$

onde  $P$  é a pressão e  $\mathbf{V}$  é o volume. Os índices 1 e 2 referem-se às condições inicial e final, respectivamente. A equação acima é válida para sistemas fechados e sem variação de temperatura, e indica que o produto entre o volume de gás e a sua pressão se mantém constante antes e depois da interligação de dois subsistemas. O equipamento disponível no LabPetro-UFCG é o UltraPoroPerm 500<sup>®</sup> da Corelab. Neste equipamento,  $P_1$  é a pressão inicial de gás nitrogênio em uma câmara de referência, que possui volume  $\mathbf{V}_1$ . Esse sistema, inicialmente fechado, é conectado à um copo matriz (*Matrix Cup*), onde a amostra é inserida. Em diversas situações, o comprimento da amostra não preenche todo o copo matriz, então são utilizados discos metálicos não-porosos com volumes conhecidos para preencher todo o copo. Após a acomodação da amostra e dos discos no copo matriz, este último é vedado, e tem-se um segundo sistema. Então o sistema  $P_1 \mathbf{V}_1$  é aberto e comunica-se com o copo matriz. Quando o gás expande e ocupa os dois sistemas, a pressão atinge o valor  $P_2$ , e o valor de  $\mathbf{V}_2$  medido, é dado por:

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_1 + (\mathbf{V}_{copo} - \mathbf{V}_{discos} - \mathbf{V}_{grãos}) \quad (3.2)$$

O volume da câmara de referência  $\mathbf{V}_1$  e o volume do copo matriz  $\mathbf{V}_{copo}$  englobam o volume, já conhecido, de todo o equipamento (câmaras e tubulações). O volume dos discos  $\mathbf{V}_{discos}$  também é previamente conhecido. Assim determina-se facilmente o volume de grãos  $\mathbf{V}_{grãos}$  na amostra. Um esquema do sistema de medidas de porosidade é apresentado na fig. 8.

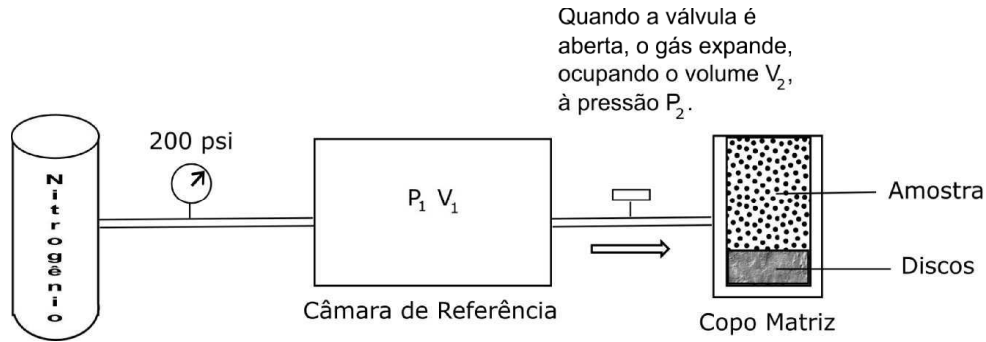


Figura 7 – Esquema do sistema de medidas de porosidade.

Para preencher o copo matriz tem-se à disposição cinco discos, com volumes diferentes. Utilizam-se estes discos para economia no consumo de gás, visto que após realizado o teste, o gás presente no copo matriz é eliminado para a atmosfera.

Admitindo-se que o peso da amostra é devido somente ao peso da parte sólida, desprezando a densidade do ar, obtemos a densidade de grão pela relação:

$$\rho_g = \frac{m}{V_{\text{grãos}}} \quad (3.3)$$

onde  $m$  é a massa da amostra. Obteve-se também a densidade total da amostra, pela relação  $\rho_{\text{total}} = m/V_{\text{total}}$ .

Determina-se, finalmente, a porosidade pela razão entre o volume de poros e o volume total da amostra.

$$\phi = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total}}} = \frac{V_{\text{total}} - V_{\text{grãos}}}{V_{\text{total}}} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Permeabilidade

De acordo com a Lei de Darcy, a velocidade com que um fluido atravessa um meio poroso é relacionada ao gradiente de pressão, onde a constante de proporcionalidade é igual à permeabilidade (uma propriedade do meio poroso) dividida pela viscosidade (uma propriedade do fluido) do fluido que atravessa a amostra.

As medidas de permeabilidade foram realizadas utilizando o equipamento UltraPorPerm 500<sup>®</sup>, o mesmo permoporosímetro à gás utilizado para as medidas de porosidade. Entretanto, utiliza-se um segundo sistema, dentro do mesmo equipamento e insere-se a amostra em um *core holder* (Anexo A, figura 76).

Na parte interna do core holder, existe uma luva de borracha, no qual a amostra é acomodada, que limita toda a área lateral desta. Nas extremidades, a amostra é limitada por dois êmbolos de aço, móveis, e, conseqüentemente, adaptáveis ao comprimento da amostra. Há ainda uma bomba hidráulica conectada ao core holder, que, neste trabalho, foi utilizada somente para garantir uma pressão confinante, em torno de 1000psi, que



eliminasse os espaços entre a amostra, a luva de borracha e os êmbolos, não permitindo fluxo de gás em direções não desejadas. Contudo, pode-se exercer pressões internas de até 10000psi no core holder.

Com a amostra devidamente acomodada no core holder e este conectado ao permoporosímetro, inicia-se o ensaio. Inicialmente injeta-se o gás, neste caso o nitrogênio, de viscosidade conhecida, através da amostra, que possui dimensões também conhecidas. Então, ajusta-se a pressão de entrada do gás através de válvulas reguladoras, de modo a obter-se um fluxo não-turbulento. Um esquema do ensaio para obtenção das medidas de permeabilidade é apresentado na figura 9.

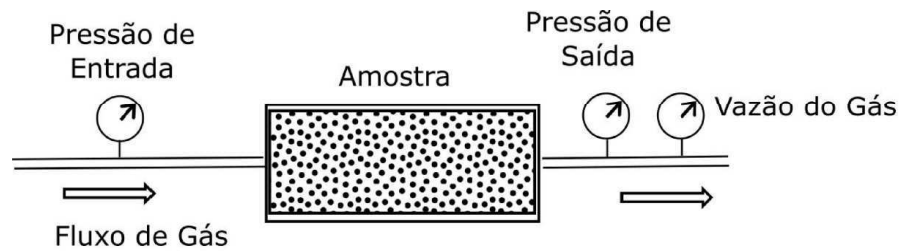


Figura 8 – Esquema do sistema de medidas de permeabilidade (modificado de VASQUEZ, 2000.)

Em seguida, medem-se as pressões de entrada e saída do gás e a vazão do gás através da amostra. Estas medidas e os cálculos para obtenção dos valores de permeabilidade são realizados computacionalmente, sendo necessário informar ao programa as dimensões da amostra e a temperatura, que tem forte influência sobre a viscosidade do gás. Então, a permeabilidade é obtida, através da Lei de Darcy, por:

$$\kappa = \frac{\eta q l}{(P_1 - P_2) A} \quad (3.5)$$

onde  $\kappa$  é a permeabilidade absoluta em Darcy (D),  $\eta$  é a viscosidade do fluido em centipoise (cP),  $q$  a vazão do gás através da amostra ( $cm^3/s$ ),  $P_1$  e  $P_2$  as pressões de entrada e saída do gás (atm), respectivamente,  $l$  o comprimento da amostra (cm) e  $A$  a área da seção reta desta última ( $cm^2$ ).

### 3.2.3 Velocidades de Propagação

Para a medição das velocidades de propagação utilizou-se o sistema AutoLab500® (Anexo I), produzido pela New England Research. As medidas baseiam-se na técnica da transmissão de pulsos, que consiste na propagação, através da amostra, de pulsos mecânicos. Estes pulsos são transmitidos à amostra por transdutores piezelétricos, de material cerâmico, acoplados às extremidades da amostra, com cristais orientados de modo a fornecer uma onda do tipo P e outras duas ondas polarizadas à  $90^\circ$ , do tipo S. Em geral,

por este método, obtém-se a velocidade diretamente da razão entre o comprimento da amostra e o tempo de trânsito da onda na amostra.

Pode-se dividir o sistema para as medições de velocidade em outros dois sistemas: um mecânico (hidráulico) e outro eletrônico. O sistema hidráulico consiste no próprio recipiente de medida, um vaso hidráulico, onde são montados os cabeçotes com a amostra para as medidas (a amostra é inserida entre os transdutores emissor e receptor, que se encontram dentro dos cabeçotes metálicos, visando isolá-los hidráulica e eletricamente). No sistema eletrônico tem-se um gerador de funções e um amplificador de potência, que fornecem um sinal elétrico conhecido para um transdutor. O transdutor transforma o sinal elétrico em uma vibração mecânica. Após percorrer a amostra de rocha, a vibração mecânica é recebida por outro transdutor, que a converte em sinal elétrico, podendo ou não ser amplificado. As formas de onda são, então, armazenadas no computador para análises posteriores. Um esquema para as medições das velocidades de propagação é apresentado na figura 10.

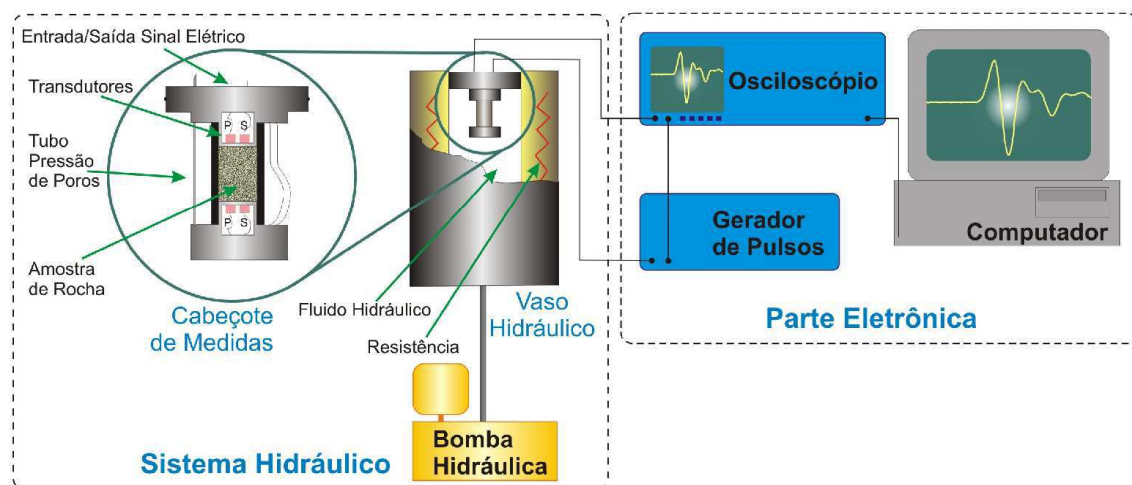


Figura 9 – Esquema para medições das velocidades de propagação de ondas elásticas (MORSCHBACHER *et al.*, 2010).

O sistema de medição impõe um atraso nos tempos medidos, ilustrado na fig. 11, pois há propagação da onda dentro do próprio sistema antes e depois da propagação na amostra. Assim, é necessário realizar a medição do tempo do sistema. Para isto faz-se a medição do tempo de propagação da onda sem a presença da amostra, através do contato direto dos cabeçotes (transdutores) de transmissão e recepção.

Em seguida, podemos determinar a velocidade de propagação da onda elástica utilizando a relação:  $V = l/\Delta t$ , onde  $l$  é o comprimento da amostra.

O sistema AutoLab 500<sup>®</sup> permite realizar medições sob condições controladas de pressão confinante, pressão de poros e temperatura, simulando as condições *in situ*, que influenciam nas medidas de velocidade, da amostra analisada. Contudo, os ensaios foram

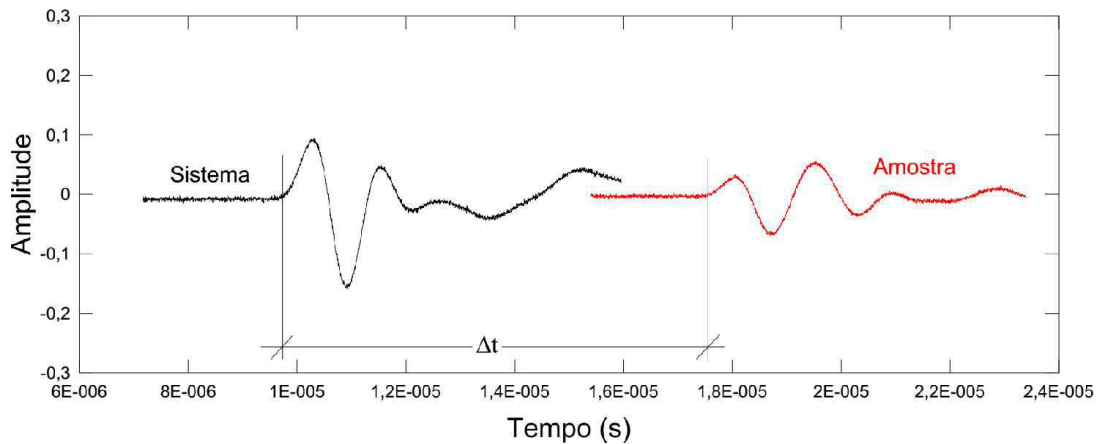


Figura 10 – Determinação do tempo de propagação da onda elástica na amostra.

realizados à temperatura ambiente, permitindo uma variação negligenciável em função da pressão, visto que rochas secas são pouco sensíveis às variações de temperatura, e com o sistema de poros abertos para a atmosfera, de modo que a pressão confinante é, de fato, a pressão efetiva.

O registro das formas de onda, para cada amostra, foi realizado em diferentes níveis de pressão confinante, variando deste 40MPa, em intervalos decrescentes de 5MPa, até a pressão final de 5MPa. Em seguida é realizada a picagem das ondas, visando determinar a chegada, ou primeira quebra, das mesmas e, a partir daí, o  $\Delta t$ .

### 3.3 Métodos Computacionais - Fator Q

A partir das formas de onda registradas pelo sistema AutoLab 500<sup>®</sup>, é possível estimar as propriedades atenuativas das amostras, como o fator de qualidade  $Q$ . Existem diversos métodos para a obtenção do fator  $Q$ , baseados em medidas de vibrações livres e forçadas, observação de curvas de tensão-deformação, propagação de onda, entre outros. Porém, visto que dispõem-se de formas de ondas obtidas pela transmissão de pulsos, os métodos escolhidos, neste trabalho, para extração de atributos de atenuação também são baseados na transmissão de pulsos.

Utiliza-se aqui, o método da razão espectral, que baseia-se na razão entre amplitudes de uma onda de referência e a onda resultante da propagação na amostra; e o método do *shift* de frequência, baseado no deslocamento da frequência central de propagação na amostra, em comparação com a frequência dos transdutores. A seguir serão apresentados os dois métodos e o programa desenvolvido para a estimativa simultânea do fator  $Q$  utilizando ambos os métodos. No Anexo B pode-se conferir o algoritmo utilizado para obter-se individualmente as estimativas do fator  $Q$ .

### 3.3.1 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 método é de fácil implementação, além de ser pouco sensível à relação sinal/ruído. O método baseia-se no fato de que altas frequências atenuam-se preferencialmente em relação às baixas frequências, sendo originalmente utilizado em estudos de sismologia (PRESS, 1964). Contudo, Tokzöz & Johnston (1981), propõem uma modificação da técnica original, visando minimizar os efeitos geométricos sobre as medidas de atenuação medidas em laboratório, a qual é utilizada neste trabalho. Essencialmente, dois ensaios são realizados utilizando procedimentos idênticos, um com a amostra de rocha e outro com uma amostra de referência, que deve possuir atenuação desprezível e as mesmas dimensões e geometria da amostra de rocha.

As amplitudes das ondas sísmicas para a amostra de referência (subíndice 1) e de rocha (subíndice 2), podem ser expressas no domínio da frequência, respectivamente, por:

$$A_1(f) = \mathbf{G}_1(x)e^{-\alpha_1(f)x}e^{i(2\pi ft - k_1x)} \quad (3.6a)$$

$$A_2(f) = \mathbf{G}_2(x)e^{-\alpha_2(f)x}e^{i(2\pi ft - k_2x)} \quad (3.6b)$$

onde  $A$  é a amplitude,  $f$  a frequência,  $l$  a distância percorrida pela onda,  $k$  o número de onda ( $2\pi/V$ ),  $\mathbf{G}(x)$  um fator geométrico que inclui espalhamentos, reflexões, etc., e  $\alpha(f)$  é o coeficiente de atenuação, dependente da frequência. A resposta no domínio da frequência é obtida através da transformada de Fourier aplicada ao sinal temporal obtido em ambas as amostras. Um exemplo das formas de onda utilizadas é apresentado na figura 12.

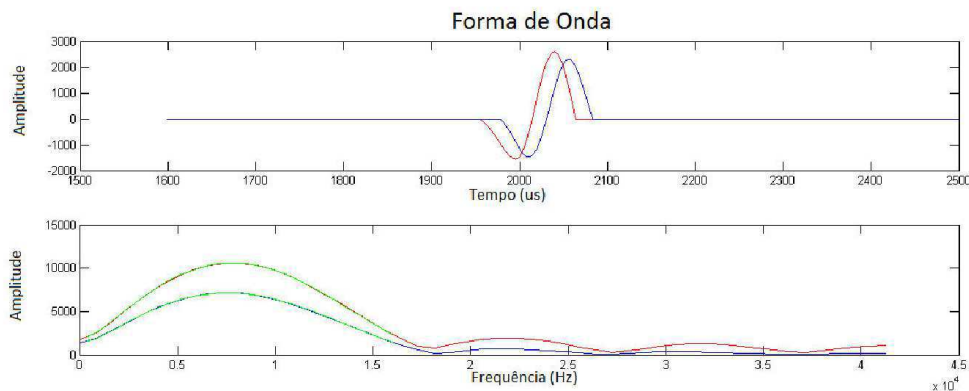


Figura 11 – Exemplo das formas de onda e seus respectivos espectros no domínio da frequência, utilizadas para a estimativa de  $Q$

Segundo Tokzöz & Johnston (1981), é razoável assumir que em uma grande faixa de frequência, o termo  $\alpha(f)$  é linear, e o próprio método testa esta hipótese (Knopoff,

1964). Então, pode-se escrever:

$$\alpha(f) = \gamma f \quad (3.7)$$

onde  $\gamma$  é uma constante de proporcionalidade entre o coeficiente de atenuação e a frequência. A constante  $\gamma$  relaciona-se ao fator  $Q$  por:

$$Q = \frac{\pi}{\gamma V} \quad (3.8)$$

Calculando-se a razão entre as amplitudes das equações 3.6, observando-se a relação apresentada na equação 3.7, reconhecendo-se a distância percorrida pela onda como sendo o comprimento da amostra ( $l$ ) e descartando-se as exponenciais complexas, obtêm-se:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{G_1}{G_2} e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)fl} \quad (3.9)$$

e aplicando o logaritmo de ambos os lados, tem-se:

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = (\gamma_2 - \gamma_1)lf + \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (3.10)$$

Quando o termo  $G_1/G_2$  é independente da frequência, e os ensaios são cuidadosamente elaborados para que esta premissa seja válida, o termo  $(\gamma_2 - \gamma_1)l$  pode ser encontrado diretamente a partir do coeficiente angular do ajuste do logaritmo natural da razão espectral das amplitudes em função da frequência (observe que a equação 3.10 é a equação de uma reta, quando o termo  $G_1/G_2$  é independente da frequência), como ilustrado na fig. 13.

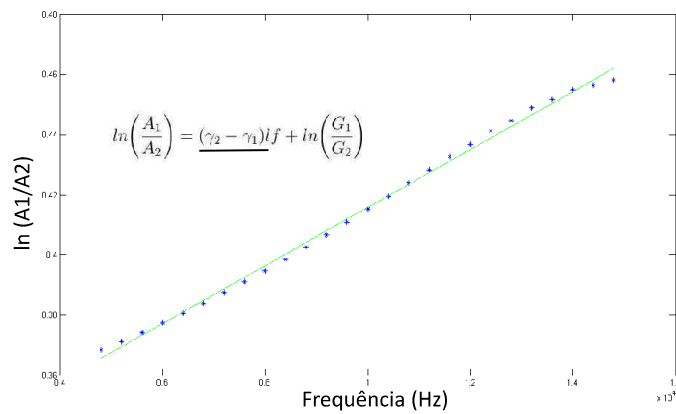


Figura 12 – Exemplo da obtenção do termo  $(\gamma_2 - \gamma_1)l$ .

### 3.3.2 Deslocamento de Frequência

Nas formas de onda registradas pelo sistema AutoLab 500<sup>®</sup>, como realizado para o método da razão espectral, realiza-se a transformada de Fourier visando observar os espectros de amplitude no domínio da frequência. Em seguida utiliza-se um ajuste Gaussiano para determinar a frequência central, bem como a variância das frequências no sinal. Essas informações são necessárias para estimar o fator Q pelo método do shift de frequência, proposto por Quan & Harris (1997). Na figura 14 ilustra-se o procedimento para a obtenção dos parâmetros necessários à estimativa do fator de qualidade pelo método do deslocamento de frequência.

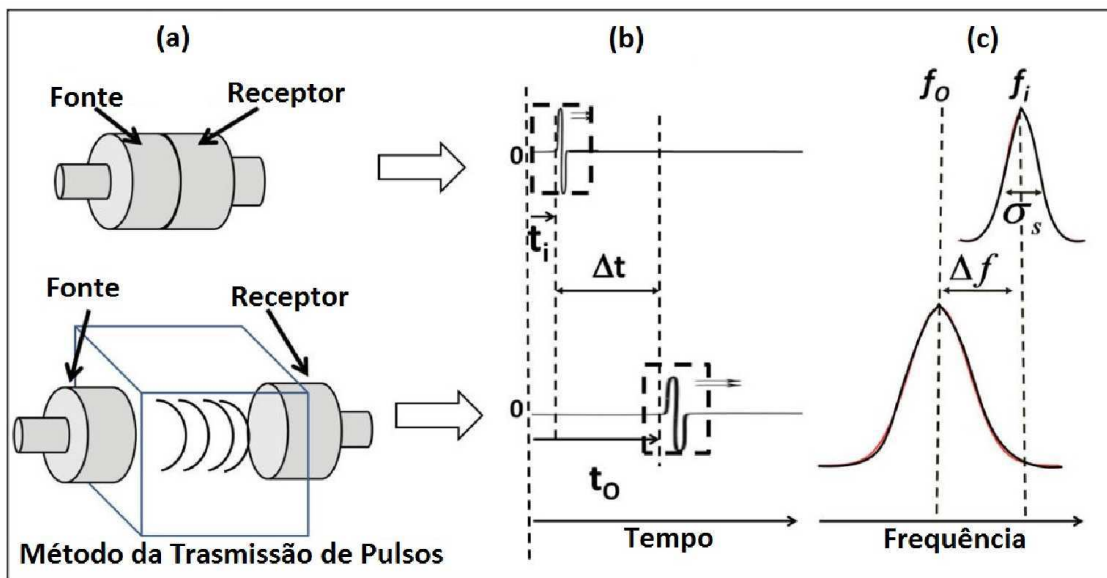


Figura 13 – (a) Representação esquemática do ensaio sem amostra e com amostra. (b) Sinal obtido da propagação no sistema sem amostra (superior) e com amostra (inferior). (c) Os correspondentes espectros no domínio da frequência (modificado de Figueiredo *et al.* (2013)).

Quan e Harris definem os centróides de frequência e a variância da fonte e receptor, respectivamente, como:

$$f_i = \frac{\int f S(f) df}{\int S(f) df} \quad (3.11a)$$

$$f_o = \frac{\int f R(f) df}{\int R(f) df} \quad (3.11b)$$

$$\sigma_s^2 = \frac{\int (f - f_i)^2 S(f) df}{\int S(f) df} \quad (3.11c)$$

onde  $f_i$  é a frequência central do sinal de entrada, ou seja, do sistema,  $f_o$  é a frequência central do sinal que percorre a amostra,  $S(f)$  é o espectro de amplitude no domínio da

frequência das ondas registradas para o sistema,  $R(f)$  o espectro de amplitude no domínio da frequência das ondas registradas para a amostra e  $\sigma_s^2$  é a variância do sinal, no domínio da frequência, registrado para o sistema.

Pelo método do shift de frequência, o fator Q é determinado pela comparação entre as frequências centrais de uma onda registrada em um ensaio fonte-receptor e outra registrada em um ensaio fonte-amostra-receptor. Ou seja, estima-se o quanto a amostra atenua a onda inicial do sistema, observando-se a variação das frequências. Assim, segundo Matsushima *et al.* (2011), o fator de qualidade Q pode ser determinado por:

$$Q = \frac{\sigma_s^2 \pi \Delta t}{\Delta f} \quad (3.12)$$

onde  $\Delta t$  é a diferença entre os tempos de percurso para as duas ondas em questão e  $\Delta f$  a diferença entre as frequências centrais ( $f_i - f_o$ ) dessas ondas.

### 3.3.3 Software para Estimativa do Fator Q

Durante a análise dos dados registrados pelo sistema AutoLab 500<sup>®</sup>, foi desenvolvido um software para auxiliar na estimativa dos fatores Q das diversas amostras.

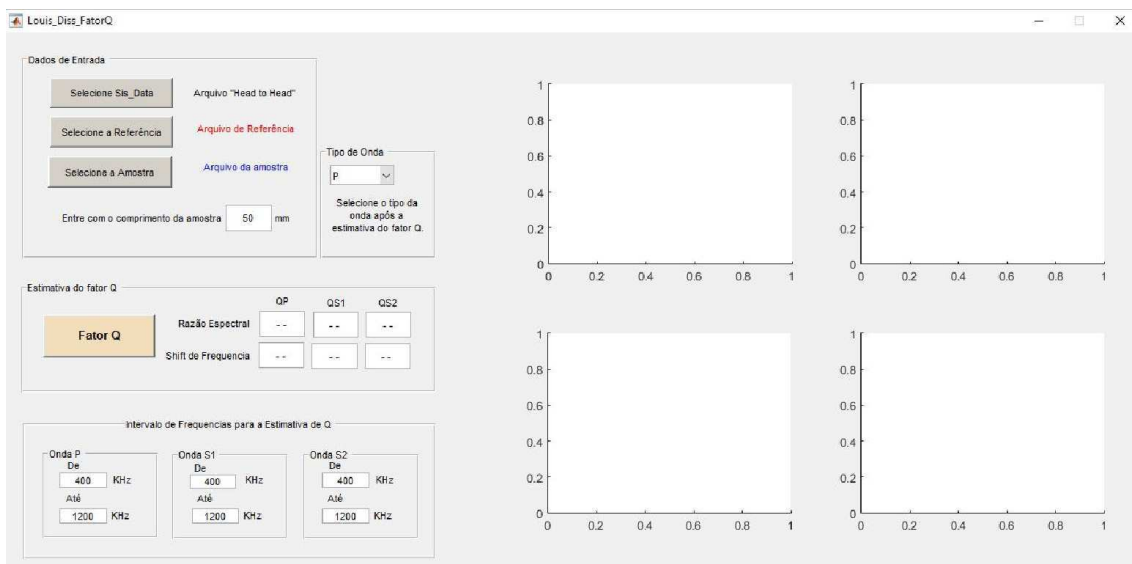


Figura 14 – Tela inicial do software desenvolvido para a estimativa do fator Q.

Desenvolvido em linguagem *MatLab*<sup>®</sup> de programação, o software estima o fator de qualidade Q utilizando ambos os métodos discutidos anteriormente. Os parâmetros de entrada são, conforme apresentado na figura 15: a forma de onda registrada para os transdutores, a registrada para a amostra de referência, a registrada para a amostra de rocha e o comprimento da amostra. Pode-se ainda determinar o intervalo de frequência adequado para cada tipo de onda registrada. A saída gráfica, ilustrada na figura 16, permite

a visualização das principais etapas para a estimativa do fator Q, para os diferentes tipos de onda.

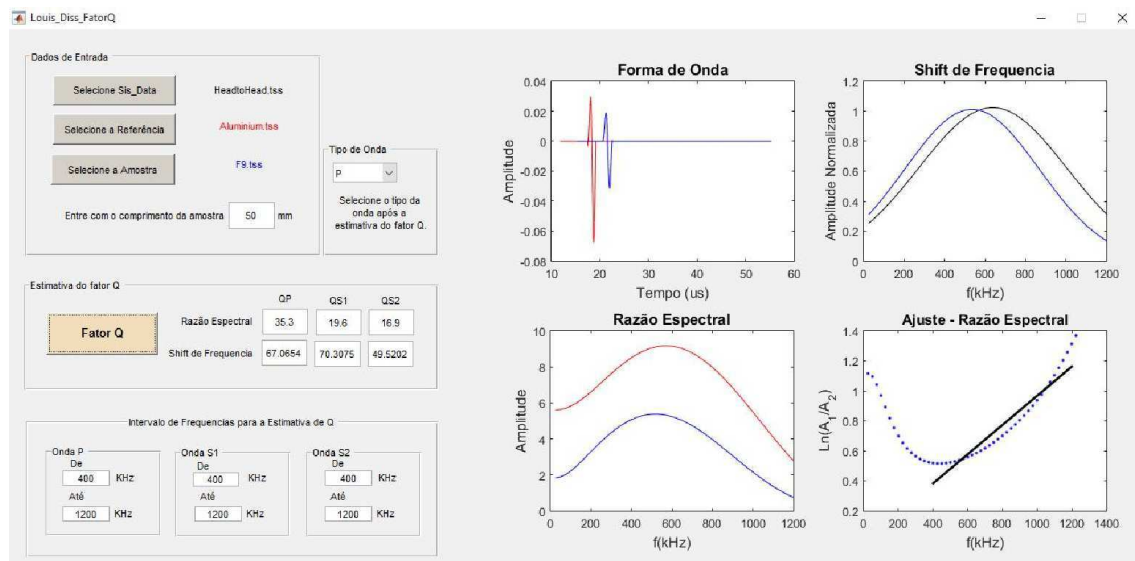


Figura 15 – Captura de tela do software após a estimativa do fator Q para a amostra de rocha F9.

No Anexo C encontram-se os algoritmos utilizados para a estimativa do fator Q pelos diferentes métodos apresentados.



## 4 Resultados e Discussões

Um conjunto de 145 amostras foi preparado no Laboratório de Petrofísica da UFCG. Todas as amostras foram secas em estufa a 80°C por 24 horas e passaram pelos ensaios de petrofísica básica e de velocidades de propagação de ondas elásticas, obtendo-se os valores para a densidade total, densidade de grãos, porosidade, permeabilidade e velocidade de propagação das ondas P, S1 e S2. Seguida a estas medidas, foram realizadas as estimativas dos valores do fator Q. Estas estimativas foram obtidas através de dois métodos distintos: razão espectral (BOURBIÉ *et al.*, 1987) e deslocamento de frequência (QUAN; HARRIS, 1997). Ambos os métodos são frequentemente utilizados na geofísica de exploração e, embora baseiem-se em princípios diferentes, em geral, fornecem resultados semelhantes. Assim, faz-se neste capítulo, além da apresentação e discussão dos resultados, uma comparação entre os resultados dos métodos citados acima.

Nas primeiras seções deste capítulo discute-se o comportamento sísmico das amostras em função da pressão de confinamento, apresentando os principais fatores que possivelmente afetam as medidas em diferentes pressões. Em seguida, discute-se o comportamento global das amostras de rochas da Bacia do Rio do Peixe, com ênfase nas velocidades e atenuações elásticas, como funções das outras propriedades medidas.

De forma a compreender a distribuição das diversas amostras, para as análises das seções iniciais deste capítulo, divide-se o conjunto de amostras em três grupos, relativo à situação *in situ* na qual se encontravam: amostras de afloramentos; amostras dos poços UFRJ e amostras do poço UFCG.

### 4.1 Amostras de Afloramento

As amostras de afloramento mostraram-se menos sensíveis à variação de velocidades em função da pressão. Nas figuras 17 a 24 ilustram-se, para algumas destas amostras, o comportamento das velocidades, compressionais e cisalhantes, dos respectivos módulos elásticos e do fator de qualidade Q, em função da pressão de confinamento.

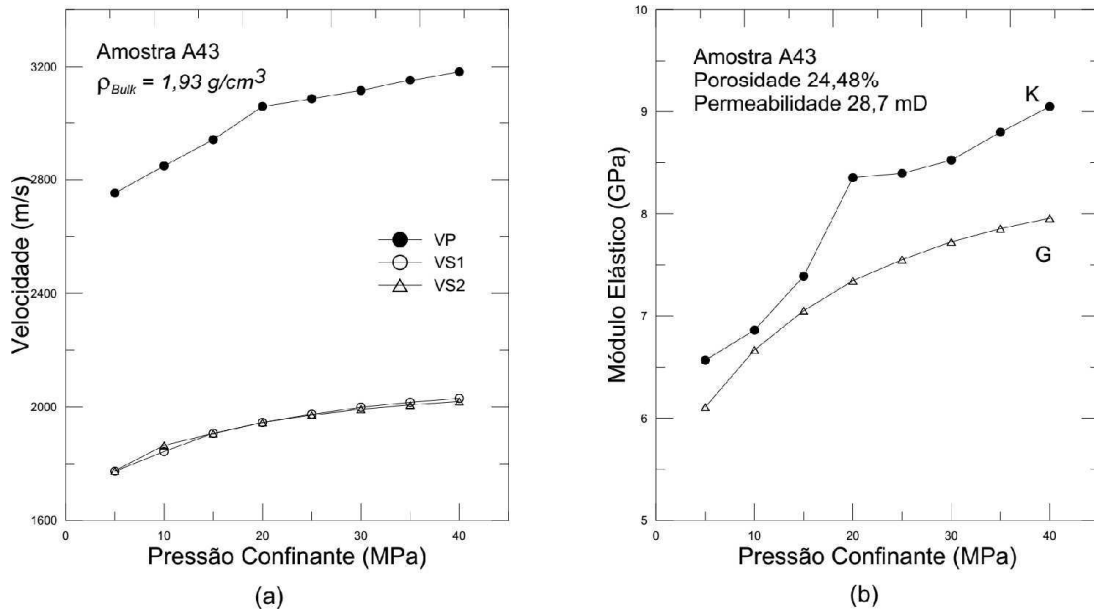


Figura 16 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A43.

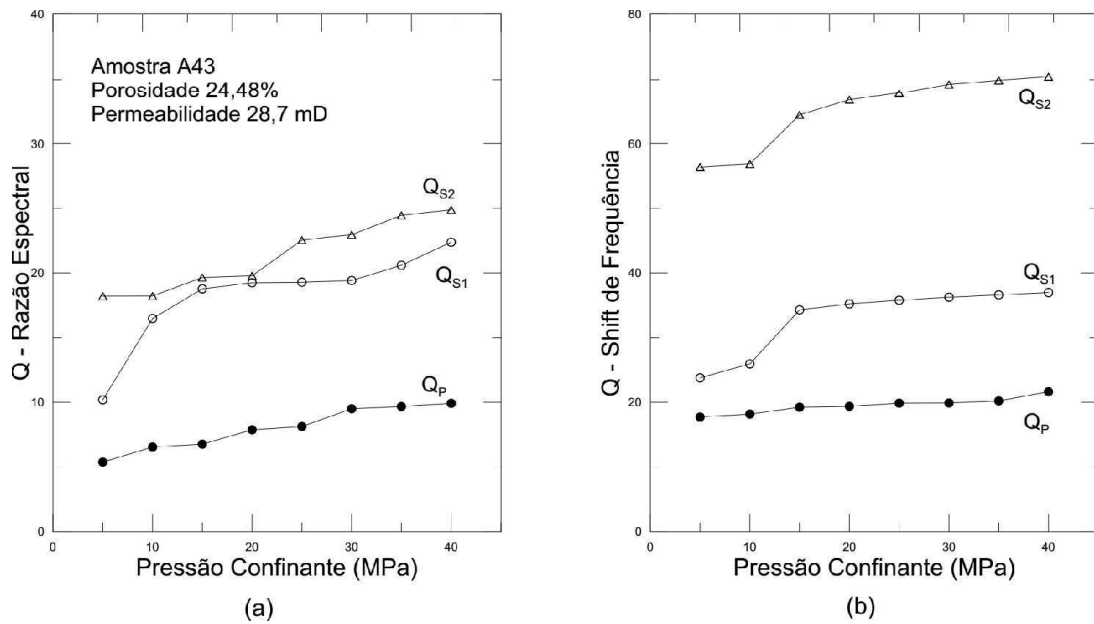


Figura 17 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A43.

Para a amostra A43, figuras 17 e 18, a variação das velocidades de propagação é

em torno de 15%, onde a primeira medida é tomada à 40MPa de pressão de confinamento, enquanto os módulos elásticos variam aproximadamente 26%. Já o fator de qualidade, obtido pelo método da razão espectral, apresenta variação média de 50% para as ondas do tipo P e S1, e 28% para a onda S2. Para o fator de qualidade, obtido pelo método do deslocamento de frequência, a variação é menos significativa, apresentando para onda do tipo P um valor de 10%, aproximadamente. Já para as ondas do tipo S1 e S2 as variações são em torno de 40 e 18%, respectivamente. Nota-se, porém, que as estimativas a 5 e 10MPa são as responsáveis por essa variação mais significativa.

Nas figuras 19 e 20 observa-se o comportamento da amostra A73, uma amostra horizontal (paralela ao plano de acamamento) de arenito sem deformações. Observa-se que, para as pressões confinantes mais altas, os valores das velocidades de propagação e dos módulos elásticos são semelhantes. Entretanto, as variações são maiores (acima de 20% para as velocidades e maiores que 30% para os módulos elásticos). Já para as estimativas do fator de qualidade, além de maiores valores, observa-se também uma maior variação (acima de 60% para o método da razão espectral). Tais resultados corroboram com os reportados na literatura, mostrando que o fator de qualidade é mais sensível às estruturas presentes na rocha, como por exemplo o acamamento presente na amostra A73, mesmo quando não é possível observar diferenças significativas nas velocidades de propagação.

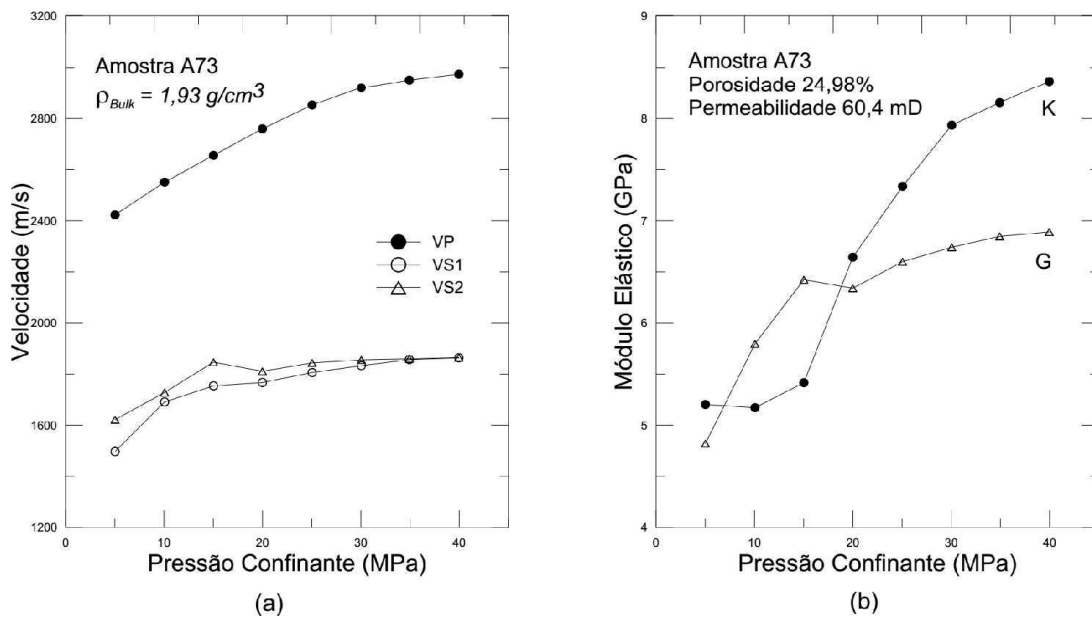


Figura 18 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A73.

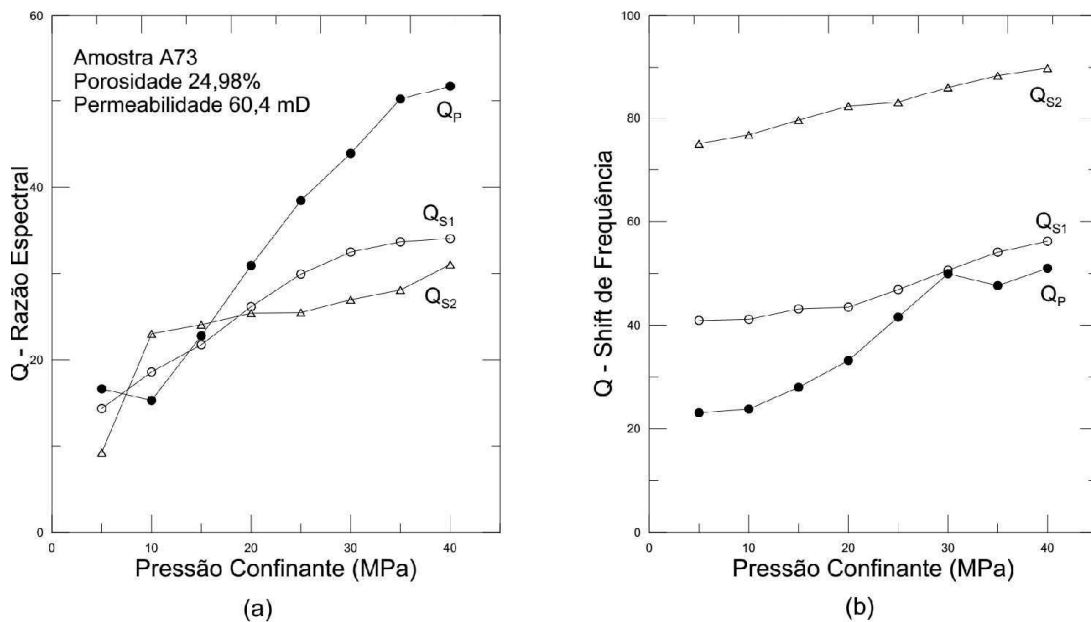


Figura 19 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A73.

Nas figuras 21 e 22 ilustra-se o comportamento da amostra F23 para as diferentes condições de pressão confinante. Para esta amostra as velocidades de propagação são similares àquelas obtidas para os arenitos, com  $V_P$  em torno de  $3500\text{m/s}$  e  $V_S$  (ambas S1 e S2) aproximadamente  $2250\text{m/s}$ , a 40 MPa. Já os valores dos módulos elásticos alcançam 12 e 10 GPa, para os módulos de incompressibilidade e de rigidez, respectivamente, com variações maiores que 30%. Ressalta-se, porém, que a porosidade e a permeabilidade desta amostra são bastante reduzidas. Tal resultado é esperado para amostras de folhelhos, como a F23. Para as estimativas do fator de qualidade, valores concordantes com a literatura foram obtidos. Para o método da razão espectral,  $Q_P = 15$  e  $Q_S = 30$  (para ambas as ondas do tipo S), com variação de 33 e 16% à medida que se reduz a pressão confinante. Já para o método do shift de frequência, os valores máximos obtidos foram 30, 42 e 83 para  $Q_P$ ,  $Q_{S1}$  e  $Q_{S2}$ , respectivamente.

Para a amostra F25, uma amostra horizontal (*cf.* figuras 23 e 24), ou seja, com o eixo longitudinal paralelo às camadas, as velocidades de propagação são bastante elevadas, quando comparadas ao comportamento geral para os folhelhos, chegando a  $5000\text{m/s}$  para a  $V_P$  e aproximadamente  $3000\text{m/s}$  para as ondas do tipo S. Os módulos elásticos chegam a 32 e 22 GPa, para os módulos de incompressibilidade e de rigidez, respectivamente. As variações com a pressão de confinamento são em torno de 10% para as velocidades e, aproximadamente, 20% para os módulos elásticos. Tal comportamento é associado à

cimentação carbonática, que eleva a densidade e altera o comportamento mecânico da amostra, tornando os contatos entre os grãos mais eficazes. Já as estimativas do fator de qualidade são compatíveis em módulo e variação para ambos os métodos utilizados.

A Tabela 2 apresenta os resultados das medidas em laboratório para as amostras oriundas dos afloramentos da BRP.

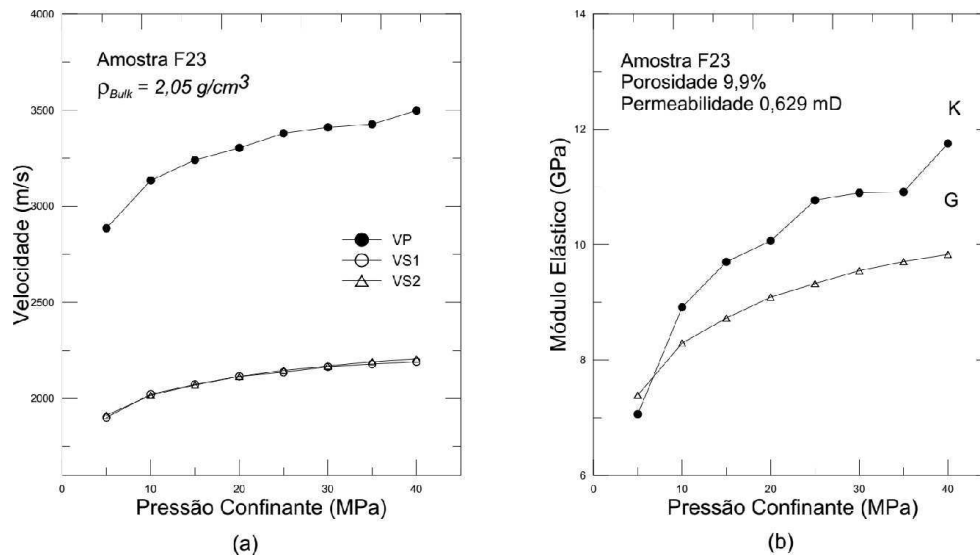


Figura 20 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F23.

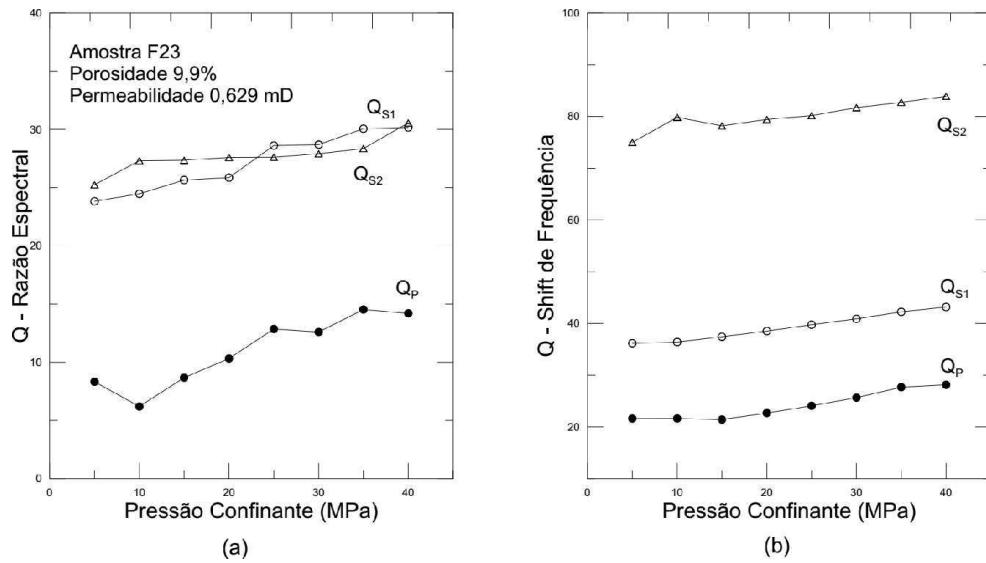


Figura 21 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F23.

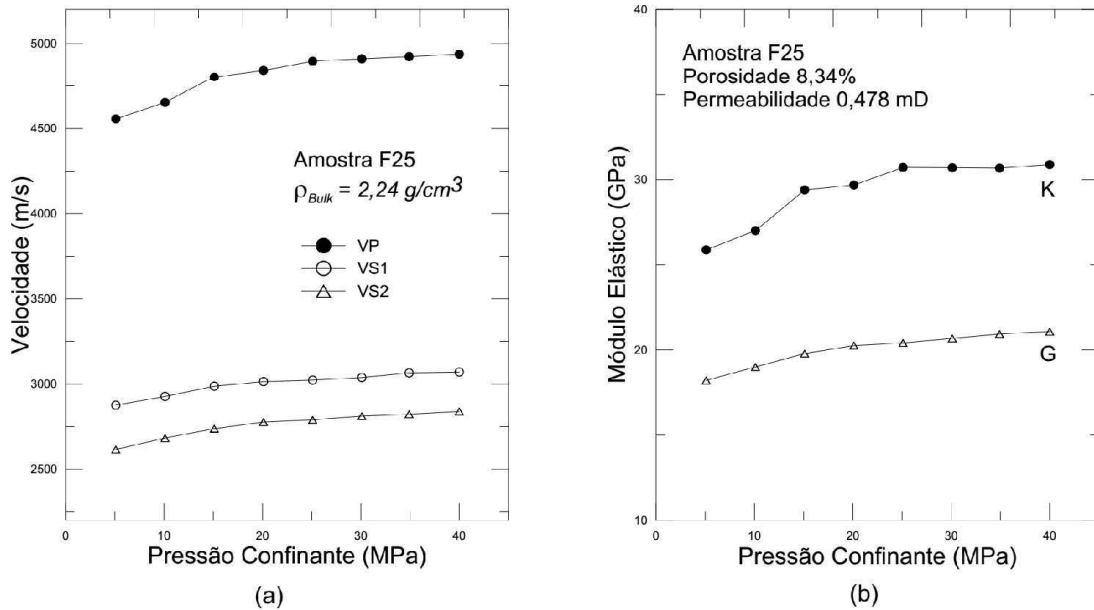


Figura 22 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F25.

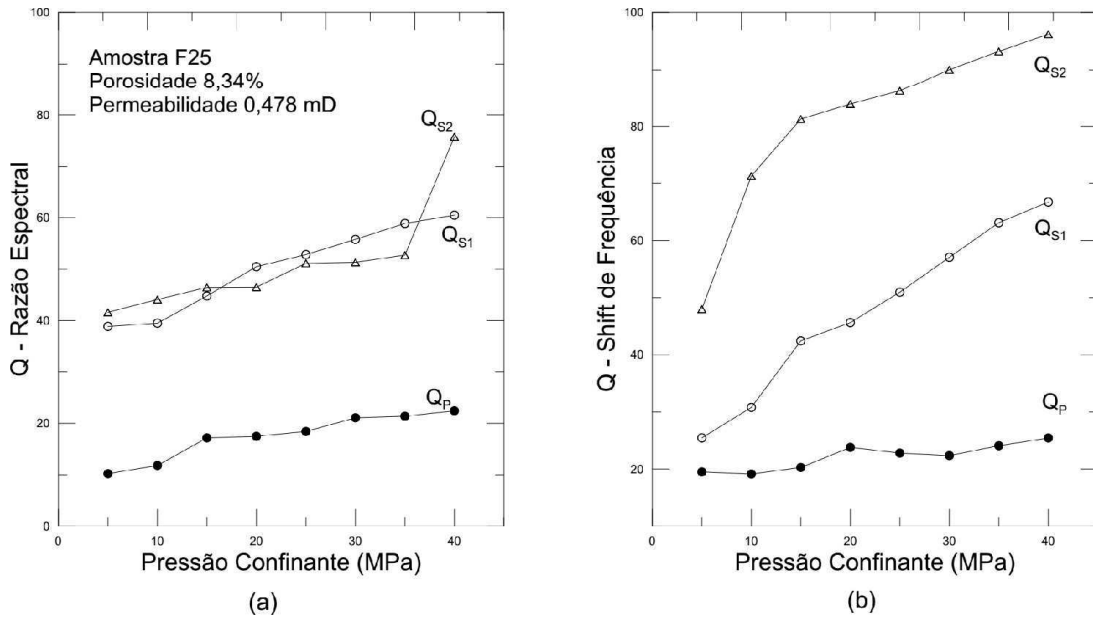


Figura 23 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F25.

Nas tabelas deste capítulo, onde são listados os resultados,  $\phi$  é a porosidade,  $\kappa$  a permeabilidade,  $\rho_g$  a densidade de grãos,  $\rho_b$  a densidade total e  $V_P$ ,  $V_{S1}$  e  $V_{S2}$  são as velocidades de propagação para as ondas P, S1 e S2, respectivamente.

Tabela 2 – Medidas em laboratório para as amostras dos afloramentos da BRP (velocidades obtidas à pressão confinante de 40 MPa).

| Amostra | $\phi$<br>(%) | $\kappa$<br>(mD) | $\rho_G$<br>( $g/cm^3$ ) | $\rho_b$<br>( $g/cm^3$ ) | Vp<br>(m/s) | Vs1<br>(m/s) | Vs2<br>(m/s) |
|---------|---------------|------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|--------------|--------------|
| A10     | 7,90          | 0,0417           | 2,60                     | 2,41                     | 4315        | 2631         | 2657         |
| A11     | 18,63         | 9,82             | 2,60                     | 2,16                     | 3398        | 2154         | 2205         |
| A12     | 20,75         | 63,9             | 2,60                     | 2,14                     | 3341        | 2054         | 2138         |
| A13     | 17,13         | 40,5             | 2,60                     | 2,20                     | 3553        | 2140         | 2200         |
| A14     | 18,68         | 11,5             | 2,59                     | 2,10                     | 3127        | 2022         | 2023         |
| A15     | 2,52          | 0,0001           | 2,63                     | 2,57                     | 5132        | 3057         | 3067         |
| A16     | 26,22         | 60               | 2,61                     | 1,91                     | 3336        | 2108         | 2106         |
| A17     | 30,06         | 0,0001           | 2,77                     | 1,93                     | 2923        | 1861         | 1858         |
| A18     | 14,46         | 47,3             | 2,59                     | 2,53                     | 3979        | 2518         | 2458         |
| A19     | 12,69         | 30,1             | 2,59                     | 2,24                     | 4349        | 2754         | 2735         |
| A20     | 12,30         | 34               | 2,60                     | 2,28                     | 4340        | 2723         | 2707         |
| A21     | 4,21          | 0,0001           | 2,63                     | 2,48                     | 3804        | 2344         | 2322         |
| A22     | 11,87         | 0,0265           | 2,63                     | 2,42                     | 3619        | 1978         | 2071         |
| A23     | 11,00         | 0,0432           | 2,63                     | 2,34                     | 3789        | 2340         | 2160         |
| A24     | 7,39          | 0,0002           | 2,63                     | 2,44                     | 3721        | 2314         | 2299         |
| A25     | 18,38         | 43,9             | 2,59                     | 2,05                     | 3926        | 2575         | 2495         |
| A26     | 12,31         | 0,013            | 2,58                     | 2,27                     | 3950        | 2397         | 2409         |
| A27     | 16,20         | 0,0532           | 2,59                     | 2,17                     | 3826        | 2435         | 2390         |
| A28     | 2,81          | 0,0025           | 2,61                     | 2,53                     | 4986        | 3246         | 3235         |
| A29     | 1,94          | 0,0001           | 2,59                     | 2,52                     | 5817        | 3654         | 3628         |
| A30     | 2,82          | 0,0001           | 2,59                     | 2,53                     | 5675        | 3576         | 3602         |
| A31     | 3,89          | 0,0002           | 2,60                     | 2,51                     | 5347        | 3368         | 3390         |
| A32     | 4,89          | 0,005            | 2,61                     | 2,45                     | 5260        | 3309         | 3269         |
| A33     | 2,48          | 0,0025           | 2,62                     | 2,56                     | 5382        | 3277         | 3196         |
| A34     | 1,20          | 0,0001           | 2,62                     | 2,59                     | 5529        | 3334         | 3267         |
| A35     | 2,02          | 0,0001           | 2,62                     | 2,54                     | 5530        | 3308         | 3276         |
| A36     | 17,30         | 0,083            | 2,69                     | 2,52                     | 4059        | 1831         | 2074         |
| A37     | 18,24         | 0,0181           | 2,67                     | 2,18                     | 3426        | 2146         | 2155         |
| A38     | 16,42         | 0,176            | 2,67                     | 2,23                     | 4053        | 2404         | 2205         |
| A39     | 15,71         | 0,017            | 2,66                     | 2,21                     | 3812        | 2405         | 2377         |
| A40     | 13,69         | 0,0001           | 2,67                     | 2,28                     | 3841        | 2448         | 2425         |
| A41     | 23,41         | 37               | 2,57                     | 1,97                     | 3257        | 2062         | 2071         |
| A42     | 23,09         | 28,7             | 2,57                     | 1,98                     | 3289        | 2038         | 2052         |
| A43     | 24,48         | 28,7             | 2,58                     | 1,93                     | 3183        | 2030         | 2019         |
| A44     | 9,18          | 0,11             | 2,58                     | 2,34                     | 4911        | 2910         | 2877         |
| A45     | 9,03          | 0,0474           | 2,60                     | 2,37                     | 4776        | 2849         | 2862         |
| A46     | 9,01          | 0,004            | 2,61                     | 2,37                     | 4629        | 2805         | 2762         |
| A47     | 9,67          | 0,0684           | 2,60                     | 2,34                     | 3624        | 2195         | 2103         |
| A48     | 12,47         | 0,347            | 2,59                     | 2,26                     | 4332        | 2631         | 2616         |
| A49     | 8,35          | 0,0172           | 2,60                     | 2,39                     | 4583        | 2763         | 2773         |
| A50     | 10,42         | 0,333            | 2,59                     | 2,32                     | 4599        | 2710         | 2856         |



Tabela 2 (Continuação).

| Amostra | $\phi$<br>(%) | $\kappa$<br>(mD) | $\rho_G$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\rho_b$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Vp<br>(m/s) | Vs1<br>(m/s) | Vs2<br>(m/s) |
|---------|---------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| A51     | 12,24         | 1,22             | 2,60                             | 2,28                             | 4444        | 2647         | 2683         |
| A52     | 11,13         | 0,538            | 2,59                             | 2,30                             | 4553        | 2720         | 2695         |
| A53     | 11,99         | 2,89             | 2,59                             | 2,28                             | 4443        | 2673         | 2608         |
| A54     | 19,75         | 112,4            | 2,58                             | 2,07                             | 3838        | 2376         | 2317         |
| A55     | 18,04         | 3,09             | 2,60                             | 2,13                             | 3835        | 2340         | 2292         |
| A56     | 13,17         | 0,689            | 2,60                             | 2,26                             | 4167        | 2594         | 2546         |
| A57     | 11,53         | 0,36             | 2,60                             | 2,30                             | 4088        | 2471         | 2547         |
| A58     | 11,35         | 0,0107           | 2,60                             | 2,31                             | 4284        | 2659         | 2642         |
| A59     | 17,60         | 1,8              | 2,66                             | 2,19                             | 3366        | 2020         | 2047         |
| A60     | 21,85         | 36,8             | 2,64                             | 2,06                             | 3278        | 2041         | 2004         |
| A61     | 17,03         | 1,28             | 2,63                             | 2,18                             | 3289        | 2034         | 2060         |
| A62     | 17,74         | 0,0727           | 2,60                             | 2,14                             | 3410        | 2112         | 2052         |
| A63     | 20,68         | 27,8             | 2,60                             | 2,06                             | 3150        | 1942         | 1918         |
| A64     | 15,16         | 0,0028           | 2,63                             | 2,23                             | 3415        | 2159         | 2147         |
| A65     | 12,39         | 0,0472           | 2,59                             | 2,27                             | 3971        | 2425         | 2464         |
| A66     | 12,35         | 0,0177           | 2,60                             | 2,28                             | 4017        | 2500         | 2437         |
| A67     | 12,71         | 0,08             | 2,60                             | 2,27                             | 3971        | 2448         | 2464         |
| A68     | 12,69         | 0,146            | 2,59                             | 2,26                             | 4015        | 2440         | 2517         |
| A69     | 23,06         | 16,7             | 2,58                             | 1,98                             | 3210        | 1942         | 1932         |
| A70     | 23,65         | 3,82             | 2,61                             | 1,99                             | 3099        | 1906         | 1896         |
| A71     | 24,37         | 10,3             | 2,60                             | 1,96                             | 3122        | 1896         | 1895         |
| A72     | 24,77         | 19,3             | 2,57                             | 1,94                             | 3049        | 1917         | 1901         |
| A73     | 24,98         | 60,4             | 2,57                             | 1,93                             | 2976        | 1864         | 1865         |
| A74     | 24,37         | 42,4             | 2,58                             | 1,95                             | 3035        | 1887         | 1786         |
| A75     | 17,27         | 1,04             | 2,59                             | 2,14                             | 3930        | 2349         | 2311         |
| A76     | 15,83         | 0                | 2,58                             | 2,17                             | 4004        | 2619         | 2570         |
| A77     | 16,45         | 0,011            | 2,59                             | 2,17                             | 3656        | 2266         | 2262         |
| A78     | 20,66         | 0                | 2,62                             | 2,08                             | 3427        | 2078         | 2162         |
| A79     | 13,44         | 1,61             | 2,59                             | 2,25                             | 4186        | 2410         | 2560         |
| A80     | 14,30         | 0,0022           | 2,60                             | 2,23                             | 4129        | 2415         | 2396         |
| A81     | 14,70         | 12,5             | 2,59                             | 2,21                             | 4174        | 2559         | 2489         |
| A82     | 25,76         | –                | 2,57                             | 1,91                             | 3481        | 2107         | 2095         |
| A83     | 25,65         | 2,77             | 2,58                             | 1,92                             | 3315        | 1977         | 1998         |
| F10     | 15,50         | 0,536            | 2,64                             | 2,23                             | 3405        | 2759         | 2767         |
| F11     | 9,45          | 0                | 2,60                             | 2,35                             | 4388        | 2726         | 2691         |
| F12     | 11,17         | 0,0162           | 2,60                             | 2,31                             | 4381        | 2662         | 2677         |
| F13     | 2,06          | 0,0001           | 2,62                             | 2,65                             | 5369        | 3157         | 3264         |
| F14     | 15,48         | 0,667            | 2,63                             | 2,20                             | 3598        | 2317         | 2299         |
| F15     | 5,74          | 0,0001           | 2,75                             | 2,57                             | 4394        | 2663         | 2643         |
| F16     | 7,19          | 0,0002           | 2,75                             | 2,51                             | 4463        | 2706         | 2664         |
| F17     | 8,81          | 0,0001           | 2,74                             | 2,49                             | 4230        | 2574         | 2565         |
| F18     | 6,83          | 0,0001           | 2,74                             | 2,56                             | 4865        | 2762         | 2775         |
| F19     | 9,73          | 0,0001           | 2,74                             | 2,42                             | 4084        | 2491         | 2448         |

Tabela 2 (Continuação).

| Amostra | $\phi$<br>(%) | $\kappa$<br>(mD) | $\rho_g$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\rho_b$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Vp<br>(m/s) | Vs1<br>(m/s) | Vs2<br>(m/s) |
|---------|---------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| F20     | 16,77         | 0,585            | 2,62                             | 2,32                             | 3341        | 1845         | 1962         |
| F21     | 17,70         | 0,0957           | 2,62                             | 1,86                             | 3199        | 1858         | 1605         |
| F22     | 17,00         | 0,0753           | 2,61                             | 2,12                             | 2991        | 1818         | 1791         |
| F23     | 22,12         | 15,3             | 2,63                             | 2,05                             | 3497        | 2191         | 2206         |
| F24     | 9,90          | 0,0629           | 2,62                             | 2,36                             | 4240        | 2609         | 2598         |
| F25     | 8,34          | 0,478            | 2,64                             | 2,24                             | 4940        | 3070         | 2839         |
| F26     | 6,98          | 0,19             | 2,64                             | 2,42                             | 5154        | 3018         | 3150         |
| F27     | 9,35          | 0,0011           | 2,64                             | 2,38                             | 4302        | 2661         | 2658         |
| F28     | 11,75         | 24,2             | 2,63                             | 2,41                             | 4094        | 2454         | 2548         |
| F29     | 0,86          | 0,0001           | 2,62                             | 2,57                             | 4888        | 2961         | 2927         |
| F30     | 7,20          | 0,009            | 2,65                             | 2,56                             | 5015        | 3066         | 3196         |
| F31     | 7,29          | 0,0005           | 2,65                             | 2,42                             | 4366        | 2707         | 2673         |
| F32     | 18,18         | 20,8             | 2,65                             | 2,16                             | 5046        | 3008         | 3001         |
| F33     | 11,60         | 0,106            | 2,65                             | 2,34                             | 4116        | 2592         | 2588         |

## 4.2 Amostras dos Poços UFRJ-2-SS-1-PB e UFRJ-2-FC-PB

Para as amostras oriundas dos poços perfurados pela UFRJ observa-se que os arenitos apresentam comportamento semelhante àquele dos afloramentos. O que pode ser explicado pela proximidade destas amostras com aquelas das zonas de amostragem, já que o poço que contemplou os arenitos da formação Antenor Navarro tem sua profundidade máxima a 30m da superfície. Já para os folhelhos, foram obtidas amostras de até, aproximadamente, 200m de profundidade. Visto que para amostras mais profundas a pressão é maior, devido ao peso das camadas de rocha acima, a retirada de tais amostras para a superfície pode gerar uma série de microfaturas, como consequência do alívio da pressão, além da expansão dos poros. Assim, os ensaios em laboratório, que visam recuperar a condição inicial de pressão na rocha, podem apresentar variações mais significativas para amostras mais profundas, quando comparadas àquelas oriundas de afloramento. Entretanto, tal fato não é observado nas amostras de folhelhos deste conjunto de amostras, onde as variações nas velocidades de propagação são de, no máximo, 9%.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios em laboratório para as amostras oriundas dos poços perfurados pela UFRJ.

Tabela 3 – Medidas em laboratório para as amostras oriundas dos poços perfurados pela UFRJ (velocidades obtidas à pressão confinante de 40 MPa).

| Amostra | $\phi$<br>(%) | $\kappa$<br>(mD) | $\rho_G$<br>( $g/cm^3$ ) | $\rho_b$<br>( $g/cm^3$ ) | Vp<br>(m/s) | Vs1<br>(m/s) | Vs2<br>(m/s) |
|---------|---------------|------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|--------------|--------------|
| A1      | 9,96          | 0,0505           | 2,60                     | 2,34                     | 3530        | 2184         | 2204         |
| A2      | 9,66          | 0,0001           | 2,62                     | 2,37                     | 3309        | 2074         | 2049         |
| A3      | 13,21         | 0,0001           | 2,58                     | 2,24                     | 2929        | 1806         | 1791         |
| A4      | 10,53         | 1,73             | 2,61                     | 2,33                     | 4273        | 2664         | 2700         |
| A5      | 9,57          | 1,2              | 2,60                     | 2,35                     | 4562        | 2835         | 2829         |
| A6      | 11,11         | 0,0991           | 2,61                     | 2,32                     | 3788        | 2310         | 2306         |
| A7      | 15,81         | 57               | 2,57                     | 2,16                     | 3786        | 2372         | 2310         |
| A8      | 10,75         | 1,56             | 2,60                     | 2,32                     | 4227        | 2648         | 2541         |
| A9      | 12,32         | 0,0076           | 2,61                     | 2,30                     | 3319        | 2052         | 2018         |
| F1      | 10,26         | 0,0001           | 2,54                     | 2,26                     | 3475        | 2139         | 2127         |
| F2      | 7,20          | 0,0001           | 2,52                     | 2,33                     | 3579        | 2234         | 2232         |
| F3      | 9,05          | 0,0001           | 2,53                     | 2,30                     | 3345        | 2083         | 2079         |
| F5      | 4,65          | 0,0001           | 2,53                     | 2,41                     | 3091        | 1992         | 1994         |
| F6      | 5,29          | 0,0001           | 2,52                     | 2,38                     | 3089        | 1976         | 1981         |
| F7      | 10,78         | 0,0001           | 2,53                     | 2,25                     | 3318        | 2106         | 1997         |
| F8      | 10,52         | 0,0001           | 2,53                     | 2,26                     | 3390        | 2095         | 2098         |
| F9      | 10,28         | 0,0001           | 2,52                     | 2,25                     | 3350        | 2080         | 2090         |

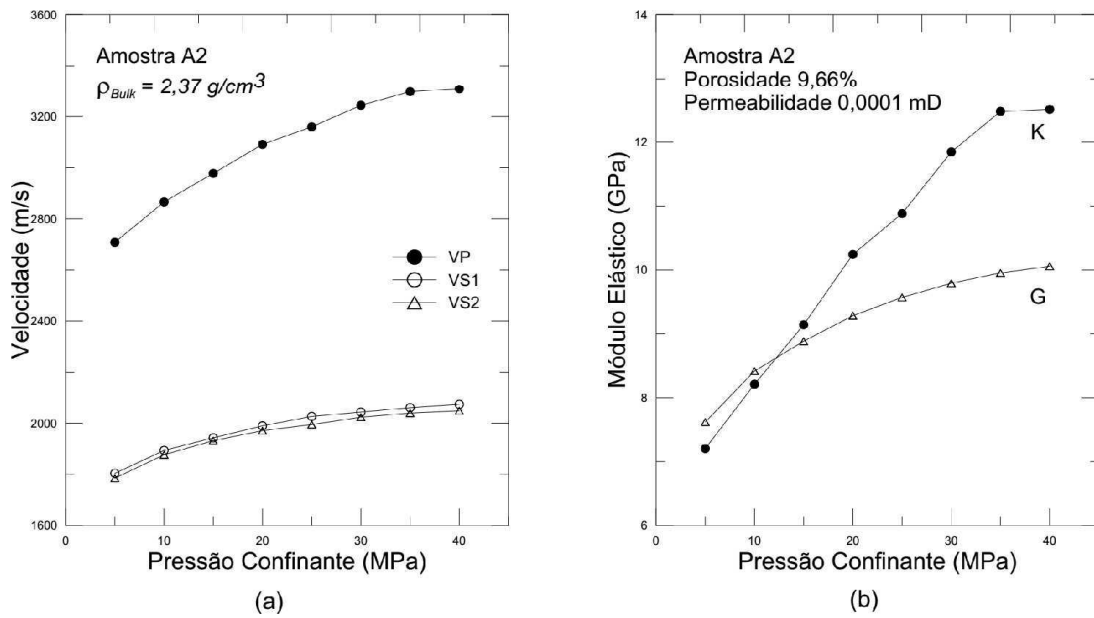


Figura 24 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A2.

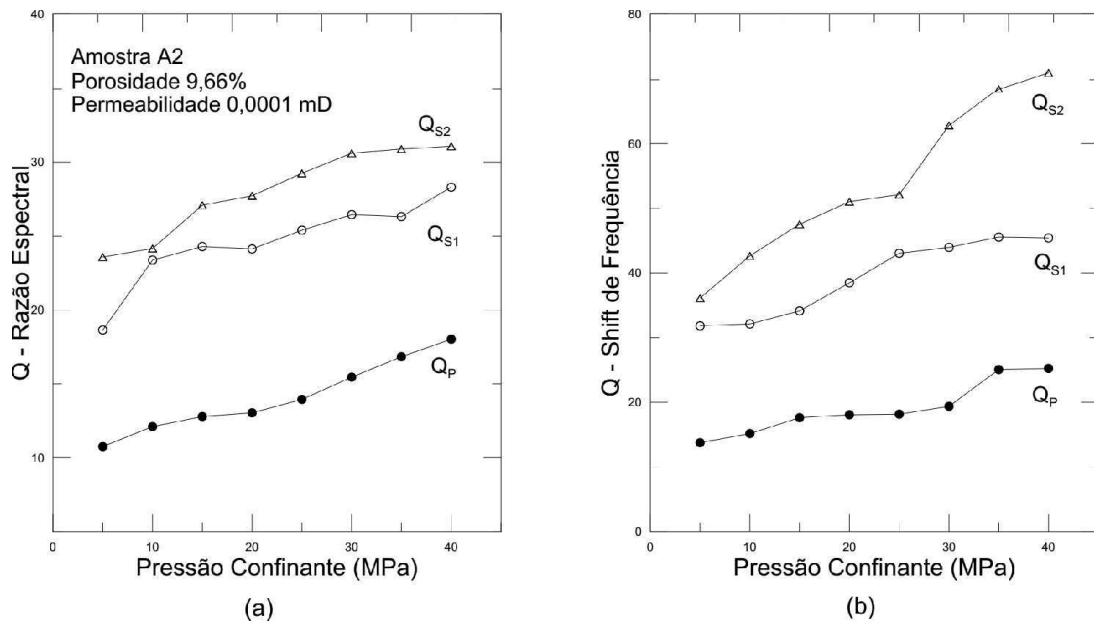


Figura 25 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A2.

Nas figuras 25 e 26, o comportamento da amostra A2 é ilustrado. Observa-se para

as velocidades de propagação um comportamento similar aquele registrado para os arenitos oriundos de afloramento, com  $V_P$  variando de 2700 a 3300  $m/s$  e  $V_S$  de 1800 a 2100  $m/s$ . Já os módulos elásticos alcançam 12,5 e 10 GPa, para os módulos de incompressibilidade e de rigidez, respectivamente. Para o fator de qualidade obteve-se os valores, à pressão confinante de 40 MPa, de 18, 28 e 31 para  $Q_P$ ,  $Q_{S1}$  e  $Q_{S2}$ , respectivamente, pelo método da razão espectral e 26, 45 e 70 pelo método do shift de frequência.

Nas figuras 27 e 28, ilustra-se o comportamento da amostra A6. Para as velocidades de propagação é possível observar valores levemente superiores à média registrada para os arenitos deste conjunto de amostras, com  $V_P$  alcançando 3780  $m/s$  e, para ambas as ondas do tipo S, velocidades de até 2310  $m/s$ . O módulo de incompressibilidade atinge 17 GPa, para 40MPa de pressão confinante, enquanto o módulo de rigidez chega aos 13 GPa. Para as estimativas do fator de qualidade, a variação média em função da pressão de confinamento é de 46%, com valores, a 40 MPa, pelo método da razão espectral, de 34, 39 e 45 para  $Q_P$ ,  $Q_{S1}$  e  $Q_{S2}$ , respectivamente. Já para o método do shift de frequência, obteve-se  $Q_P = 40$ ,  $Q_{S1} = 65$  e  $Q_{S2} = 78$ .

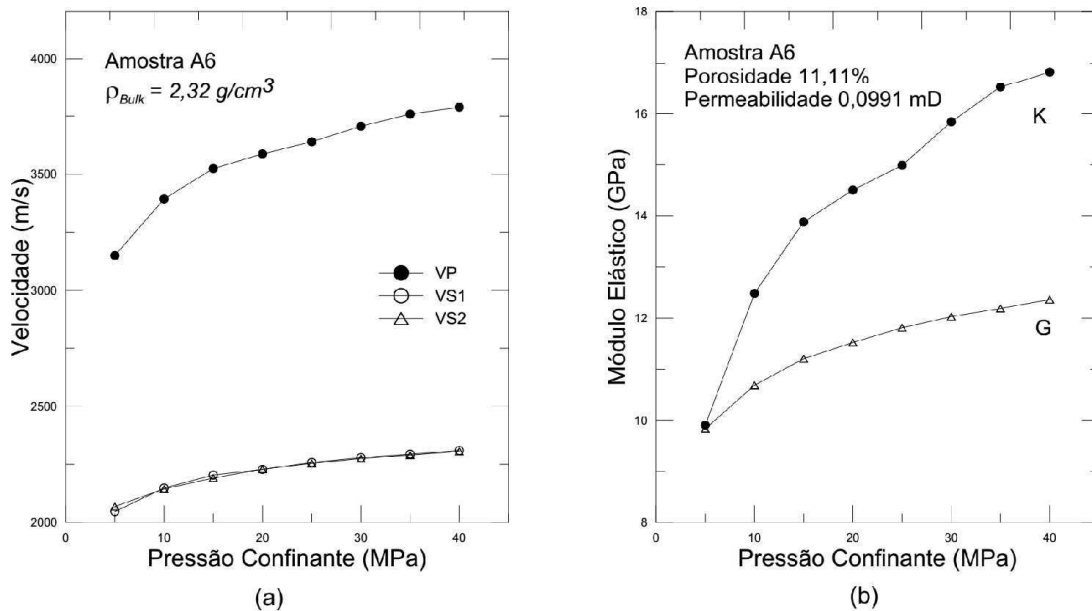


Figura 26 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A6.

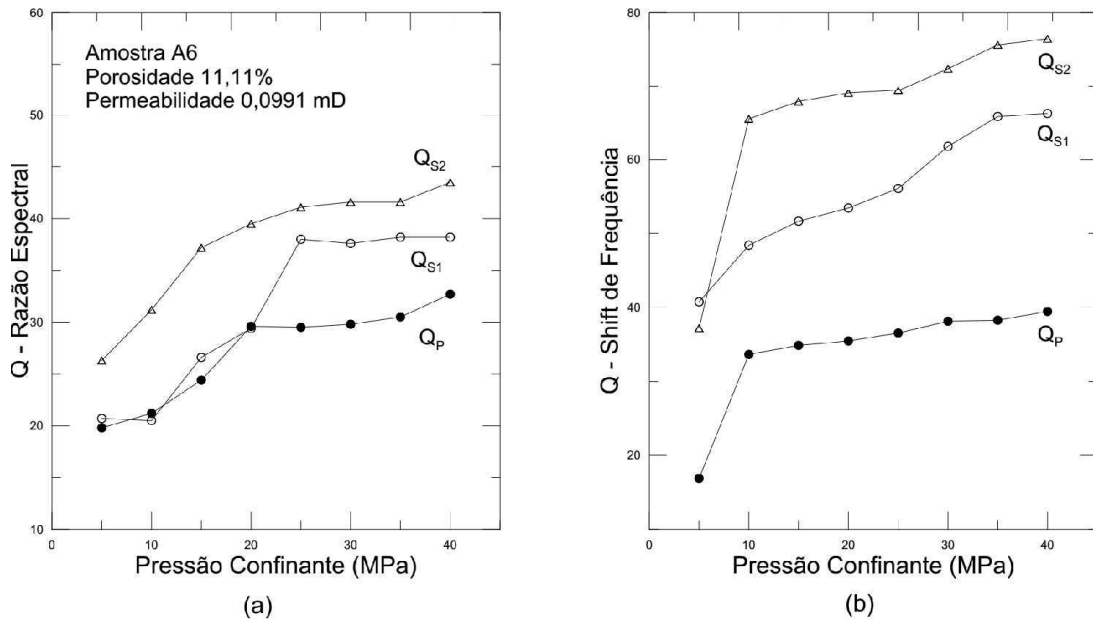


Figura 27 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A6.

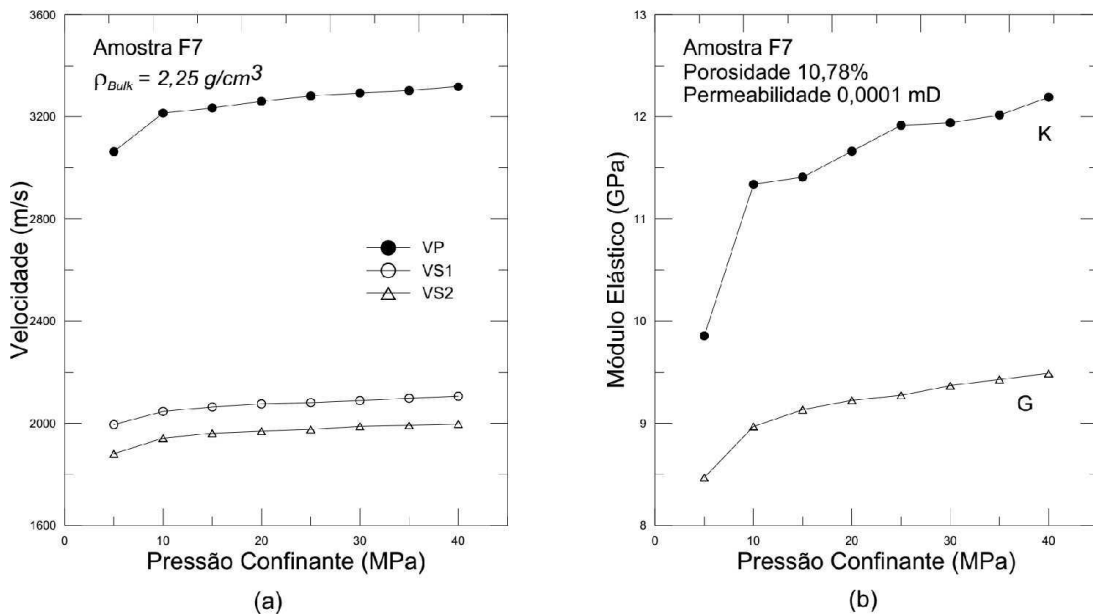


Figura 28 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F7.

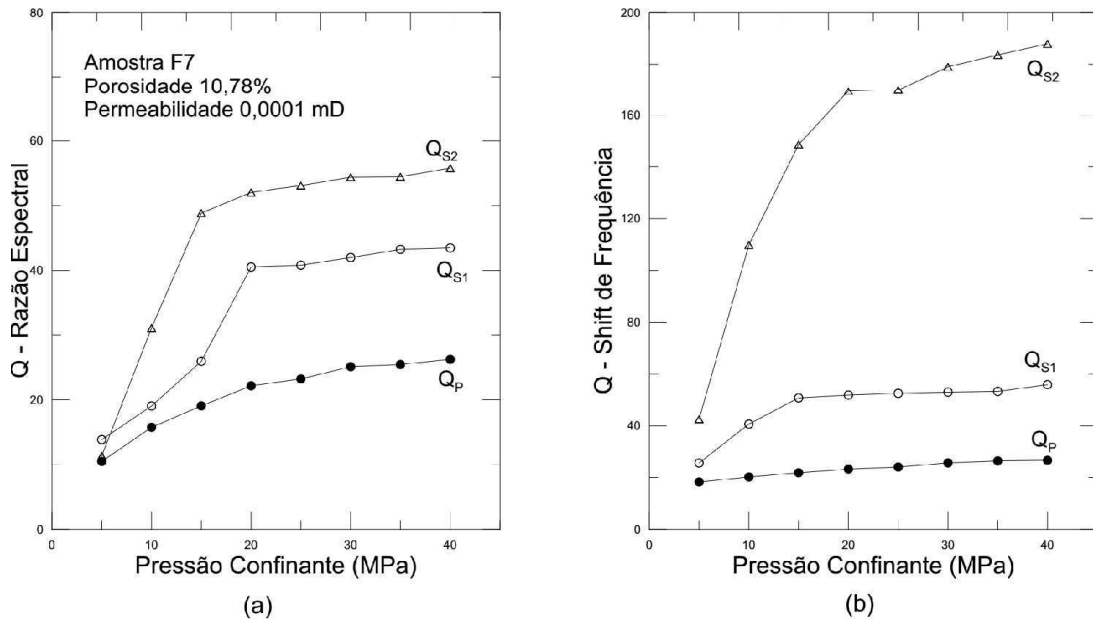


Figura 29 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F7.

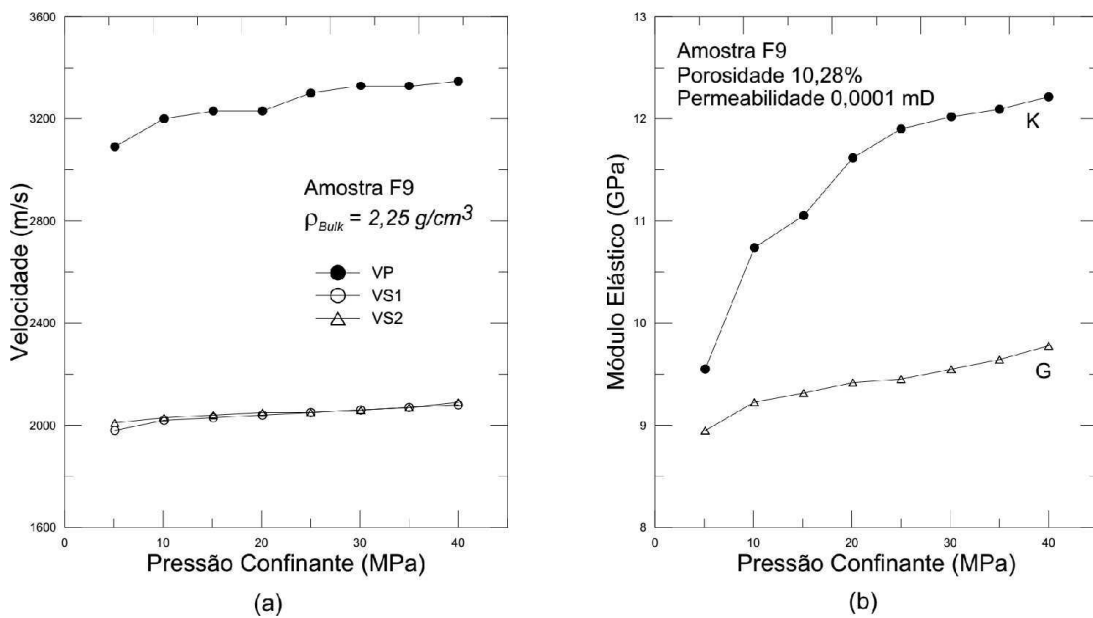


Figura 30 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F9.

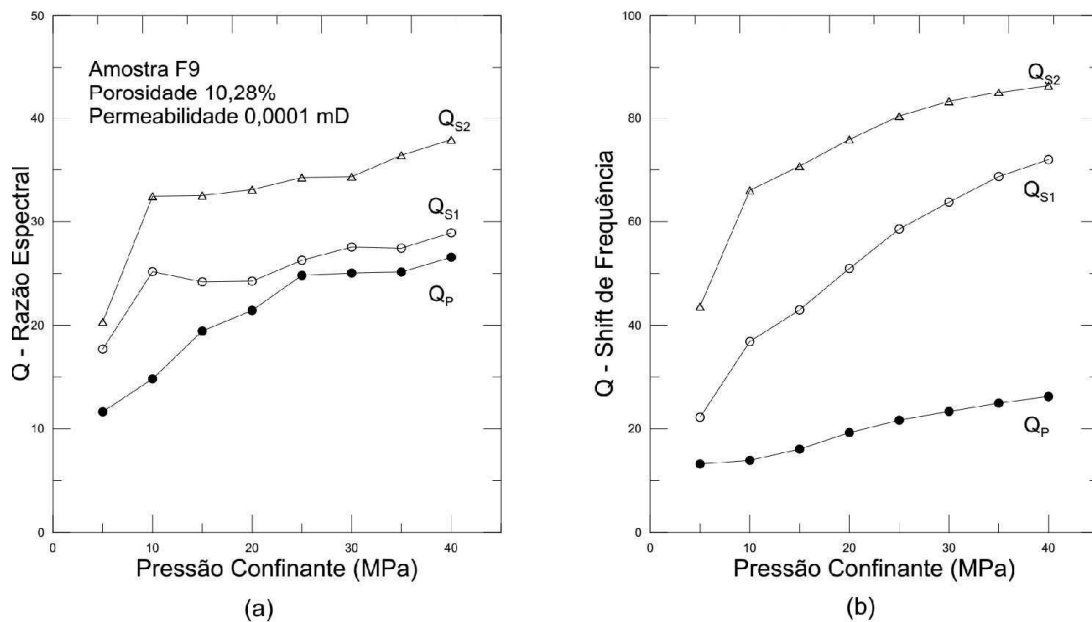


Figura 31 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F9.

Para as amostra F7 e F9, as velocidade de propagação, ilustradas na figura 29 e 31, juntamente com os módulos elásticos, apresentam comportamento semelhante àquelas amostras de folhelhos de afloramento, porém com a variação em função da pressão de confinamento reduzida. Já as estimativas do fator de qualidade, figuras 30 e 32, apresentam uma maior variação (acima de 60% para as estimativas obtidas pelo método da razão espectral).

### 4.3 Amostras do Poço 1-BSB01-PB

As amostras oriundas do poço estratigráfico perfurado pelo LabPetro UFCG são as que apresentam maior complexidade nas medidas realizadas em laboratório. Para estas amostras, os valores das densidades de grão dos folhelhos apresentam grande dispersão, evidenciando uma variação composicional significativa. Já as velocidades de propagação apresentam pequenas variações em função da pressão de confinamento. Santiago (2015) estimou a pressão *in situ* para a profundidade máxima do poço 1-BSB01-PB, obtendo o valor de, aproximadamente, 5MPa, o que justifica variações menores acima desta pressão de confinamento.



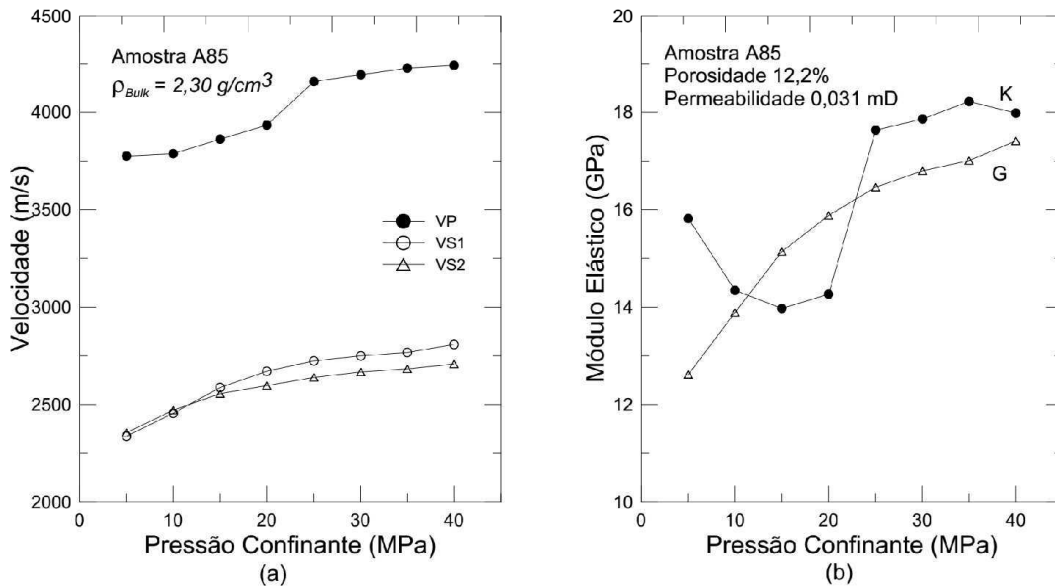


Figura 32 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A85.

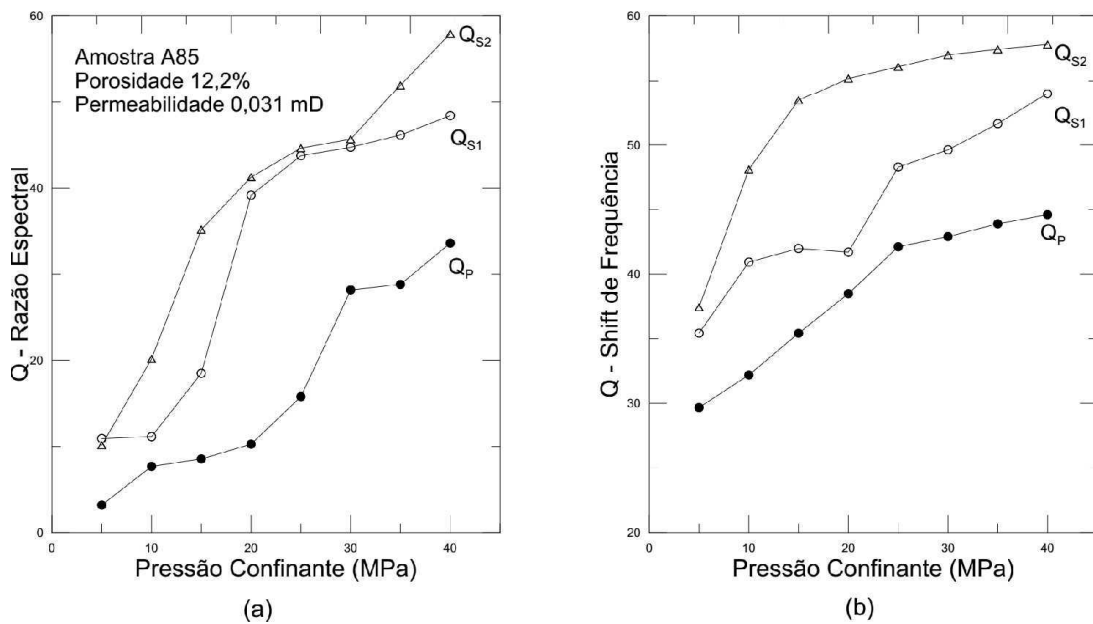


Figura 33 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade Q, obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A85.

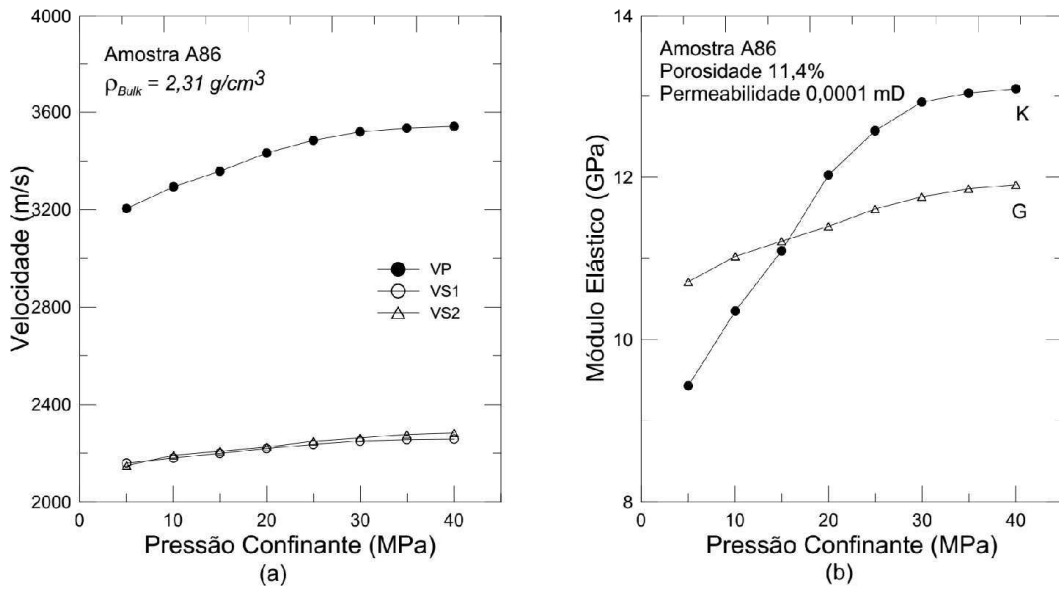


Figura 34 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento A86.

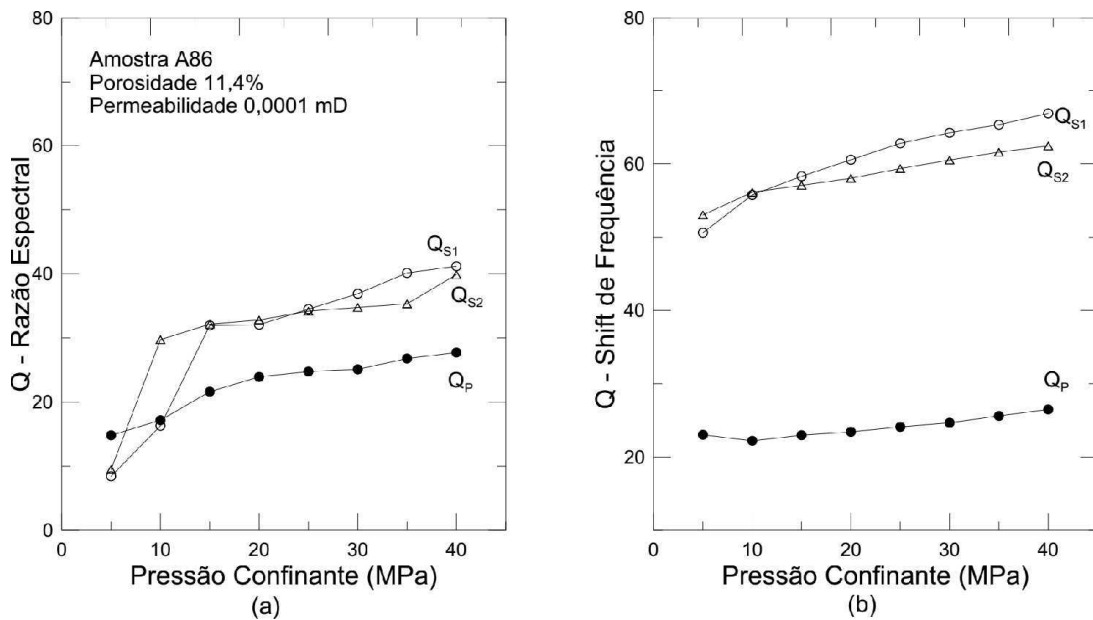


Figura 35 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade Q, obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento A86.

Para a amostra de arenito A85, figuras 33 e 34, observa-se velocidades de propagação relativamente altas, em torno de  $4250 \text{ m/s}$  para a  $V_P$  e  $2800 \text{ m/s}$  para  $V_S$ , a  $40 \text{ MPa}$  de pressão de confinamento. Ambos os módulos elásticos apresentam valores máximos próximos a  $18 \text{ GPa}$ . Já para as estimativas do fator de qualidade, têm-se  $Q_P = 35$ ,  $Q_{S1} = 50$  e  $Q_{S2} = 60$ , obtidos pelo método da razão espectral (com variações em função da pressão de confinamento superiores a  $80\%$ ), e  $Q_P = 45$ ,  $Q_{S1} = 55$  e  $Q_{S2} = 57$  obtidos pelo método do shift de frequência (com variações em função da pressão de confinamento em torno de  $35\%$ ).

Nas figuras 35 e 36, que ilustram o comportamento da amostra de arenito A86, pode-se observar velocidades de propagação moderadas, com valores máximos de  $3450$  e  $2300 \text{ m/s}$  para as ondas compressoriais e cisalhantes, respectivamente, com variações de  $7\%$ . Os módulos de incompressibilidade e de rigidez apresentam valores próximos, de até  $13 \text{ GPa}$ , para  $40 \text{ MPa}$  de pressão confinante. Para as estimativas do fator de qualidade, obteve-se  $Q_P = 25$ ,  $Q_{S1} = 40$  e  $Q_{S2} = 40$ , pelo método da razão espectral e  $Q_P = 30$ ,  $Q_{S1} = 70$  e  $Q_{S2} = 63$ , pelo método de shift de frequência.

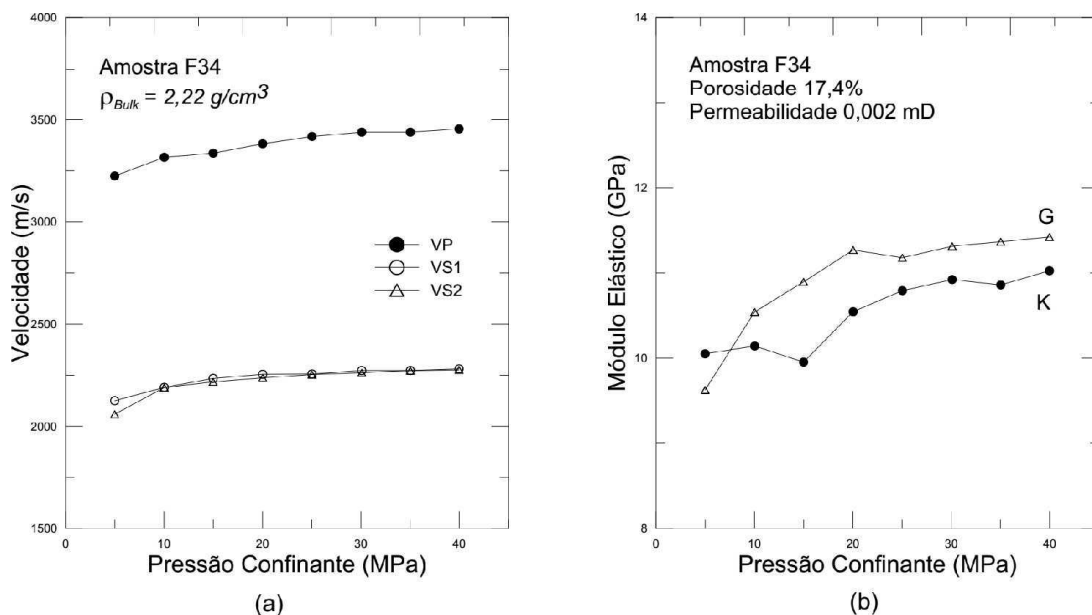


Figura 36 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade (K) e de rigidez (G), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F34.

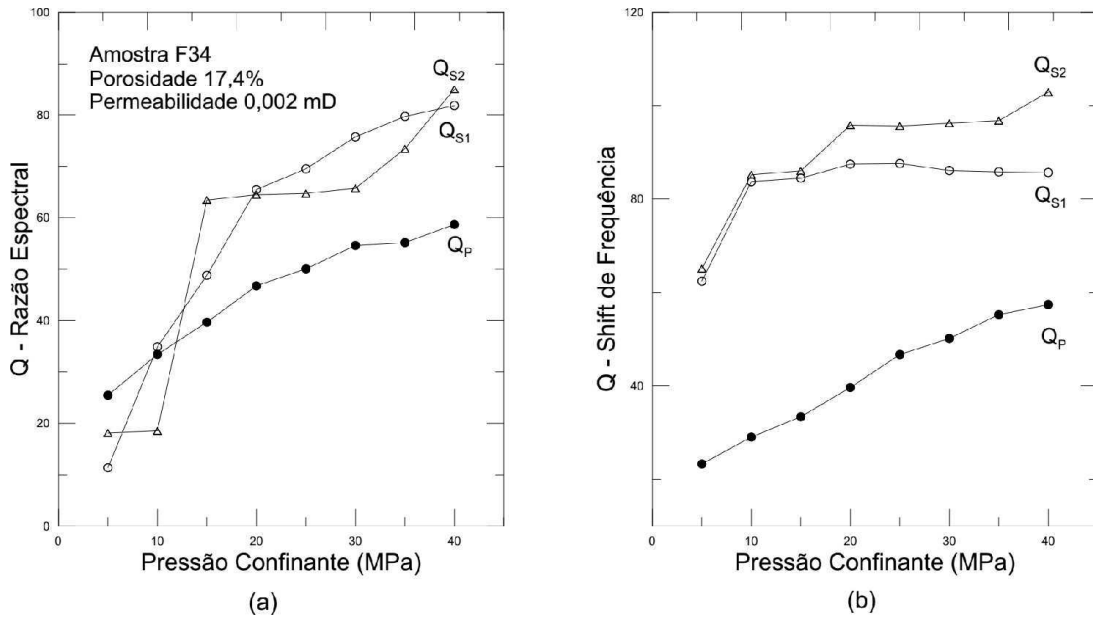


Figura 37 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F34.

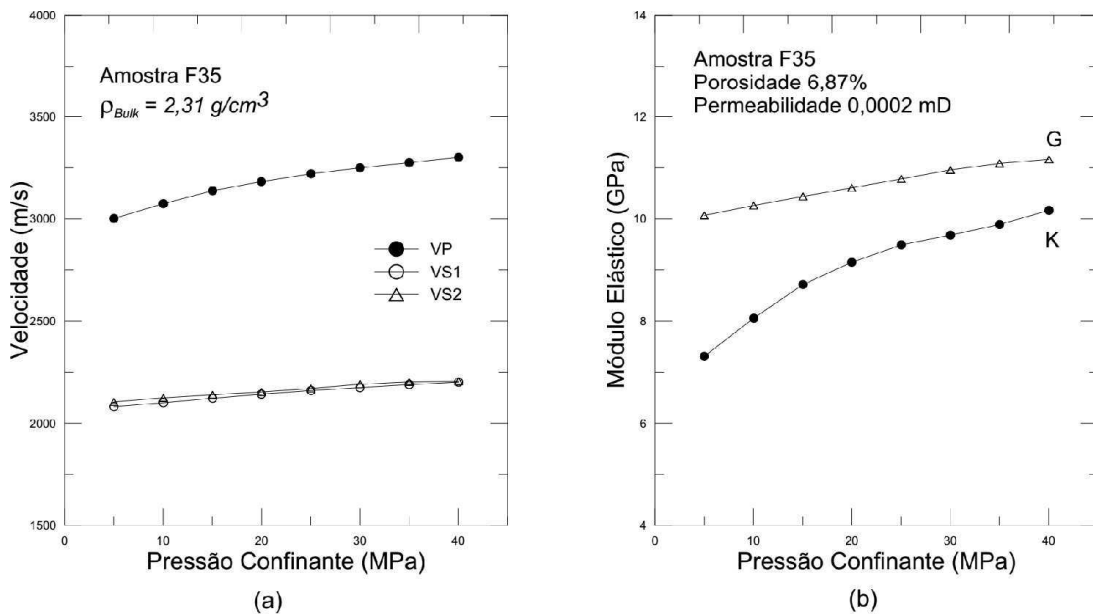


Figura 38 – Relação entre (a) as velocidades de propagação compressional ( $V_P$ ) e cisalhantes ( $V_S$ ) e (b) os módulos de incompressibilidade ( $K$ ) e de rigidez ( $G$ ), com a pressão confinante, para a amostra de afloramento F35.

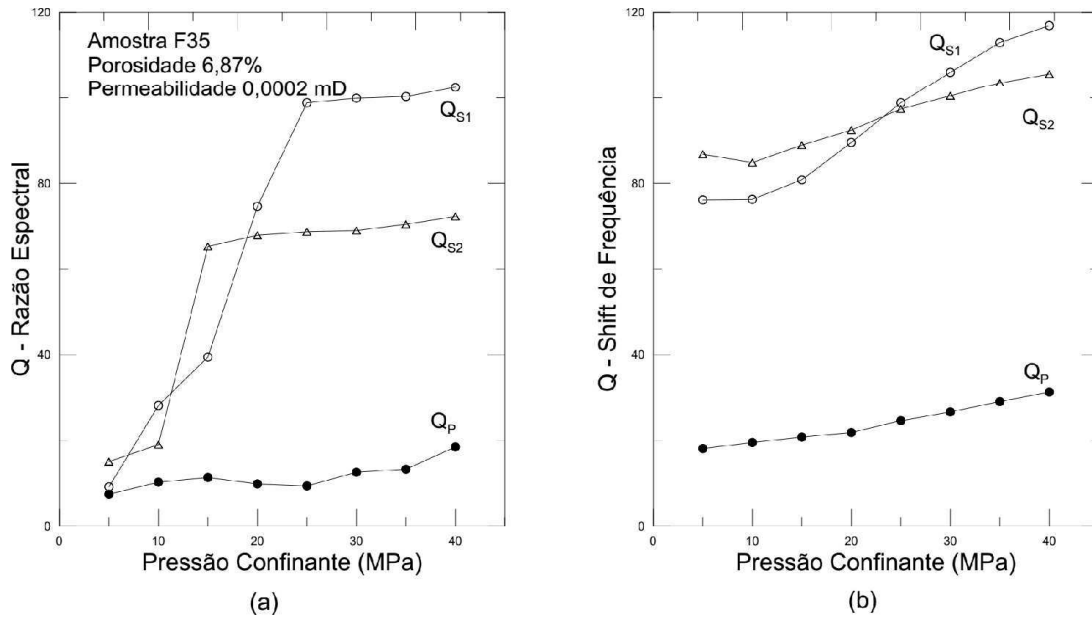


Figura 39 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade  $Q$ , obtidas pelos métodos da (a) razão espectral e do (b) shift de frequência, e a pressão confinante, para a amostra de afloramento F35.

Nas figuras 37 e 38, que ilustram o comportamento de folhelho F34, observa-se velocidades de propagação moderadas, com valores máximos de 3500 e 2250  $m/s$  para as ondas compressoriais e cisalhantes, respectivamente, com variações, também, de 7%. Os módulos de incompressibilidade e de rigidez apresentam valores próximos, de até 11,5 GPa, para 40 MPa de pressão confinante. Para as estimativas do fator de qualidade, obteve-se  $Q_P = 60$ ,  $Q_{S1} = 80$  e  $Q_{S2} = 80$ , pelo método da razão espectral e  $Q_P = 60$ ,  $Q_{S1} = 85$  e  $Q_{S2} = 100$  pelo método do shift de frequência, com maiores variações, em função da pressão de confinamento, para o método da razão espectral.

Para a amostra de folhelho F35, figuras 39 e 40, têm-se velocidades de propagação moderadas, em torno de 3250  $m/s$  para a  $V_P$  e 2250  $m/s$  para  $V_S$ , a 40 MPa de pressão de confinamento. Ambos os módulos elásticos apresentam valores máximos próximos a 11 GPa. Já para as estimativas do fator de qualidade, têm-se  $Q_P = 20$ ,  $Q_{S1} = 100$  e  $Q_{S2} = 75$ , obtidos pelo método da razão espectral (com variação média em função da pressão de confinamento em torno de 75%), e  $Q_P = 35$ ,  $Q_{S1} = 120$  e  $Q_{S2} = 100$  obtidos pelo método do shift de frequência (com variações em função da pressão de confinamento de até 42%).

A Tabela 4 apresenta os resultados das medidas em laboratório para as amostras oriundas do poço perfurado pelo LabPetro UFCG.

Tabela 4 – Medidas em laboratório para as amostras oriundas do poço perfurado pelo LabPetro UFCG (velocidades obtidas à pressão confinante de 40 MPa).

| Amostra | $\phi$<br>(%) | $\kappa$<br>(mD) | $\rho_G$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\rho_b$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Vp<br>(m/s) | Vs1<br>(m/s) | Vs2<br>(m/s) |
|---------|---------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| A84     | 17,077        | 0,0196           | 2,64                             | 2,189                            | 3437        | 2161         | 2191         |
| A85     | 12,244        | 0,031            | 2,618                            | 2,297                            | 4898        | 3093         | 3084         |
| A86     | 11,392        | 0,0001           | 2,606                            | 2,309                            | 3542        | 2258         | 2283         |
| A87     | 10,02         | 0                | 2,741                            | 2,46                             | 4654        | 2797         | 2775         |
| A88     | 3,177         | 0,0001           | 2,622                            | 2,538                            | 5129        | 3167         | 3167         |
| A89     | 10,091        | 0,0001           | 2,55                             | 2,29                             | 3270        | 2119         | 2126         |
| A90     | 9,76          | 2,71             | 2,569                            | 2,318                            | 4674        | 2859         | 2855         |
| A91     | 9,67          | 0,2              | 2,628                            | 2,37                             | 4653        | 2895         | 2932         |
| F34     | 17,358        | 0,0002           | 2,693                            | 2,22                             | 3444        | 2207         | 2219         |
| F35     | 6,87          | 0,0002           | 2,479                            | 2,308                            | 3364        | 2168         | 2183         |
| F36     | 17,216        | 0,0043           | 2,653                            | 2,196                            | 3387        | 2163         | 2174         |
| F37     | 15,566        | 0,0001           | 2,642                            | 2,231                            | 3576        | 2276         | 2445         |
| F38     | 10,379        | 0,0001           | 2,44                             | 2,187                            | 3468        | 2186         | 2190         |
| F39     | 9,529         | 0,0001           | 2,579                            | 2,333                            | 3125        | 2061         | 2076         |
| F40     | 14,203        | 0,0002           | 2,631                            | 2,257                            | 3310        | 2103         | 2106         |
| F41     | 16,141        | 0,0001           | 2,639                            | 2,21                             | 3449        | 2147         | 2235         |
| F42     | 20,192        | 0                | 2,709                            | 2,16                             | 3491        | 2206         | 2237         |
| F43     | 8,019         | 0,0001           | 2,63                             | 2,419                            | 3920        | 2516         | 2535         |
| F44     | 13,089        | 0,0001           | 2,589                            | 2,25                             | 3249        | 2173         | 2156         |
| F45     | 0,56          | 0                | 2,347                            | 2,334                            | 3563        | 2239         | 2230         |
| F46     | 1,864         | 0,0001           | 2,44                             | 2,395                            | 3718        | 2333         | 2316         |
| F47     | 12,971        | 0,0002           | 2,638                            | 2,296                            | 3701        | 2314         | 2324         |
| F48     | 7,256         | 0                | 2,705                            | 2,5                              | 4097        | 2629         | 2682         |
| F49     | 6,94          | 0,0001           | 2,523                            | 2,348                            | 3741        | 2365         | 2347         |
| F50     | 5,577         | 0,003            | 2,438                            | 2,3                              | 4393        | 2668         | 2673         |
| F51     | 6,116         | 0                | 2,61                             | 2,45                             | 4134        | 2680         | 2753         |
| F52     | 3,081         | 0,002            | 2,255                            | 2,185                            | 2972        | 1809         | 1824         |
| F53     | 5,638         | 0                | 2,615                            | 2,467                            | 3935        | 2519         | 2523         |
| F54     | 9,356         | 0                | 2,64                             | 2,39                             | 4258        | 2722         | 2710         |
| F55     | 10,958        | 0,003            | 2,735                            | 2,435                            | 3750        | 2451         | 2379         |

## 4.4 Fator de Qualidade - Uma Análise Comparativa

As estimativas do fator de qualidade foram, para esta dissertação, obtidas através de dois métodos distintos: razão espectral e shift de frequência. Na seção anterior foram apresentados alguns resultados com ambas as medidas. Entretanto, nenhuma ênfase foi dada às diferenças entre os métodos. Assim, esta seção propõem-se a discutir algumas possíveis causas para as diferenças observadas. As figuras 41 a 43 ilustram os fatores de qualidade estimados para as amostras da BRP.

Na figura 41 é possível observar um comportamento semelhante dos valores obtidos pelos diferentes métodos, para o modo de propagação da onda compressional. Já para as ondas cisalhantes, observam-se maiores variações. Na figura 42, para as ondas S1, semelhanças no comportamento geral, para uma mesma litologia, podem ser observadas, sendo, contudo, os valores obtidos pelo método do shift de frequência levemente superiores. Para a onda do tipo S2, na figura 43, os valores obtidos pelo método do shift de frequência são significativamente superiores, com elevada dispersão.

Ressalta-se que alguns resultados do fator de qualidade foram considerados *outliers*, pois se distanciavam até dezenas de vezes do valor médio obtido para um mesmo conjunto de amostras, e foram retirados das representações gráficas. Tais omissões representam cerca de 1% do total das amostras analisadas.

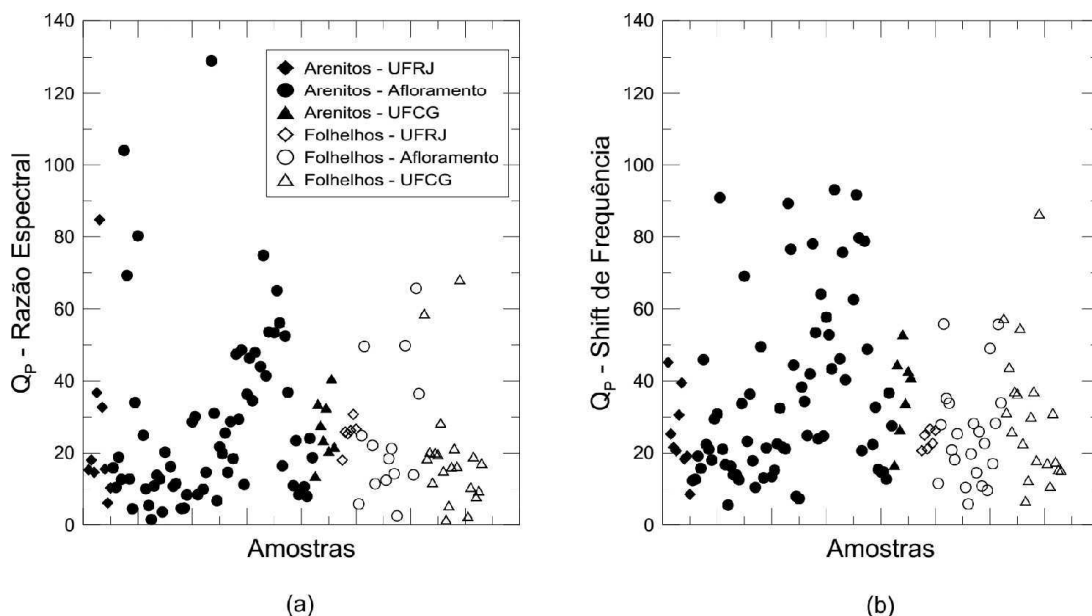


Figura 40 – Fator de Qualidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo P.

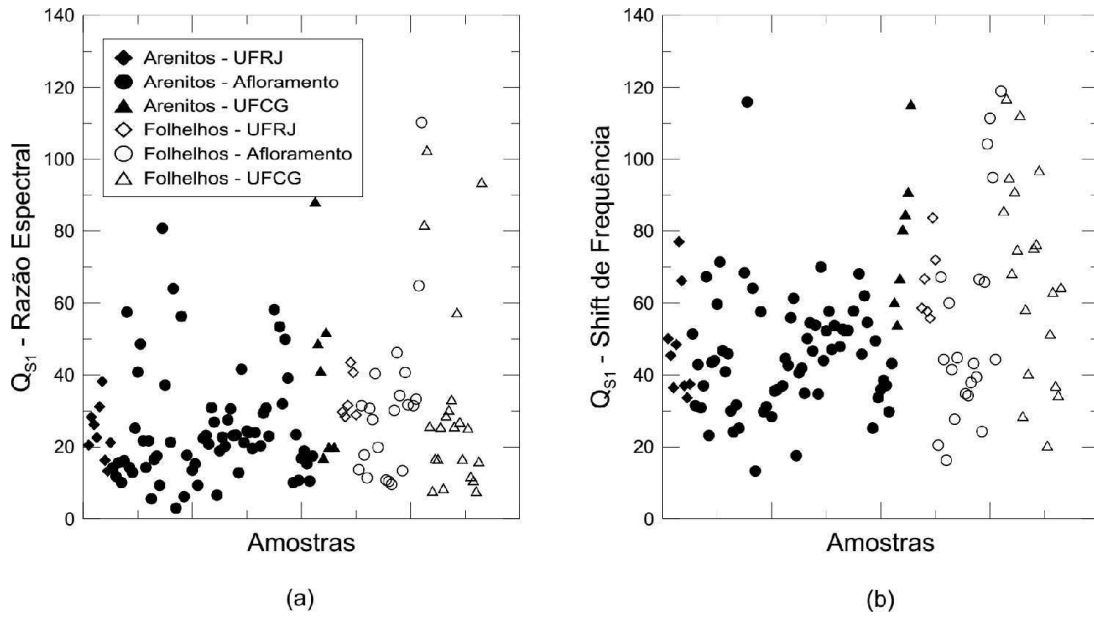


Figura 41 – Fator de Qualidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo S1.

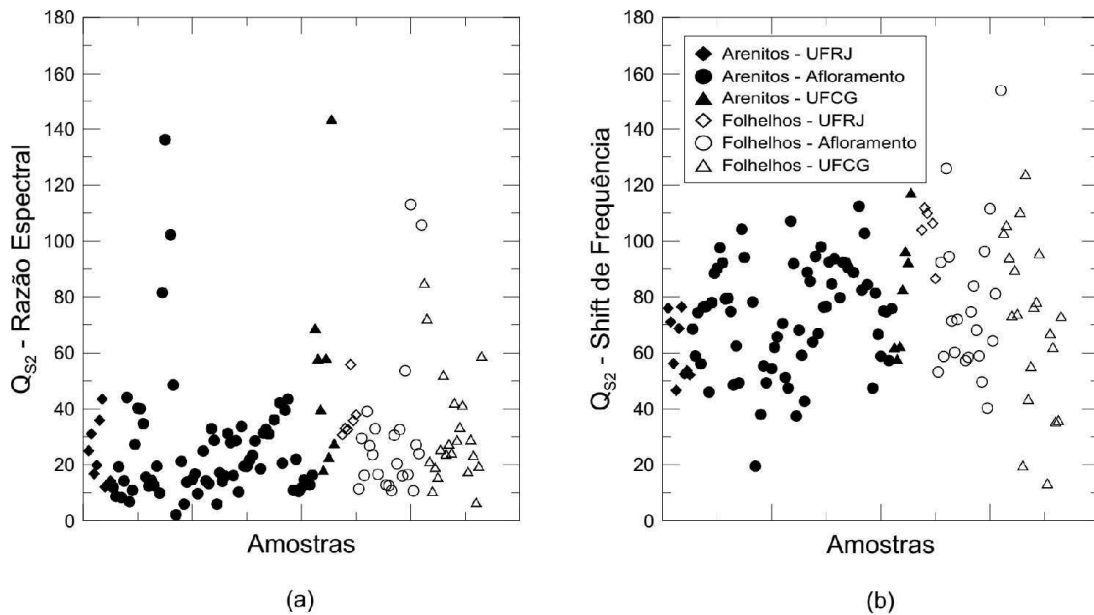


Figura 42 – Fator de Qualidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo S2.



Acredita-se que um dos fatores que corroboram para a diferença entre os valores obtidos, pelos diferentes métodos, é a geometria da amostra. Pela observação da metodologia empregada para a obtenção dos valores do fator de qualidade (vide capítulo 03), nota-se que o método do shift de frequência é independente da geometria da amostra, enquanto que no método da razão espectral existe um componente dependente desta geometria. Na equação 3.10, pode-se observar que o fator que depende da geometria da amostra altera somente o coeficiente linear da equação, situação que não modificaria o valor do fator de qualidade estimado. Entretanto, a própria equação é deduzida para quando o fator  $G1/G2$  é independente da frequência, ou seja, quando a geometria da amostra de referência é idêntica à geometria da amostra analisada. Esta condição de igualdade foi, para a maioria das amostras, obtida. Porém, a preparação do plugue depende, também, da condição inicial da amostra. Assim, amostras pouco consolidadas e/ou de granulometria grosseira e/ou com presença intensa de fraturas, eventualmente, pela dificuldade de preparação dos plugues, não atenderam as condições geométricas desejadas. Contudo, estimou-se o fator de qualidade para tais amostras (aproximadamente 14% do total de amostras) utilizando a mesma amostra de referência que para as demais.

Nas figuras anteriores é possível observar o comportamento do fator de qualidade em função de diferentes litologias. Porém, para uma análise comparativa é mais eficiente observar, para o mesmo modo de propagação da onda, um método como função do outro. As figuras 44 e 45 ilustram o comportamento do fator de qualidade obtido pelo método do deslocamento de frequência em função dos valores obtidos pelo método da razão espectral.

Observa-se na figura 44 que existe uma correlação razoável entre o fator de qualidade obtido pelos diferentes métodos, apesar do baixo valor do  $R^2$ . Deve-se considerar que poucas amostras (principalmente aquelas onde  $Q_P$  - razão espectral  $> 80$ ), são responsáveis por este baixo coeficiente de determinação.

A figura 45 apresenta as relações entre os valores do fator de qualidade para as ondas cisalhantes, obtidos pelos diferentes métodos. Observa-se que, a exemplo do que ocorre para as ondas compressoriais, poucas amostras são responsáveis por mascarar um melhor ajuste.

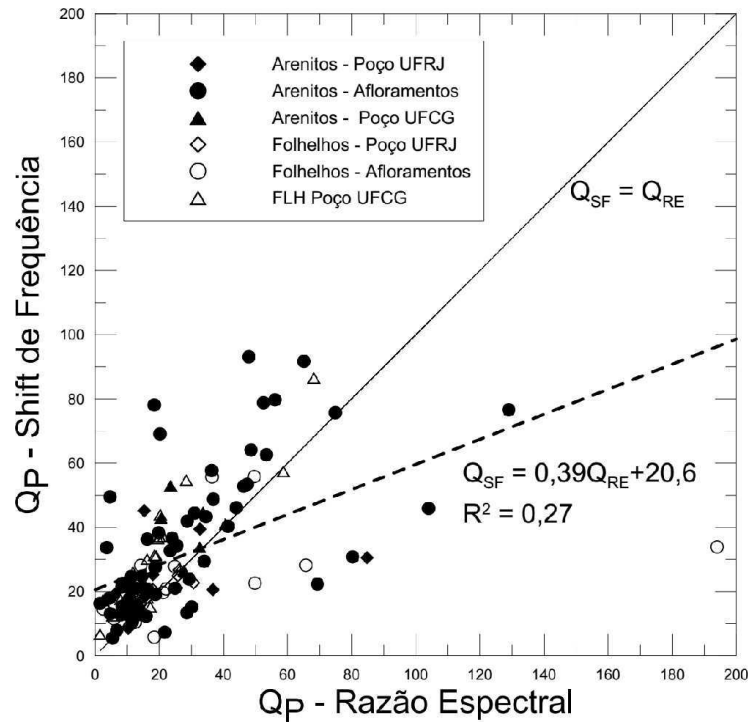


Figura 43 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade, para as ondas compressio- nais, obtidos através dos diferentes métodos.

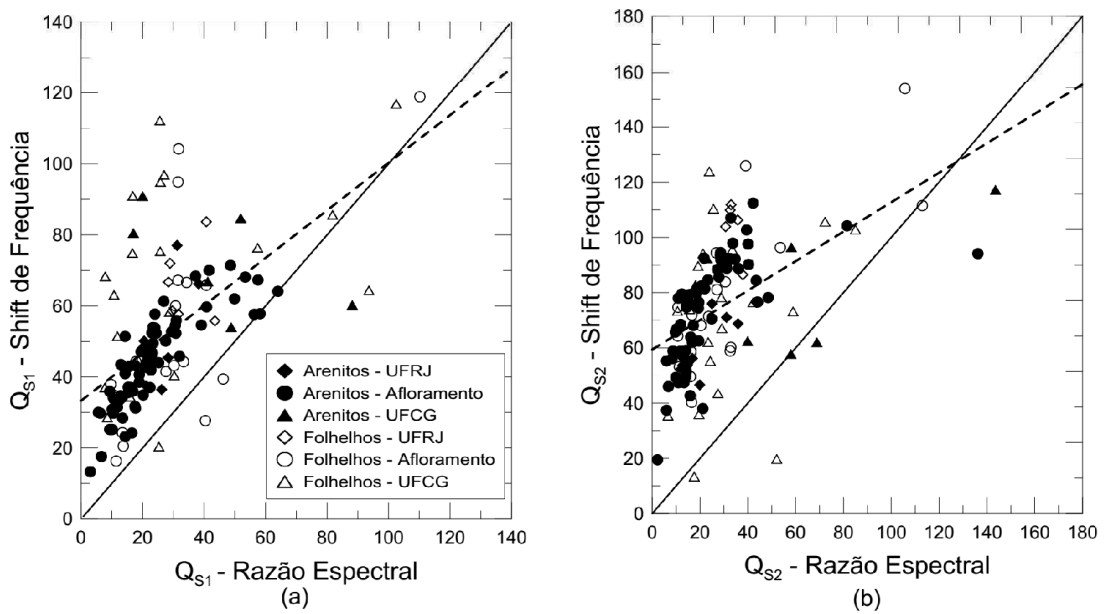


Figura 44 – Relação entre as estimativas do fator de qualidade, para as ondas cisalhantes (a) S1 e (b) S2 , obtidos através dos diferentes métodos.

## 4.5 A Bacia Rio do Peixe - Análise Integrada dos Dados

### 4.5.1 Porosidade

As relações entre porosidade e velocidade encontram aplicações importantes na exploração petrolífera, uma vez que é possível obter mapas da distribuição da porosidade no reservatório, a partir das velocidades. A figura 46 apresenta a relação entre a porosidade e a velocidade de propagação da onda compressional ( $V_P$ ) para as amostras da BRP.

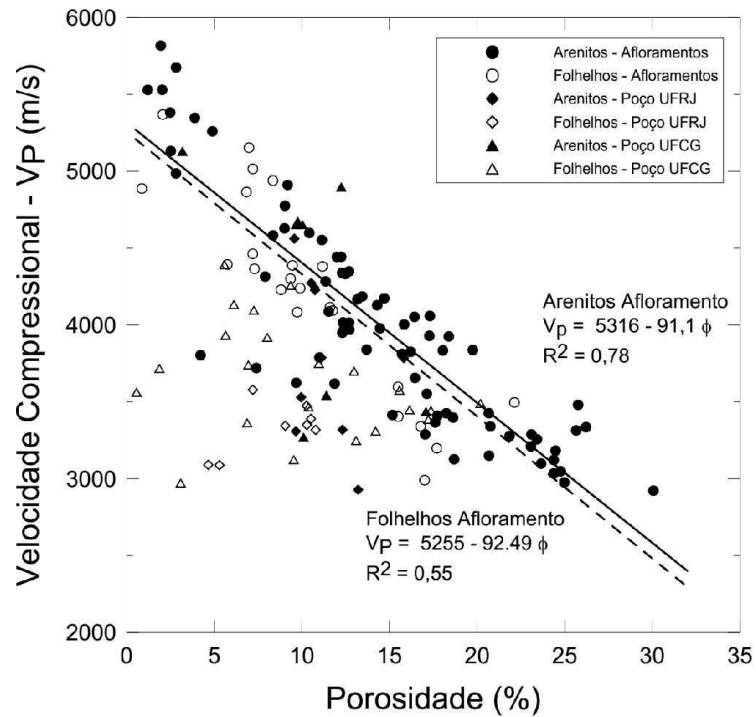


Figura 45 – Relação entre  $V_P$  e a porosidade para as amostras da BRP.

No gráfico acima foram obtidas as seguintes relações:

$$V_P = 5316 - 91,1\phi, \quad R^2 = 0,78 \quad (\text{Arenitos} - \text{Afloramentos}) \quad (4.1a)$$

$$V_P = 5255 - 92,5\phi, \quad R^2 = 0,55 \quad (\text{Folhelhos} - \text{Afloramentos}) \quad (4.1b)$$

$$V_P = 5476 - 114,5\phi, \quad R^2 = 0,35 \quad (\text{Arenitos} - \text{UFCG}) \quad (4.1c)$$

$$V_P = 3834 - 19,7\phi, \quad R^2 = 0,08 \quad (\text{Folhelhos} - \text{UFCG}) \quad (4.1d)$$

$$V_P = 4743 - 87,1\phi, \quad R^2 = 0,12 \quad (\text{Arenitos} - \text{UFRJ}) \quad (4.1e)$$

$$V_P = 2978 + 41,3\phi, \quad R^2 = 0,36 \quad (\text{Folhelhos} - \text{UFRJ}) \quad (4.1f)$$

Apesar da dispersão observada, é possível notar a tendência geral do decaimento das velocidades de propagação da onda P com o aumento da porosidade. Resultados semelhantes foram obtidos para a relações da porosidade com as velocidades de propagação da onda cisalhante(S), ilustrados na figura 47.

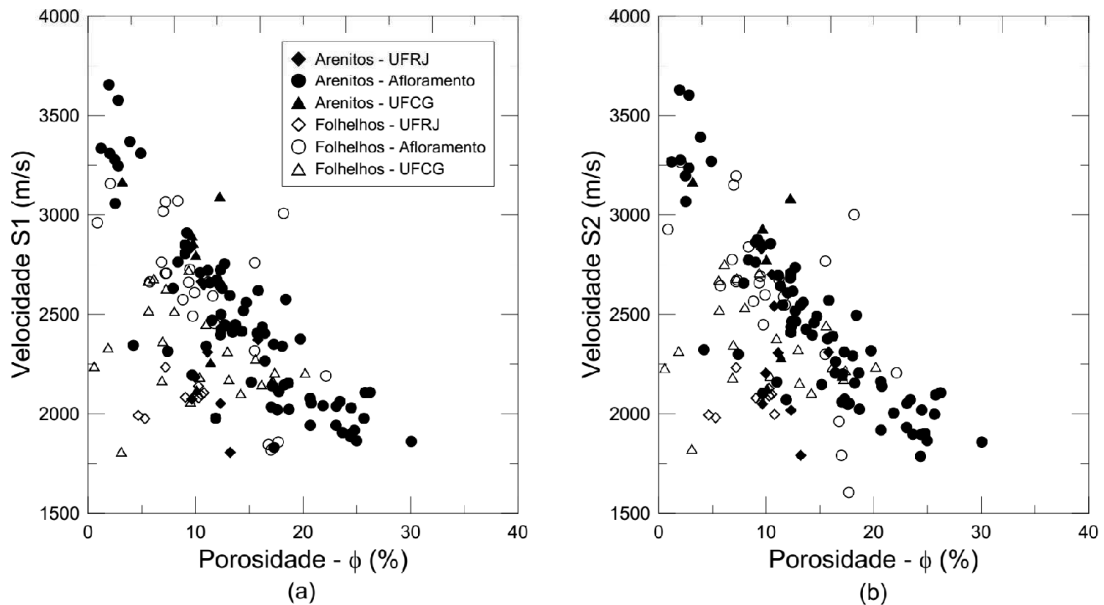


Figura 46 – Relação entre a velocidade de propagação das ondas cisalhantes e a porosidade para as amostras da BRP( a)  $V_{S1}$  e b)  $V_{S2}$ ).

De acordo com a literatura, em geral, para uma mesma litologia, a velocidade decresce com o aumento da porosidade. Entretanto, observa-se uma boa correlação apenas para as amostras oriundas dos afloramentos, evidenciando o caráter heterogêneo da bacia. Tal afirmativa encontra suporte na observação, nos gráficos anteriores, da faixa de porosidades (entre 0 e 15%) para a qual a velocidade sofre pequenas alterações, principalmente em folhelhos oriundos do poço 1-BSB01-PB (representados pelos triângulos sem preenchimento), indicando que outros fatores devem atuar predominantemente sobre as velocidades.

Como discutido no capítulo 2, diversos fatores atuam sobre o comportamento sísmico das rochas. Assim, a exemplo do que se faz com a velocidade, busca-se também correlacionar o fator de qualidade Q com outras propriedades, a fim de compreender quais fatores exercem maior influência na atenuação elástica das rochas da BRP.

A porosidade não é um fator dominante sobre a atenuação (Best et al, 1994), contudo pode-se relacionar aquela à densidade e à rigidez do arcabouço rochoso, fatores estes que atuam fortemente sobre a atenuação. Assim, busca-se aqui, relações entre a porosidade e o fator de qualidade. As relações entre a porosidade e fator de qualidade das

ondas compressionais é ilustrada na figura 48.

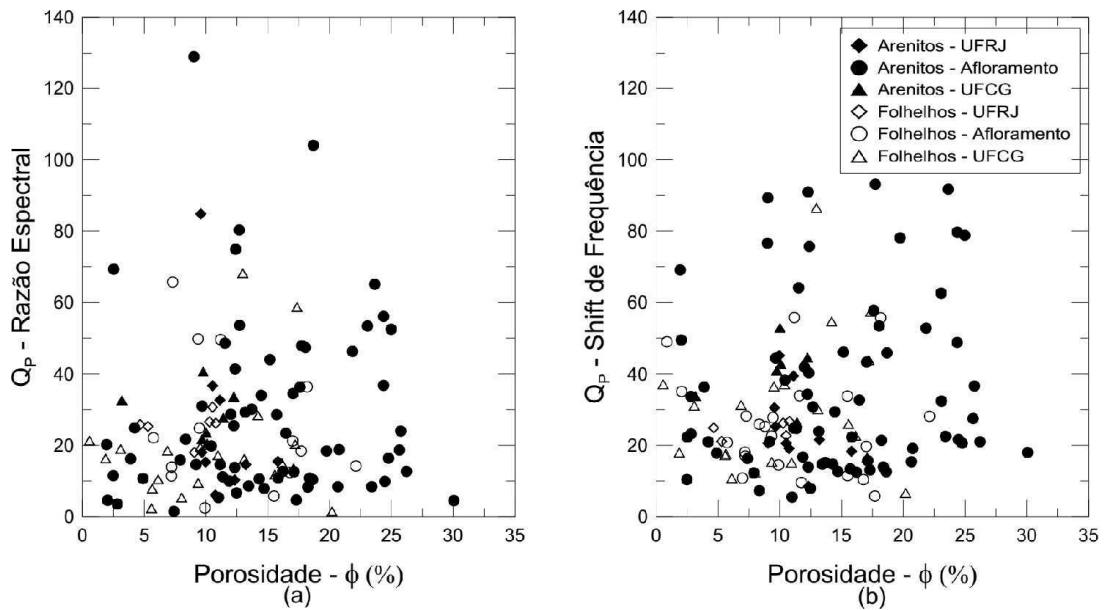


Figura 47 – Relação entre Fator de Qualidade e Porosidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo P.

A atenuação elástica das rochas da Bacia do Rio do Peixe, estimada quantitativamente através do Fator de Qualidade, apresenta notável dispersão para uma mesma litologia. Sendo a BRP uma bacia de alta complexidade estrutural e ainda tectonicamente ativa, tais resultados são esperados, pois estruturas como bandas de deformação, falhas, entre outras, fortemente presentes na bacia, não são amostradas em cada espécime de rocha. Contudo, de modo geral, os arenitos apresentam uma dispersão levemente maior para os valores do fator  $Q$ , quando comparados aos folhelhos. Para as ondas cisalhantes observa-se uma dispersão mais acentuada para os valores do fator de qualidade obtidos pelo método do shift de frequência, como se pode observar nas figuras 49 e 50.

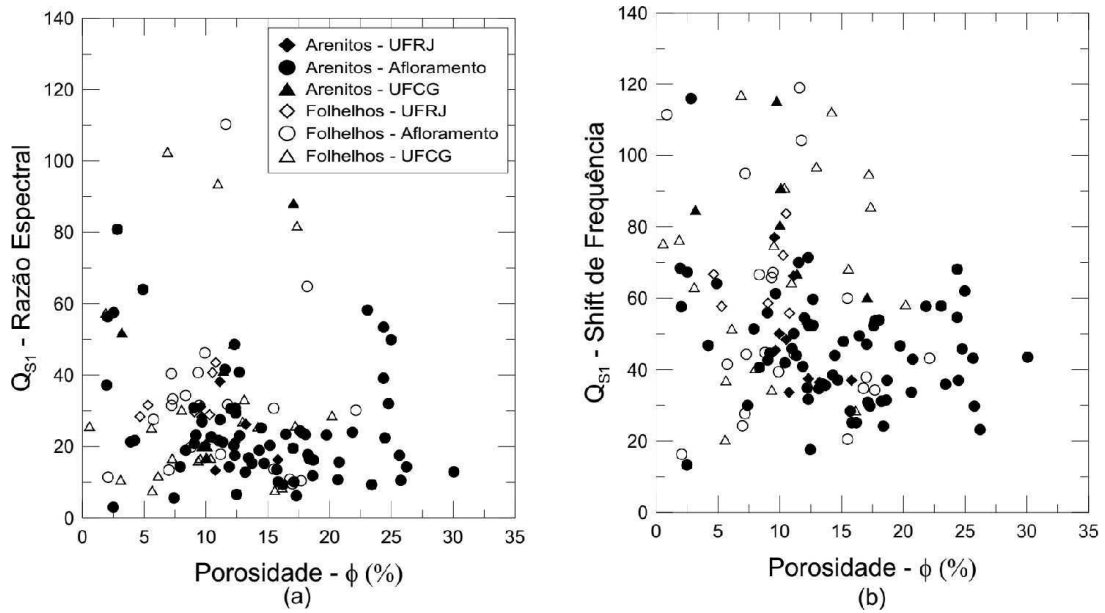


Figura 48 – Relação entre Fator de Qualidade e Porosidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo S1.

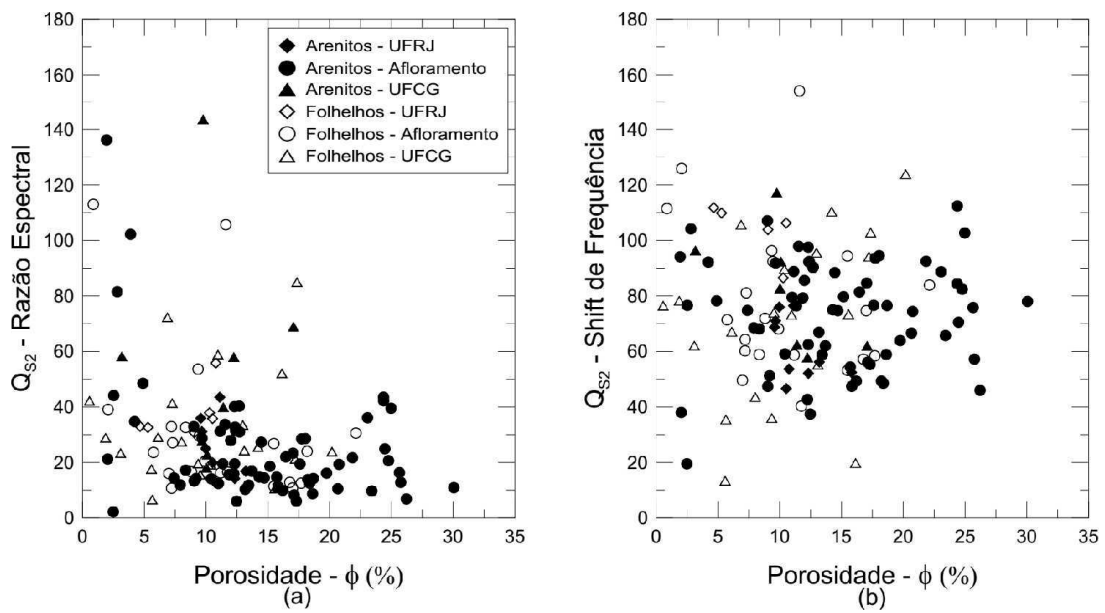


Figura 49 – Relação entre Fator de Qualidade e Porosidade para as amostras da BRP, obtidos através do (a) método da razão espectral e do (b) método do shift de frequência, pela análise das ondas do tipo S2.

Nota-se que a porosidade, de fato, não exerce forte influência sobre a atenuação.

Quanto à composição da rocha, pôde-se observar, visualmente, pequenas variações e, utilizando ácido clorídrico, identificar aquelas amostras que apresentavam algum conteúdo carbonático. O conteúdo carbonático está fortemente presente em toda a bacia, atuando principalmente na cimentação das rochas. Entretanto, não houve medida quantitativa do conteúdo carbonático presente em cada amostra, contudo, de acordo com os resultados obtidos, as amostras com maiores porosidades ( $>10\%$ ) parecem possuir quantidades maiores de material carbonático em sua composição. A relação entre o módulo volumétrico e a porosidade é ilustrado na figura 51. Assim, acredita-se que, em geral, as amostras que apresentam valores mais elevados do fator de qualidade, são aquelas que, também, apresentam maiores quantidades de material carbonático em sua composição. Assim, valores altos para o fator de qualidade em uma rocha de porosidade alta, pode indicar que tal porosidade seja devida à dissolução do carbonato, que estaria presente em grande quantidade na amostra.

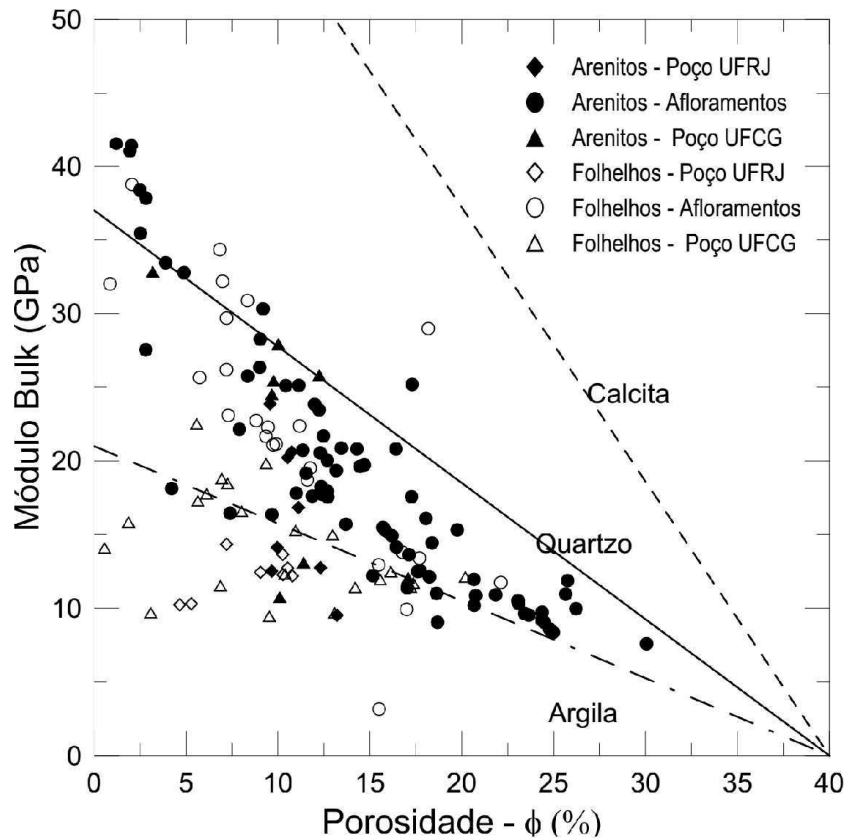


Figura 50 – Relação entre o Módulo de Incompressibilidade (*Bulk modulus*) e a Porosidade.

No capítulo 02 discutem-se outros fatores que atuam sobre o comportamento sísmico das rochas. O mais importante, depois da porosidade, é a presença de argila, que atua sobre a densidade e os módulos elásticos, impondo, conseqüentemente, variações às velocidades de propagação. Através de análises macroscópicas pode-se distinguir níveis

baixos, médios e altos de argilosidade nas amostras da BRP, contudo, poucas amostras foram submetidas à uma determinação quantitativa dos teores de argila presentes.

#### 4.5.2 Densidade

Para densidades de grão, as suas relações com a velocidade sísmica, para uma mesma porosidade, são geralmente proporcionais, devido ao efeito sobre os valores dos módulos elásticos e da densidade total.

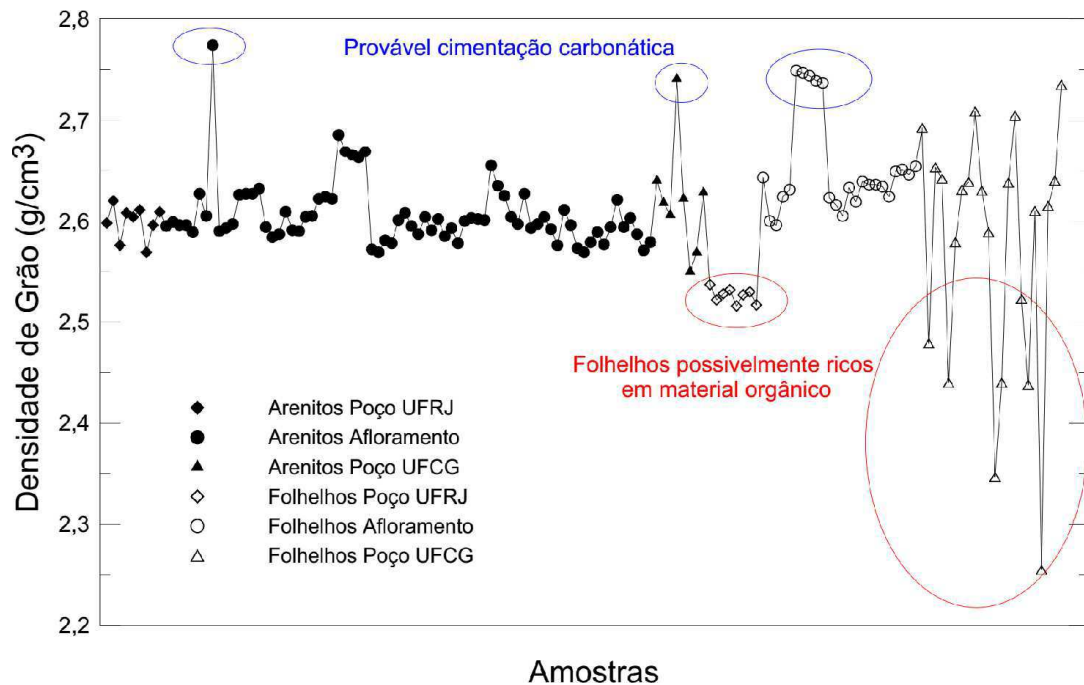


Figura 51 – Densidades de grão medidas para as amostras da BRP.

Observa-se na figura 52 um valor médio de  $2,6g/cm^3$  para a densidade de grão dos arenitos, concordando com a densidade esperada para as amostras constituídas de quartzo ( $2,65g/cm^3$ ). Contudo, variações importantes ocorrem, ora elevando a densidade, ora diminuindo-a. Uma parte de tais variações, supõe-se, está associada à cimentação carbonática, fortemente presente na bacia, que eleva a densidade média dos grãos. Outra parte, que reduz a densidade média esperada para os grãos constituintes das amostras de arenito, supõem-se estar associada à argilosidade. Geralmente, a argilosidade é o fator mais importante no controle das velocidades, depois da porosidade, devido ao seu efeito sobre a densidade total das amostras. Entretanto, as variações que mostram redução na densidade média esperada para os grãos, são pouco expressivas para os arenitos. Porém, é importante ressaltar que, visto que não houve medidas quantitativas dos teores de argila para todo o conjunto de amostras, os arenitos podem apresentar teores de argila maiores do que os



inferidos pela observação da figura anterior, devido ao papel mais relevante da cimentação carbonática, que pode, eventualmente, elevar a densidade de grãos, mascarando o efeito e a estimativa da argilosidade.

Para os folhelhos há uma dispersão maior dos valores da densidade de grãos. A literatura relata densidades de grãos variando entre 2,4 e 2,8 g/cm<sup>3</sup> para os folhelhos, a depender de sua composição. Como os folhelhos são de origem siliciclástica, ou seja, formados por clastos de material silicático, é esperado uma densidade de grãos também em torno de 2,65 g/cm<sup>3</sup> e, a exemplo do que ocorre com os arenitos da bacia, as variações que mostram valores mais elevados que este, estão associadas à cimentação carbonática. Quanto aos valores abaixo da média, supõem-se que estejam associados à presença de matéria orgânica, encontrada principalmente nos folhelhos oriundos dos poços estratigráficos.

O efeito combinado da porosidade e da densidade de grãos, pode ser observado na densidade total das amostras. A figura 53 apresenta a relação entre as velocidades de propagação das ondas compressoriais e a densidade total para todo o conjunto de amostras.

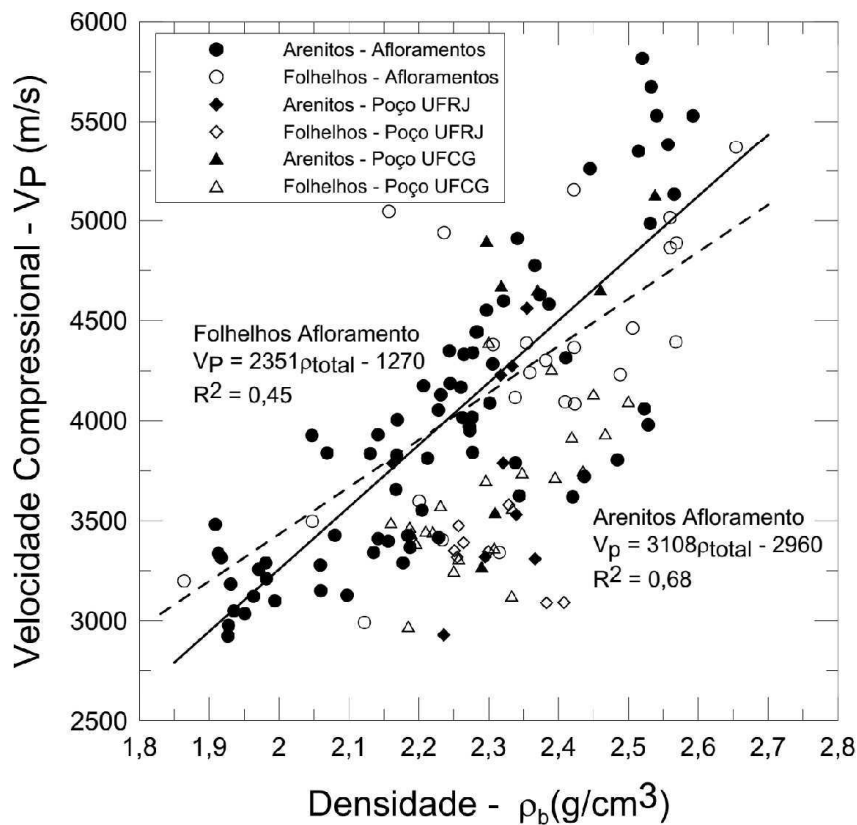


Figura 52 – Relação entre  $V_P$  e densidade total para as amostras da BRP.

Busca-se também relacionar a densidade à atenuação.

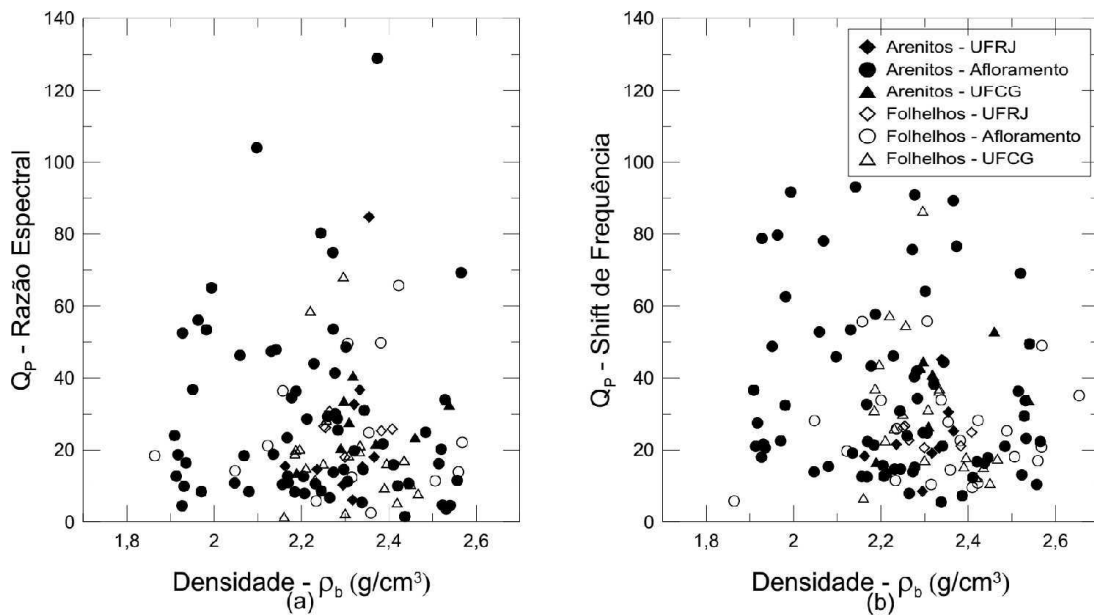


Figura 53 – Relação entre o fator de qualidade  $Q_P$  e a densidade total para as amostras da BRP.

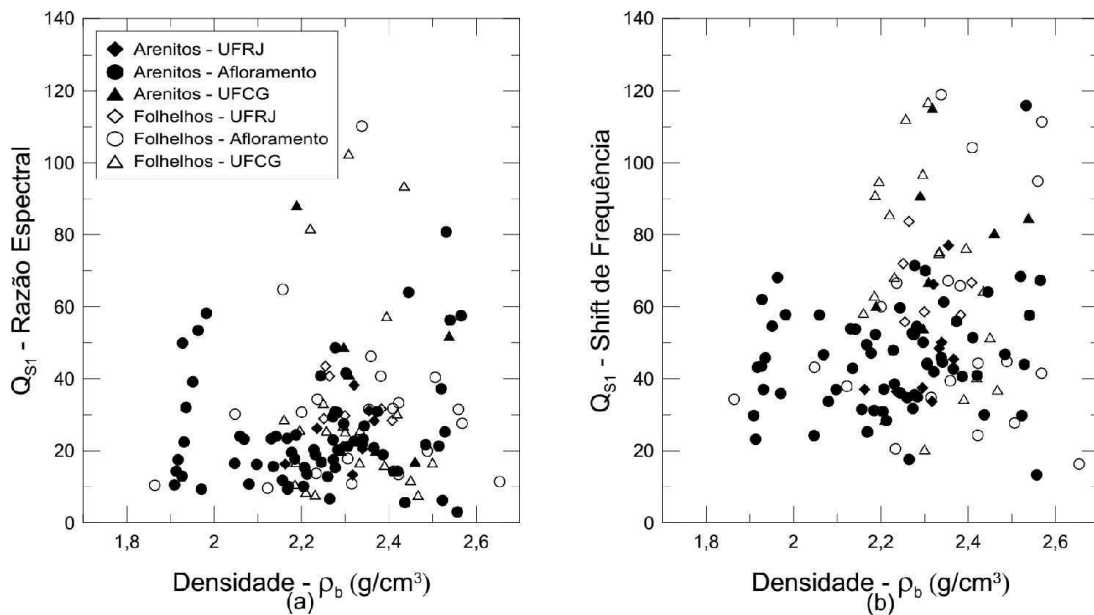


Figura 54 – Relação entre o fator de qualidade  $Q_{S1}$  e a densidade total para as amostras da BRP.

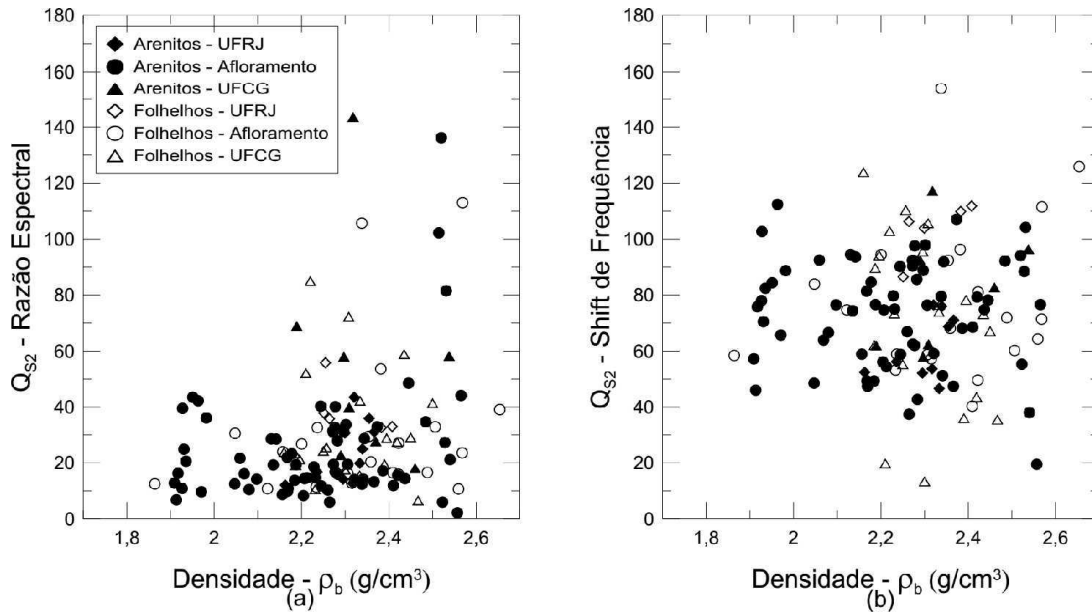


Figura 55 – Relação entre o fator de qualidade  $Q_{S2}$  e a densidade total para as amostras da BRP.

Nas figuras 54 a 56 observa-se que a densidade exerce pouca influência sobre a atenuação elástica. Ainda assim, nota-se que há um tênue aumento da dispersão para a densidade média de  $2,3g/cm^3$ , indicando que outros fatores atuam de forma mais significativa sobre a atenuação elástica. Acredita-se que a densidade exerça um papel importante, principalmente sobre os módulos elásticos (consequentemente afetando a velocidade de propagação e a atenuação elástica). Contudo, para a atenuação, as estruturas rúpteis, presentes nas amostras, parecem desempenhar papel mais relevante.

#### 4.5.3 Velocidades de ondas compressoriais e cisalhantes

Como discutido no capítulo 2, um indicador litológico utilizado, comumente, é a razão entre as velocidades compressoriais e cisalhantes. Além disso, na geofísica de exploração, informações sobre as ondas cisalhantes são obtidas implicitamente nos levantamentos sísmicos usuais (que utilizam, geralmente, somente as ondas compressoriais), geralmente pelo efeito da conversão de onda nas interfaces geológicas que não são normais à trajetória de propagação do pulso inicial. Portanto, a importância em obter-se as relações entre ondas compressoriais e cisalhantes. A figura 57 apresenta a relação entre a velocidade de propagação da onda compressional e a velocidade de propagação da onda cisalhante S1 obtida para as amostras da BRP.

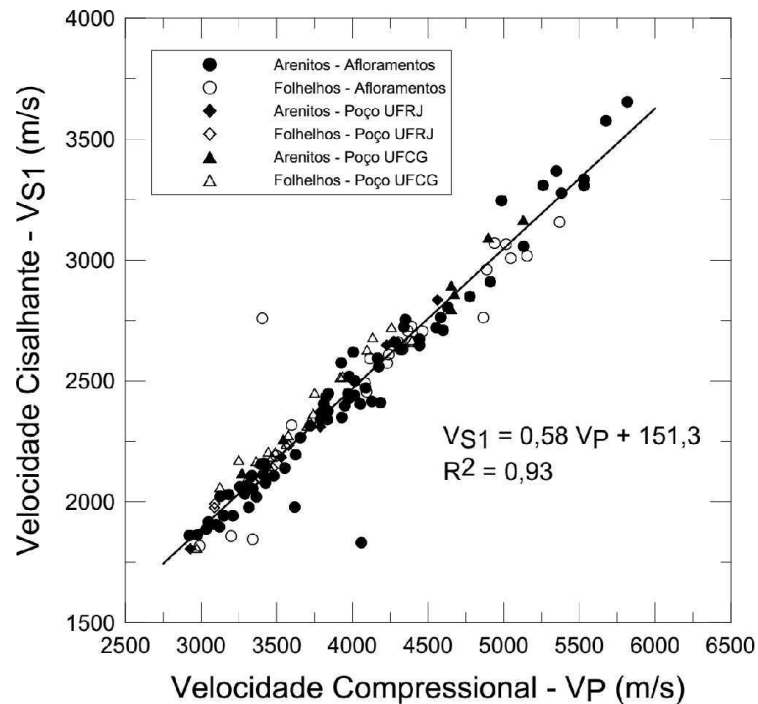


Figura 56 – Relação entre a velocidade de propagação cisalhante (S1) e compressional(P) para as amostras da BRP.

Para o comportamento geral das amostras, obteve-se  $V_{S1} = 0,58V_P + 151,3$ , com  $R^2 = 0,93$ . Porém, analisando separadamente cada conjunto, obteve-se os seguintes resultados:

$$V_{S1} = 0,60V_P + 46,8 \quad R^2 = 0,94 \quad (\text{Arenitos} - \text{Afloramentos}) \quad (4.2a)$$

$$V_{S1} = 0,53V_P + 359 \quad R^2 = 0,83 \quad (\text{Folhelhos} - \text{Afloramentos}) \quad (4.2b)$$

$$V_{S1} = 0,57V_P + 221 \quad R^2 = 0,99 \quad (\text{Arenitos} - \text{UFCG}) \quad (4.2c)$$

$$V_{S1} = 0,61V_P + 77,7 \quad R^2 = 0,95 \quad (\text{Folhelhos} - \text{UFCG}) \quad (4.2d)$$

$$V_{S1} = 0,63V_P + 41,2 \quad R^2 = 1,00 \quad (\text{Arenitos} - \text{UFRJ}) \quad (4.2e)$$

$$V_{S1} = 0,46V_P + 549 \quad R^2 = 0,94 \quad (\text{Folhelhos} - \text{UFRJ}) \quad (4.2f)$$

onde as unidades de velocidade são em  $m/s$ .

Observa-se um bom ajuste geral entre as medidas. Entretanto, quando comparado aos resultados citados na literatura, nota-se uma boa concordância dos resultados obtidos com aqueles para rochas saturadas com água (vide o conjunto de equações 2.19, por

exemplo). É importante ressaltar que as amostras da BRP, para este trabalho, passaram somente pelo processo de secagem, visando retirar a água absorvida durante o processo de preparação dos plugues, sem, no entanto, passarem por um processo mais rigoroso de limpeza. Assim, acredita-se que outros materiais presentes nos poros das amostras (como matéria orgânica, argila e etc.), particulares à cada formação analisada, possam impor variações específicas aos coeficientes das relações acima. Contudo, as relações entre as velocidades compressionais e cisalhantes para as amostras da BRP são indubitavelmente bem estabelecidas. Segundo Schön (2004), a atenuação de um meio reflete a "dificuldade" de propagação da onda naquele meio. Assim, como os fatores que atuam sobre as velocidades sísmicas são, em grande parte, os mesmos que atuam sobre a atenuação, busca-se correlacionar o fator de qualidade com as velocidades das ondas sísmicas, observando o modo de propagação, ou seja, o fator de qualidade obtido através da onda do tipo P com a velocidade de propagação da onda do P e, o fator de qualidade obtido através da onda do tipo S com a velocidade de propagação da onda S.

#### 4.5.4 Anisotropia das Ondas Cisalhantes

Uma estimativa da anisotropia transversal pode ser obtida a partir da razão entre as velocidades cisalhantes S1 e S2, visto que estas se propagam na mesma direção, mas polarizadas perpendicularmente.

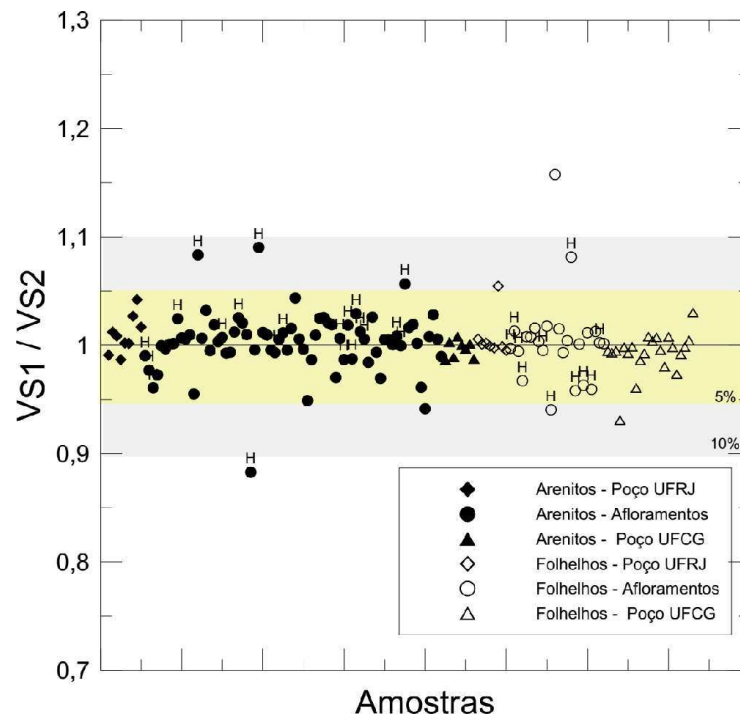


Figura 57 – Relação entre as velocidades de propagação cisalhantes para as amostras da BRP.

Observa-se na figura 58 que as amostras da BRP apresentam baixa anisotropia transversal, com a maioria das amostras com menos de 5% de variação entre as velocidades cisalhantes. É importante lembrar que deste conjunto também fazem parte algumas amostras coletadas horizontalmente, representadas pela letra "H" acima do símbolo, e, visto que são rochas sedimentares, espera-se que o acamamento exerça alguma influência sobre a anisotropia de velocidade medida. Concordando com tal afirmativa, observa-se na figura 58 que as amostras horizontais são, quase que inteiramente, as que apresentam maior anisotropia transversal. Contudo as velocidades são mais sensíveis à densidade da rocha, de modo que se não houver variação de densidade entre acamamentos distintos, pode não haver alterações significativas entre as velocidades analisadas, por isso amostras horizontais também compõem o conjunto de amostras com baixa anisotropia transversal. Assim, busca-se uma melhor caracterização da anisotropia utilizando o fator de qualidade  $Q$ , considerando que, como discutido no capítulo 02, tal medida talvez seja mais sensível às estruturas presentes na amostra. Outra vantagem é a possibilidade de se obter uma estimativa da anisotropia em todas as direções. A figura 59 apresenta a razão entre o fator de qualidade medido, através do método da razão espectral, para as ondas do tipo  $s_1$  e  $s_2$ .

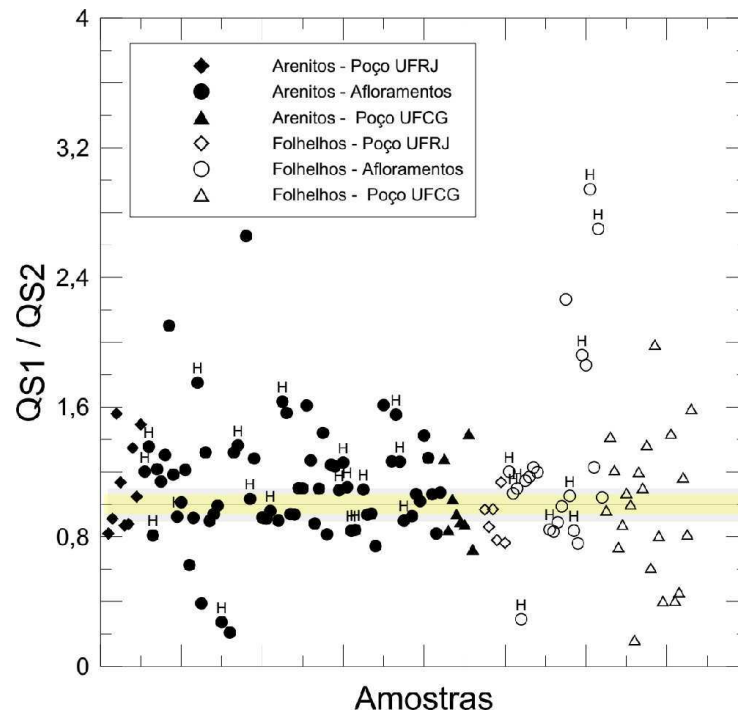


Figura 58 – Relação entre os fatores de qualidade (razão espectral) das ondas cisalhantes, para as amostras da BRP.

Nota-se, como esperado, uma maior dispersão dos valores para a razão entre os fatores de qualidade das ondas cisalhantes, quando comparadas à razão entre as velocidades. A maioria das amostras analisadas apresentam anisotropia transversal (estimada pelos fatores de qualidade) abaixo de 30%. Novamente as amostras de afloramento horizontais se destacam, apresentando anisotropias transversais maiores do que 60%, mostrando, de acordo com a literatura, que o fator de qualidade também é sensível a tal aspecto estrutural. Contudo, outras amostras, como arenitos de afloramento com orientações verticais e folhelhos oriundos do poço estratigráfico da UFCG e, também, com orientações verticais, apresentam um mesmo nível de anisotropia transversal. Justifica-se tal fato pela observação da complexidade estrutural da bacia, estampada em algumas amostras que apresentam bandas de deformação, falhas, juntas, entre outras marcas estruturais.

#### 4.5.5 Permeabilidade

A permeabilidade, quando tratando de possíveis reservatórios, é uma das mais importantes propriedades, relacionando-se diretamente à qualidade e às características de produção destes. Usualmente, na geofísica de exploração, busca-se informações de permeabilidade através do comportamento da onda *Stoneley*. Contudo, dada a importância da permeabilidade, e os custos em obter-se perfis de onda completa (necessário ao registro da

onda *Stoneley*), procura-se relacionar a permeabilidade à outras propriedades petrofísicas. A figura 60 ilustra as relações entre a permeabilidade e a  $V_P$ .

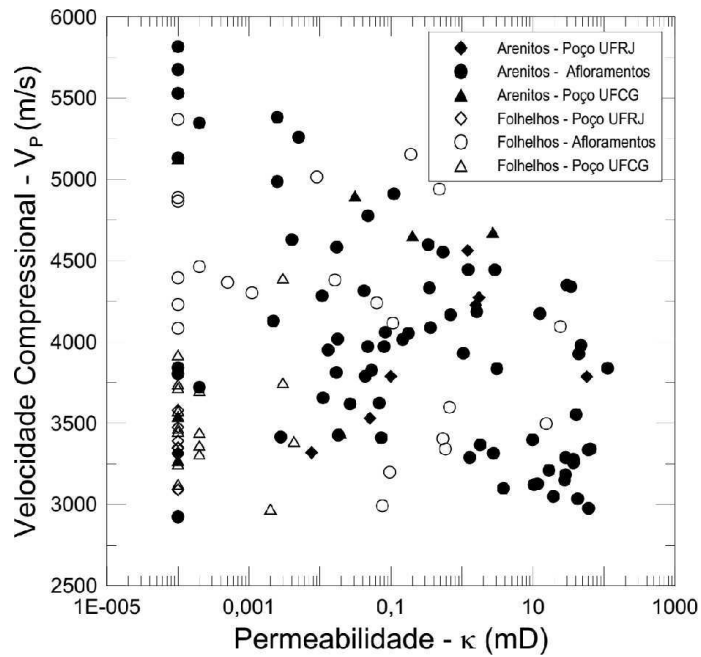


Figura 59 – Relação entre a permeabilidade e a velocidade compressional  $V_P$  para as amostras da BRP.

Na figura 61 é representada a relação da permeabilidade com as ondas cisalhantes.

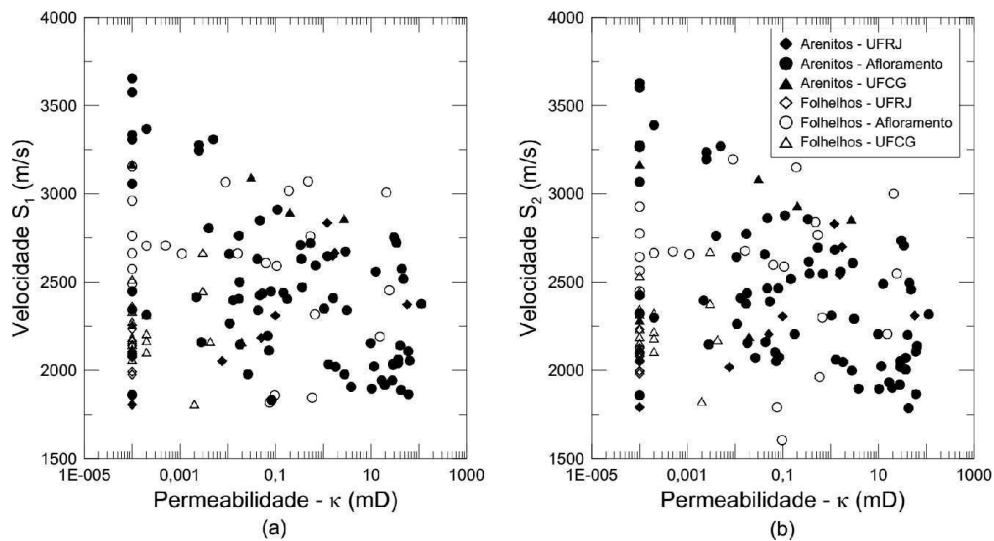


Figura 60 – Relação entre a permeabilidade e as velocidades cisalhantes (a)  $V_{S1}$  e (b)  $V_{S2}$  para as amostras da BRP.



Observa-se nas figuras 60 e 61 grande dispersão, evidenciando que não há uma clara relação da permeabilidade das rochas da BRP com as velocidades de propagação. O limite inferior de sensibilidade do permeômetro é  $10^{-4}mD$ , daí haver várias amostras que apresentam este valor.

Buscou-se relacionar, também, a permeabilidade à atenuação elástica. Os resultados são apresentados nas figuras 62 a 64. Observa-se que, de modo semelhante ao que ocorre para as velocidades de propagação, não é possível determinar uma relação coerente entre a permeabilidade e o fator de qualidade, já que para um mesmo valor da permeabilidade há uma significativa variação do fator de qualidade.

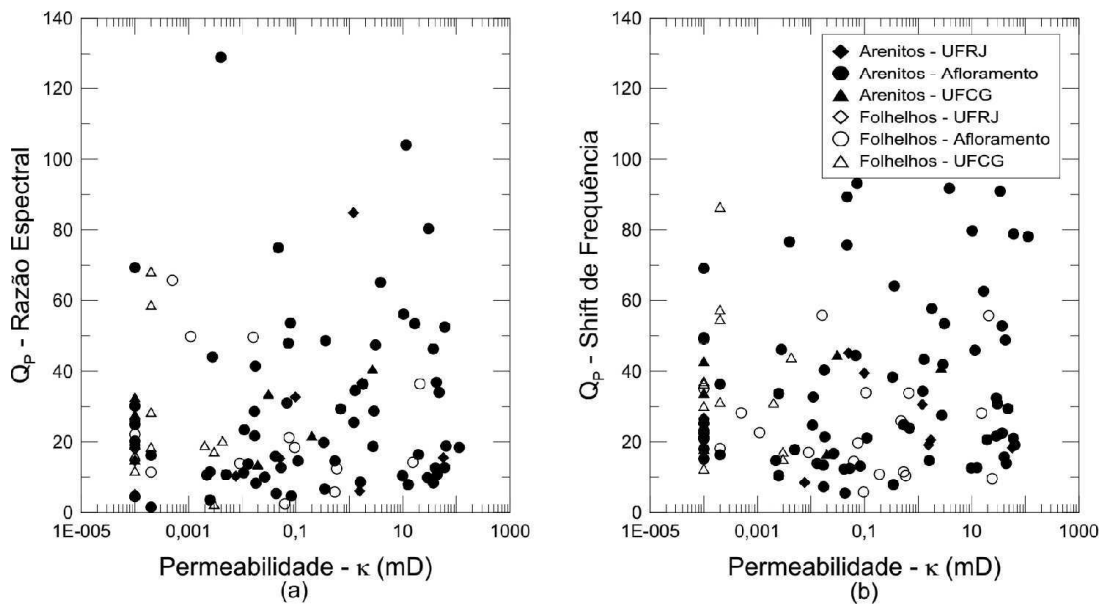


Figura 61 – Relação entre a permeabilidade e os fatores de qualidade compressional  $Q_P$  para a (a) razão espectral e o (b) shift de frequência para as amostras da BRP.

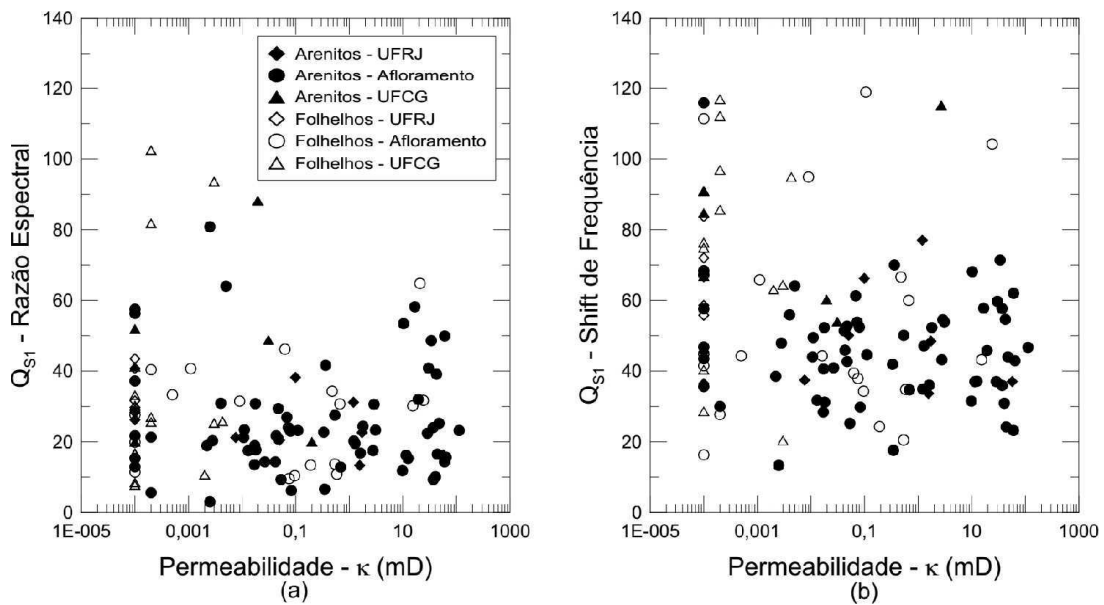


Figura 62 – Relação entre a permeabilidade e os fatores de qualidade cisalhante  $Q_{S1}$  para a (a) razão espectral e o (b) shift de frequência para as amostras da BRP.

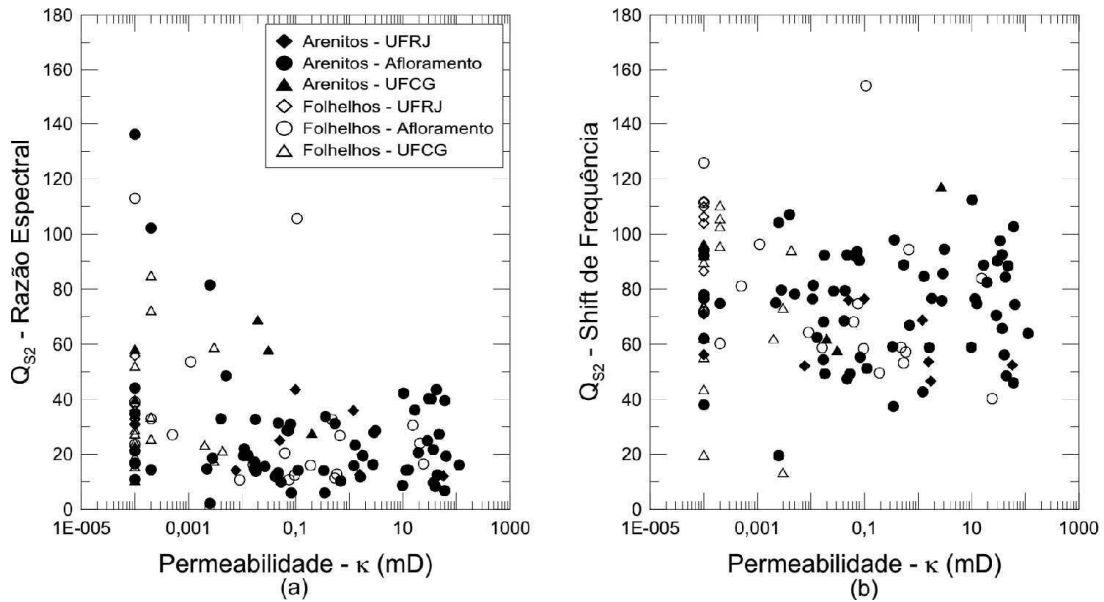


Figura 63 – Relação entre a permeabilidade e os fatores de qualidade cisalhante  $Q_{S2}$  para a (a) razão espectral e o (b) shift de frequência para as amostras da BRP.

Para as amostras da BRP, as relações entre permeabilidade e porosidade são apresentadas na figura 65.

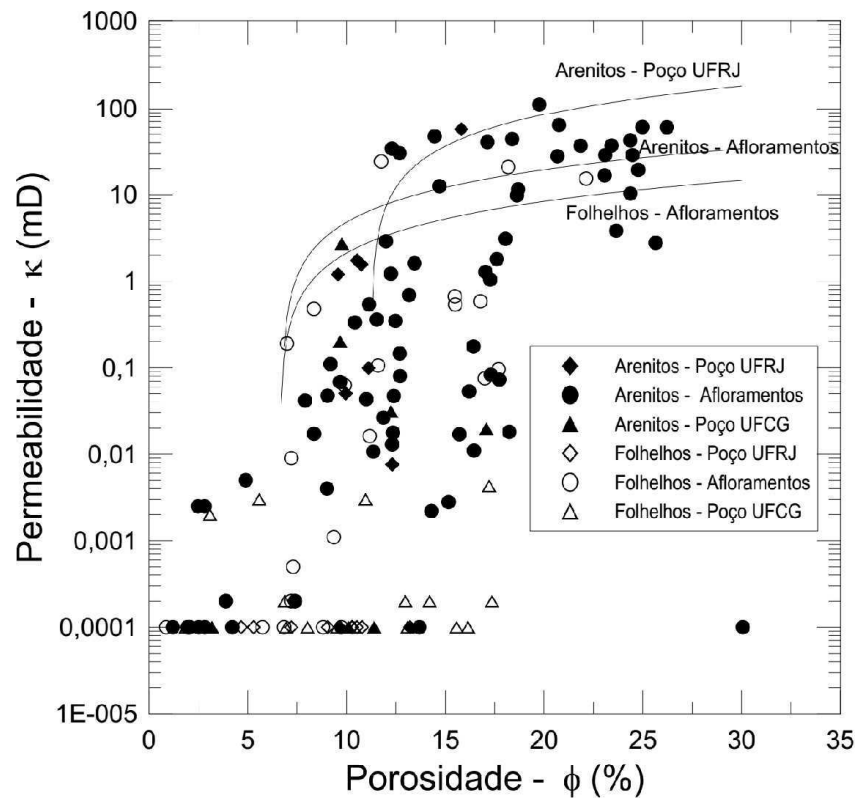


Figura 64 – Relação entre a permeabilidade e a porosidade para as amostras da BRP.

Para os arenitos oriundos do poço UFRJ-2-SS-1-PB, obtêm-se:

$$\ln(\kappa) = 9,72\phi - 109,3 \quad R^2 = 0,72 \quad (4.3)$$

indicando que, possivelmente, os fatores responsáveis pelo aumento da porosidade, diferente do que ocorre para os outros conjuntos de amostras, atuou também conectando os espaços porosos. Como observado na figura 65, para os outros grupos não há correlação considerável, apontado que, provavelmente, processos distintos atuaram para o desenvolvimento da porosidade e da permeabilidade.

## 5 Atenuação Elástica em Modelos Sintéticos

Dias *et al.* (2014) simularam numericamente o efeito de juntas em rochas siliciclásticas sobre a velocidade de propagação e sobre a atenuação de ondas acústicas, analisando diferentes direções para as juntas de deformação (em relação ao eixo da amostra), diferentes separações entre estas e variada espessura das mesmas. No referido trabalho, uma análise qualitativa do efeito de tais estruturas sobre a atenuação foi obtida, observando as formas de onda registradas pelo *software* de simulação. Assim, uma vez que as amostras de rocha da Bacia do Rio do Peixe, objetos desta dissertação, apresentam uma complexa gama de estruturas de deformação, e também são siliciclásticas, procurou-se obter relações quantitativas entre as juntas e a atenuação, a fim de melhor compreender alguns dos efeitos sobre as atenuações medidas para as amostras da BRP. Para tanto, foram reproduzidos os resultados obtidos por Dias *et al.* (2014), acrescentando a simulação da propagação de ondas em uma amostra de alumínio, utilizada como referência para as estimativas do fator de qualidade, e em outra amostra, isotrópica e homogênea, de rocha siliciclástica, que foi utilizada para a comparação entre os valores obtidos do fator de qualidade para as diferentes condições das juntas de deformação. A construção dos modelos sintéticos e a simulação da propagação de ondas acústicas foi realizada utilizando-se o *software Comsol Multiphysics*<sup>®</sup>.

Nas figuras 66 a 73 são apresentados os resultados obtidos no trabalho de Dias *et al.* (2014). As figuras 66 e 67 analisam o efeito da variação da direção das juntas sobre as ondas que se propagam no sentido descendente.

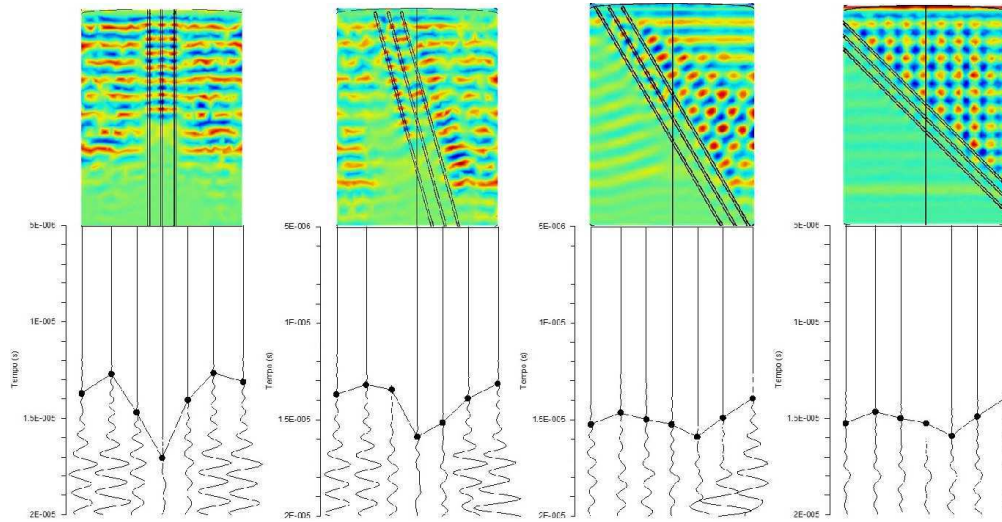


Figura 65 – *Snapshot* e traços da onda P simulados para ângulos de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . A espessura e a separação das juntas é de 0,5mm e 3mm, respectivamente (DIAS *et al.*, 2014).

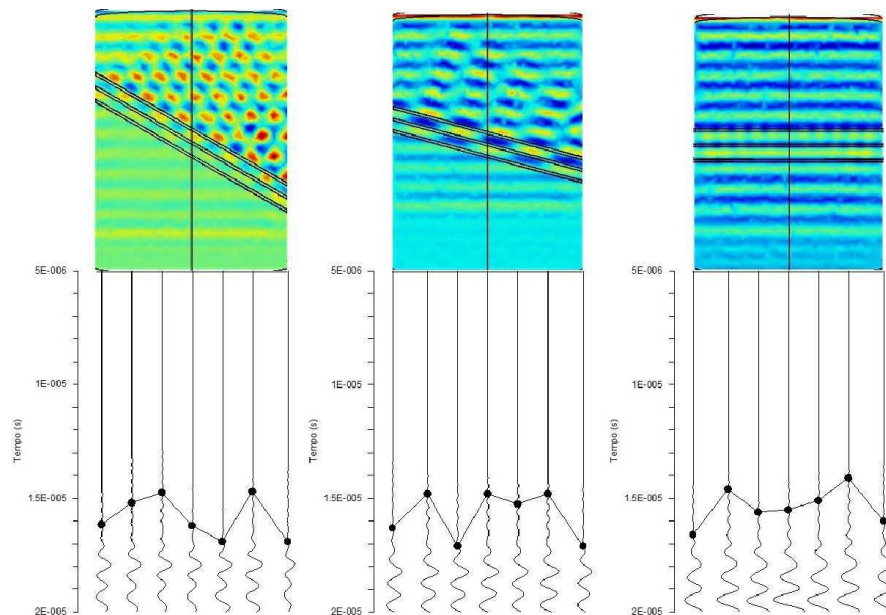


Figura 66 – *Snapshot* e traços da onda P simulados para ângulos de  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $90^\circ$ . A espessura e a separação das juntas é de 0,5mm e 3mm, respectivamente. Modificado de Dias *et al.* (2014).

Qualitativamente é possível observar que há uma redução significativa das amplitudes registradas para a inclinação da juntas de deformação entre  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , acompanhando um aumento no tempo de propagação. A partir de  $60^\circ$ , observa-se um aumento nas amplitudes e tempos médios de propagação sem alterações. É importante ressaltar que, embora

as figuras apresentem formas de onda para receptores pontuais, ensaios em laboratório registram o comportamento médio para toda a amostra. Assim, mesmo para uma análise qualitativa, deve-se observar o comportamento médio das ondas em uma mesma amostra.

Para a separação entre as juntas de deformação, nas figuras 68 a 70 pode-se observar que para a inclinação de  $0^\circ$ , a medida que a separação entre as juntas aumenta, crescem os tempos de propagação, enquanto a atenuação média não parece ser afetada. Para a inclinação de  $45^\circ$ , situação semelhante ocorre, sendo o aumento no tempo de propagação menos significativo. Já para a inclinação das juntas de  $90^\circ$ , os tempos de propagação e as amplitudes da ondas registradas não são afetados.

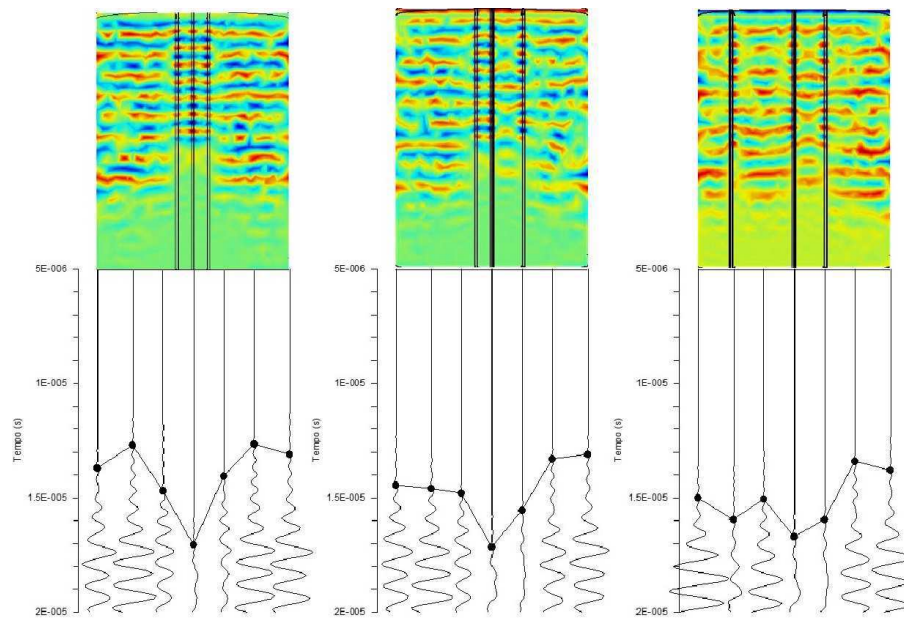


Figura 67 – *Snapshot* e traços da onda P simulados para juntas de deformação separadas por 3mm, 3 - 6mm, e 6 - 12mm, respectivamente. A espessura é de 0,5mm com de  $0^\circ$  de inclinação (DIAS *et al.*, 2014).

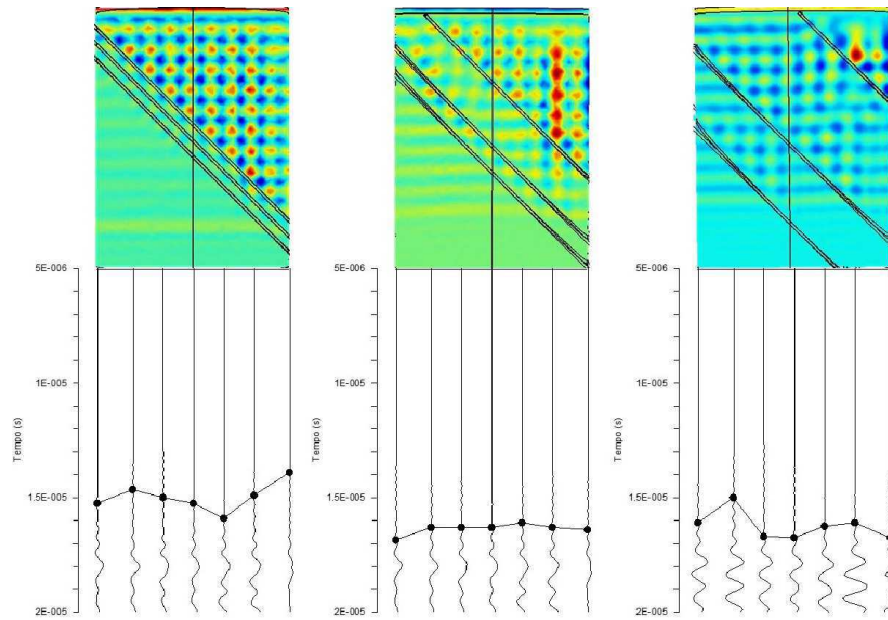


Figura 68 – *Snapshot* e traços da onda P simulados para juntas de deformação separadas por 3mm, 3 - 6mm e 6 - 12mm, respectivamente. A espessura é de 0,5mm com de 45° de inclinação (DIAS *et al.*, 2014).

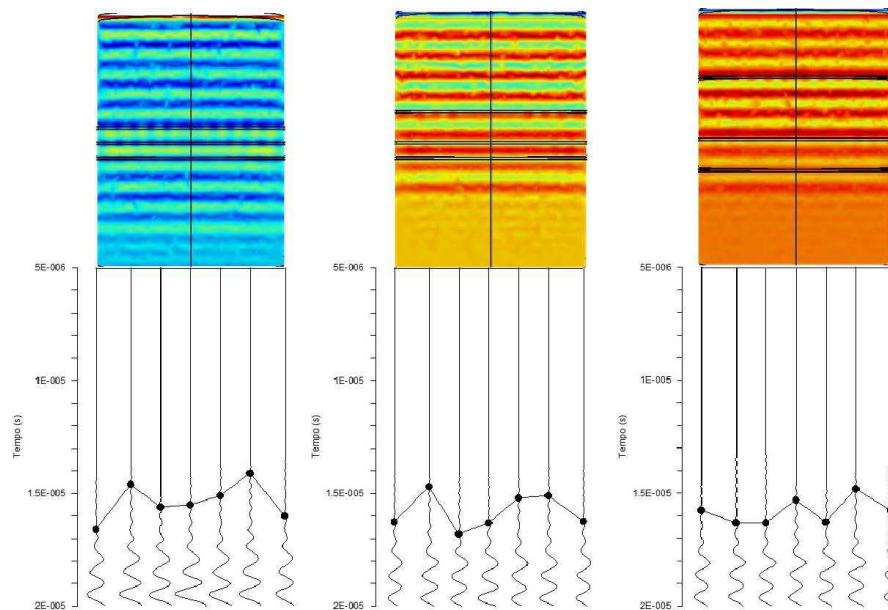


Figura 69 – *Snapshot* e traços da onda P simulados para juntas de deformação separadas por 3mm, 3 - 6mm e 6 - 12mm, repectivamente. A espessura é de 0,5mm com de 90° de inclinação (DIAS *et al.*, 2014).

As figuras 71 a 73 investigam o efeito da variação da espessura das juntas de deformação sobre as ondas P.

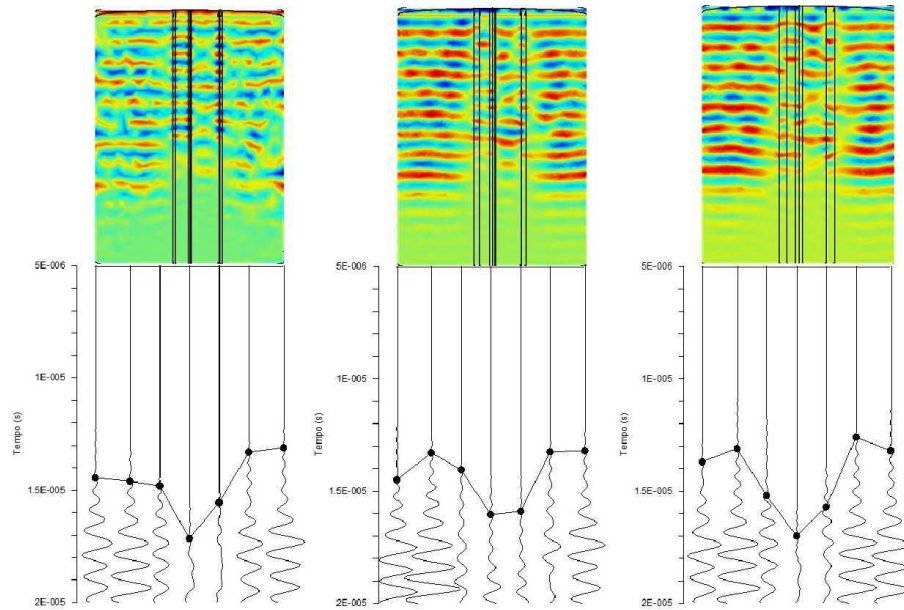


Figura 70 – *Snapshot* e traços da onda P simulados para juntas de deformação com espessura de 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm, respectivamente. A separação entre as juntas é de 3mm e 6mm com de 0° de inclinação (DIAS *et al.*, 2014).

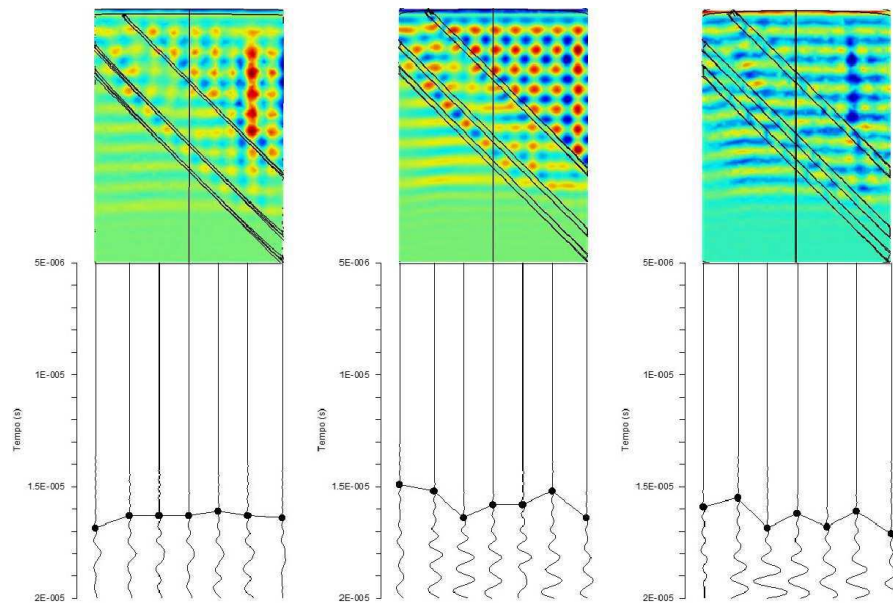


Figura 71 – *Snapshot* e traços da onda P simulados para juntas de deformação com espessura de 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm, respectivamente. A separação entre as juntas é de 3mm e 6mm com de 45° de inclinação (DIAS *et al.*, 2014).



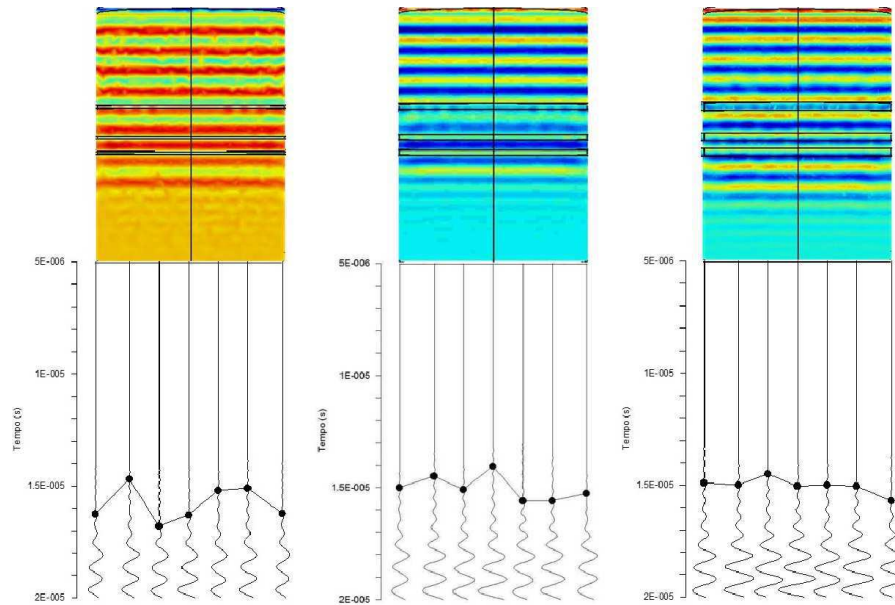


Figura 72 – *Snapshot* e traços da onda P simulados para juntas de deformação com espessura de 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm, respectivamente. A separação entre as juntas é de 3mm e 6mm com de 90° de inclinação (DIAS *et al.*, 2014).

Para as inclinações das juntas de 0° e 90° não parece haver um efeito significativo sobre a atenuação e os tempos de propagação em função da espessura das juntas de deformação. Já para 45° de inclinação, curiosamente, há um aumento das amplitudes conforme a espessura das juntas aumentam, enquanto os tempos médios de propagação não sofrem alterações.

## 5.1 Estimativa do Fator de Qualidade

Para as estimativas do fator de qualidade, foi utilizada apenas uma forma de onda, obtida pela média das ondas pontuais, para cada amostra. Como citado anteriormente, tal artifício fornece uma análise mais próxima dos ensaios laboratoriais.

Devido a dificuldades computacionais na modelagem dos modos de propagação das ondas cisalhantes, utilizou-se somente as ondas compressoriais para as análises da atenuação. No que tange a modelagem computacional, outro aspecto importante é que as estimativas do fator de qualidade foram obtidas somente pelo método do razão espectral, pois não foi possível obter resultados satisfatórios para a simulação do registro do sistema, sem alterações significativas nos modelos utilizados, necessários para a estimativa do fator de qualidade pelo método do shift de frequência.

Utilizando uma rotina MatLab (Anexo C), foram calculados valores para o fator de qualidade. Os resultados são apresentado na Tabela 5.

Os números para as amostras na Tabela 5 indicam a ordem na qual os casos apareceram nas figuras 66 a 73, sendo a amostra de referência a de número 0. Note que alguns casos não estão presentes na tabela, pois já foram representados por outras situações. Por exemplo, o caso 8 é idêntico ao caso 1.

Ressalta-se que as simulações foram realizadas somente para a propagação das ondas compressoriais, sem a adição de pressões confinantes. Sem o efeito da pressão confinante reduz-se consideravelmente o valor do fator de qualidade. Sob esta ótica, o valor obtido para a amostra de referência encontra-se em uma faixa aceitável, concordando inclusive com os valores obtidos em amostras reais, para as condições de pressão confinante mais baixas (vide seções 4.1 – 4.3).

Tabela 5 – Estimativa do Fator de Qualidade para as diferentes condições espaciais das juntas de deformação, pelo método da Razão Espectral.

| Amostra | Inclinação | Espessura(mm)  | Separação(mm) | Fator $Q$ |
|---------|------------|----------------|---------------|-----------|
| 0       | —          | sem deformação | —             | 13,7      |
| 1       | 0°         | 0,5            | 3             | 4,7       |
| 2       | 15°        | 0,5            | 3             | 5,0       |
| 3       | 30°        | 0,5            | 3             | —         |
| 4       | 45°        | 0,5            | 3             | —         |
| 5       | 60°        | 0,5            | 3             | —         |
| 6       | 75°        | 0,5            | 3             | 8,9       |
| 7       | 90°        | 0,5            | 3             | 8,9       |
| 10      | 0°         | 0,5            | 6 e 12        | 10,7      |
| 13      | 45°        | 0,5            | 6 e 12        | 13        |
| 16      | 90°        | 0,5            | 6 e 12        | 9,7       |
| 17      | 0°         | 0,5            | 3 e 6         | 8,7       |
| 18      | 0°         | 1,0            | 3 e 6         | 11,6      |
| 19      | 0°         | 1,5            | 3 e 6         | 12,2      |
| 20      | 45°        | 0,5            | 3 e 6         | —         |
| 21      | 45°        | 1,0            | 3 e 6         | 9,5       |
| 22      | 45°        | 1,5            | 3 e 6         | 10,8      |
| 23      | 90°        | 0,5            | 3 e 6         | 12,2      |
| 24      | 90°        | 1,0            | 3 e 6         | 8,4       |
| 25      | 90°        | 1,5            | 3 e 6         | 10,3      |

Para alguns casos, o fator de qualidade apresentou resultados negativos elevados, indicando que frequências mais baixas seriam preferencialmente atenuadas em favor das altas frequências. Assim, como não foi possível interpretar de modo razoável tais resultados,

optou-se por sua omissão.

## 6 Conclusões

Nesta dissertação foram obtidas e analisadas propriedades petrofísicas e elásticas de amostras oriundas da Bacia do Rio do Peixe, através de ensaios laboratoriais e computacionais, fornecendo informações sobre a porosidade, a permeabilidade, as velocidades de propagação e atributos de atenuação de ondas elásticas para aquela bacia. As medidas das velocidades elásticas foram realizadas às frequências de 700KHz, para as ondas de corpo compressionais, e 600KHz, para as ondas de corpo cisalhantes. Quanto às amostras analisadas, estas foram caracterizadas macroscopicamente, dividindo-as, de acordo com a composição mineralógica identificada, em arenitos e folhelhos. Ácido clorídrico foi utilizado para confirmar a presença de material carbonático nas amostras, indicando uma cimentação carbonática fortemente presente em toda a Bacia do Rio do Peixe. Já para as amostras de folhelhos da Formação Sousa, obtidos de maiores profundidades em poços estratigráficos, indícios de matéria orgânica e óleo foram encontrados.

Em função da pressão de confinamento, observa-se que as velocidades de propagação, módulos elásticos e, menos perceptível, os fatores de qualidade, tendem a atingir um valor máximo para uma determinada pressão, a partir da qual, variações positivas na pressão não provocam alterações significativas nas propriedades medidas.

Três níveis de densidade de grãos foram identificados, os quais estão relacionados à composição mineral das rochas. A densidade de grão mais elevada é indicadora de cimentação carbonática, muito comum em grande parte da bacia. Já a densidade de grão mais baixa, evidenciada principalmente nos folhelhos oriundos de poços estratigráficos, indica a predominância de matéria orgânica.

Porosidades de até 30% foram medidas, obtendo-se boas correlações com as velocidades elásticas para as amostras de afloramento (moderadamente melhores para os arenitos). Entretanto, para as amostras oriundas dos poços estratigráficos, não observa-se correlação considerável, principalmente para os folhelhos. Tal fato indica que outros fatores devem atuar predominantemente sobre as velocidades elásticas nestas amostras. Acredita-se que a cimentação carbonática atue elevando as velocidades elásticas, enquanto a argilosidade, a presença de matéria orgânica e as fraturas reduzam-na. Para o fator de qualidade, a correlação com a porosidade é fraca. Já os valores dos módulos elásticos diminuem de forma consistente com o aumento da porosidade, não havendo diferença perceptível, nessa relação, para arenitos e folhelhos.

Os valores medidos para a permeabilidade das amostras variam de 0 a 112mD, contudo não há clara correlação com as propriedades elásticas. Como esperado, as maiores permeabilidades foram obtidas para os arenitos, principalmente os de afloramento. Em

geral os folhelhos apresentam atributos de um ótimo selante, com baixa/nula permeabilidade. Contudo, observam-se valores de até 25mD para alguns folhelhos, principalmente aqueles mais profundos, que apresentam intenso fraturamento. Para alguns intervalos de profundidade, os folhelhos da Formação Sousa apresentam características granular e físsil, indicando alta porosidade secundária, que, eventualmente, pode estar associada com a permeabilidade mais elevada destes folhelhos.

Estruturas presentes, como falhas e juntas, atuam principalmente sobre a porosidade e a permeabilidade das amostras. Os efeitos destas estruturas sobre as velocidades medidas é menos significativo. De acordo com a literatura, os atributos de atenuação são mais sensíveis a tais estruturas. Entretanto, não foi possível determinar, de modo fundamentado, as relações das estruturas presentes na bacia com os valores obtidos para o fator de qualidade.

Na comparação entre as metodologias para a estimativa do fator de qualidade nota-se boa concordância, principalmente para as ondas P e S1 (com valores entre 5 e 140), embora o método do shift de frequência forneça valores relativamente maiores, quando comparado aos valores obtidos pelo método da razão espectral. Para o conjunto de amostras analisado, o método do shift de frequência mostrou-se mais robusto, principalmente por não depender do comprimento da amostra.

As estimativas da atenuação elástica em modelos virtuais mostraram-se satisfatórias, quantificando os efeitos de juntas e falhas sobre o valor do fator de qualidade. Foram obtidos, inclusive, resultados bastante próximos daqueles obtidos em laboratório, mesmo considerando modelos computacionais extremamente simplificados.

Visto que as variações em função da pressão são estreitamente relacionadas com as características do espaço poroso, recomenda-se, como continuidade da pesquisa, uma análise microscópica que busque quantificar a influência da forma e distribuição do espaço poroso sobre as propriedades elásticas da Bacia do Rio do Peixe.

## Referências

- BARTON, N. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. [S.l.]: CRC Press, 2007. (Balkema-proceedings and monographs in engineering, water, and earth sciences). ISBN 9780203964453. Citado na página 12.
- BEST, A. I.; MCCANN, C.; SOTHOTT, J. The relationships between the velocities, attenuations and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks. *Geophysical Prospecting*, 1994. Citado na página 17.
- BOURBIÉ, T.; COUSSY, O.; ZINSZER, B. *Acoustics of porous media*. Houston: Gulf Publishing Company, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.
- BRENNAN, B. J.; STACEY, F. D. Frequency dependence of elastic of rock - test of seismic velocity dispersion. *Nature*, v. 268, 1977. Citado na página 11.
- CARVALHO, I. d. S.; LEONARDI, G. Geologia das bacias de Pombal, Sousa, Uiraúna-Brejo das Freiras e Vertentes (Nordeste do Brasil). *Anais da Academia brasileira de Ciências*, 1992. Citado na página 1.
- CASTAGNA, J. P.; BATZLE, M. L.; EASTWOOD, R. L. Relationships between compressional wave and shear wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, 1985. Citado na página 16.
- CASTRO, D. L.; BRANCO, R. M. G. C. Caracterização da arquitetura interna das bacias do vale do cariri (ne do brasil), com base em modelagem gravimétrica 3-d. *Revista Brasileira de Geofísica*, 1999. Citado na página 1.
- DIAS, C. H.; SOARES, J. A.; MEDEIROS, L. C. Simulação numérica do efeito de juntas de deformação sobre a velocidade e a atenuação da onda acústica em rochas siliciclásticas. *Anais do VI Simpósio Brasileiro de Geofísica*, 2014. Citado 7 vezes nas páginas xii, 73, 74, 75, 76, 77 e 78.
- FIGUEIREDO, J. J. S. *et al.* Shear wave anisotropy from aligned inclusions: ultrasonic frequency dependence of velocity and attenuation. *Geophysical Journal International*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas viii e 27.
- GORDON, R. B.; DAVIS, L. A. Velocity and attenuation os seismic waves in imperfectly elastic rock. *Journal of Geophysical Research*, 1968. Citado na página 11.
- HAMILTON, E. L. Compressional-wave attenuation in marine sediments. *Geophysics*, 1972. Citado na página 11.
- HAN, D.; NUR, A.; MORGAN, D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 1986. Citado na página 16.
- JONHSTON, D. H.; TOKSÖZ, M. N.; TIMUR, A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. laboratory measurements. *Geophysics*, 1979. Citado na página 12.

- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Third edition. [S.l.]: Wiley, 2002. ISBN 9781118698938. Citado 4 vezes nas páginas viii, 7, 8 e 15.
- KLIMENTOS, T. Geometric corrections in attenuation measurements. *Geophysical Prospecting*, 1991. Citado na página 17.
- KNOPOFF, L. 'Q'. *Reviews of Geophysics*, 1964. Citado 3 vezes nas páginas xiv, 8 e 13.
- KNOPOFF, L.; MCDONNARD, G. J. F. Attenuation of small amplitude stress waves in solids. *Reviews of Modern Physics*, 1958. Citado na página 11.
- LIMA FILHO, M. L. *Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Rio do Peixe - PB*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, 1991. Citado na página 2.
- MATSUSHIMA, J. *et al.* Estimation of ultrasonic scattering attenuation in partially frozen brines using magnetic resonance images. *Geophysics*, 2011. Citado na página 28.
- MAVKO, G. M.; NUR, A. The effect of nonelliptical cracks on the compressibility of rocks. *Journal of Geophysical Research*, 1978. Citado na página 17.
- MENDONÇA FILHO, J. G.; CARVALHO, I. d. S.; AZEVEDO, D. d. A. Aspectos geoquímicos do Óleo da bacia de Sousa (cretáceo inferior), nordeste do Brasil: Contexto geológico. *UNESP, Geociências*, 2006. Citado na página 1.
- MINEAR, M. J. Clay models and acoustic velocities. In: *SPE 57th Annual fall technical conference and exhibition*. [S.l.: s.n.], 1982. Citado na página 16.
- MORSCHBACHER, M.; VASQUEZ, G. F.; JUSTEN, J. Metodologia de estimativa das velocidades sísmicas em ensaios de laboratório. *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*, Brasília, 2010. Citado 2 vezes nas páginas viii e 23.
- MURPHY, W. F.; WINKLER, K. W.; KLEINBERG, R. L. Frame modulus weakening in sandstones: the effect of adsorption on surface energy. *Geophysical Research Letters*, 1984. Citado na página 17.
- NOGUEIRA, F. C. C. *et al.* Cretaceous intracontinental rifting and post-rift in NE Brazil: Insights from the Rio do Peixe basin. *Tectonophysics*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas viii e 4.
- NOGUEIRA, F. C. C.; OLIVEIRA, M. S.; CASTRO, D. L. Estudo magnético e gravimétrico do arcabouço estrutural da bacia do Rio do Peixe - pb. *Revista de Geologia*, 2004. Citado na página 1.
- NUR, A.; WANG, Z. *Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks: Experimental studies*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1989. (Geophysics reprint series, v. 1). ISBN 9780931830709. Citado na página 15.
- NUSSENZVEIG, H. *Curso de física básica: Fluidos, oscilações e ondas, calor*. [S.l.]: Edgard Blucher, 2002. (Curso de física básica). ISBN 9788521202998. Citado na página 6.
- O'CONNELL, R. J.; BUDIANSKY, B. Measures of dissipation in viscoelastic media. *Geophysical Research Letters*, 1978. Citado na página 11.

- PICKET, G. R. Acoustic character logs and their application in formation evaluation. *Journal of Petroleum Technology*, 1963. Citado na página 16.
- PONTE, F. C.; HASHIMOTO, A. T.; DINO, R. *Geologia das Bacias Mesozóicas do interior do Nordeste do Brasil*. [S.l.], 1991. Citado na página 2.
- PRESS, F. Seismic wave attenuation in the crust. *Journal of Geophysical Research*, 1964. Citado na página 25.
- QUAN, Y.; HARRIS, J. M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- RAND, H. M. Reconhecimento gravimétrico da bacia do rio do peixe, paraíba. *Anais do 11º Simpósio de Geologia do Nordeste*, 1984. Citado na página 1.
- RAYMER, L. L.; HUNT, E. R.; GARDNER, J. S. An improved sonic transit time-to-porosity transform. In: *SPWLA 21th Annual logging symposium*. [S.l.: s.n.], 1982. Citado na página 14.
- ROSA, A. L. R. *Análise do Sinal Sísmico*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), 2010. ISBN 9878588690158. Citado na página 7.
- SANTIAGO, K. F. F. L. *Determinação das constantes elásticas estáticas e dinâmicas das rochas da Formação Souza, Bacia do Rio do Peixe, PB*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2015. Citado 3 vezes nas páginas viii, 2 e 45.
- SCHEIDEGGER, A. *The physics of flow through porous media*. [S.l.]: University of Toronto Press, 1974. ISBN 9780802018496. Citado na página 17.
- SCHÖN, J. *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*. [S.l.]: Elsevier, 2004. (Developments in Petroleum Science Series). ISBN 9780080443461. Citado na página 66.
- SHAPIRO, S. A.; MÜLLER, T. M. Seismic signatures of permeability in heterogeneous porous media. *Geophysics*, 1999. Citado na página 17.
- SILVA, A. N. *Arquitetura, Litofácies e Evolução Tectonoestratigráfica da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — UFRN, 2009. Citado na página 3.
- THOMPSON, G.; TURK, J. *Introduction to Physical Geology*. [S.l.]: Saunders College Pub., 1998. (Saunders golden sunburst series). ISBN 9780030243486. Citado na página 6.
- TIAB, D.; DONALDSON, E. *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. [S.l.]: Elsevier Science, 2011. ISBN 9780123838490. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 16.
- TOKZÖZ, M. N.; JOHNSTON, D. H. (Ed.). *Seismic Wave Attenuation*. United States of America: Society of Exploration Geophysicists, 1981. (Geophysics reprint series No. 2). ISBN 0931830168. Citado 4 vezes nas páginas 9, 11, 18 e 25.
- VASQUEZ, G. F. *Comportamento Viscoelástico do Arenito Namorado e suas Relações com Atributos Faciológicos*. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, Campinas, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 18.



- VASQUEZ, G. F.; DILLON, L. D. Multidisciplinary effort on reservoir characterization at campos basin - petrophysical basis. In: *SEG summer research workshop*. [S.l.: s.n.], 1994. Citado na página 17.
- VERNIK, L. Predicting lithology and transport properties from acoustic velocities based on petrophysical classification of siliciclastics. *Geophysics*, 1994. Citado na página 15.
- VERNIK, L.; NUR, A. Petrophysical classification of siliciclastics for lithology and porosity prediction from seismic velocities. *AAPG Bulletin*, 1992. Citado na página 15.
- WINKLER, K. W.; LIU, H.; JOHNSON, D. L. Permeability and borehole stoneley waves: Comparison between experiment and theory. *Geophysics*, 1989. Citado na página 17.
- WYLLIE, M. R. J.; GREGORY, A. R.; GARDNER, G. H. F. Elastic wave velocities in heterogeneous porous media. *Geophysics*, 1956. Citado na página 13.
- ZHANG, C. *Seismic absorption estimation and compensation*. Tese (Doutorado) — The University of British Columbia, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.
- ZINSZNER, B.; PELLERIN, F. *A Geoscientist's Guide to Petrophysics*. [S.l.]: Editions Technip, 2007. (IFP Publications). ISBN 9782710808992. Citado 2 vezes nas páginas viii e 9.

# Anexos

## ANEXO A – Materiais e Equipamentos



Figura 73 – Equipamentos utilizados, presentes na sala de preparação de amostras do LabPetro UFCG. (a) Serra de bancada, (b) plugadeira de bancada e (c) retificador.

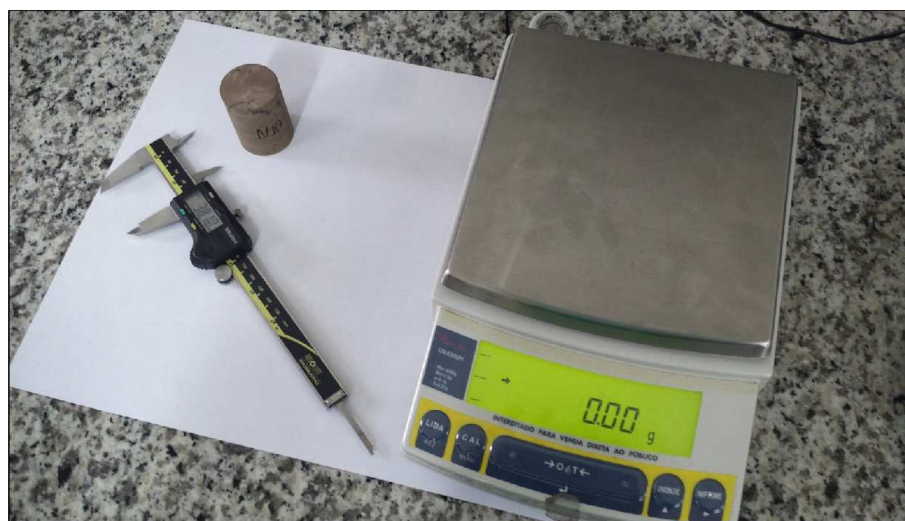


Figura 74 – Balança e paquímetro digitais utilizados para obter o peso e as dimensões de cada amostra.

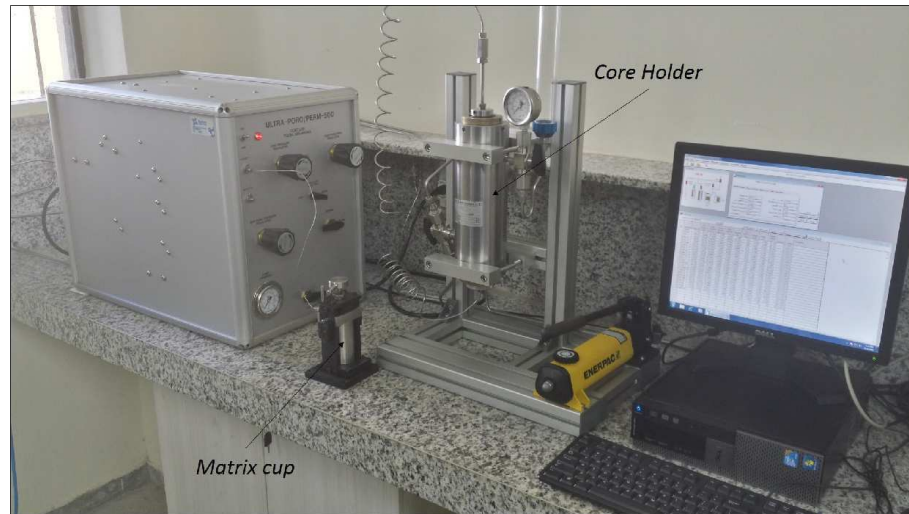


Figura 75 – Permoporosímetro presente no LabPetro UFCG.



Figura 76 – Sistema Autolab500, presente no LabPetro UFCG.

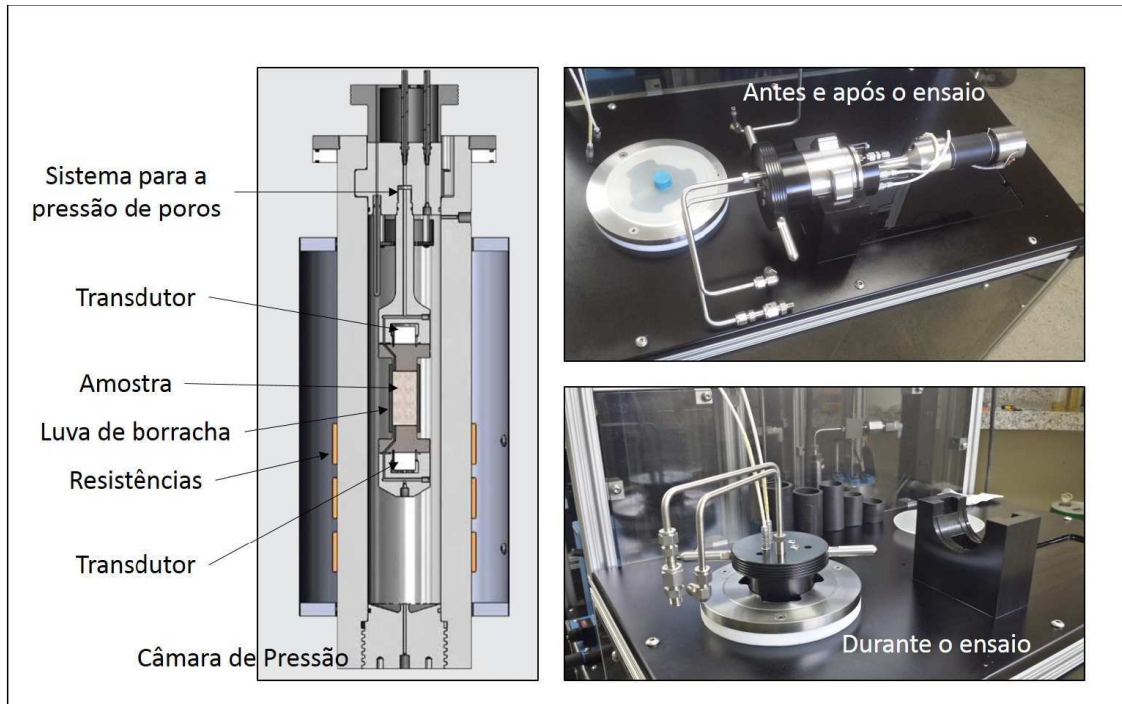


Figura 77 – Detalhe da câmara de pressão e do conjunto receptor-amostra-receptor, do sistema autolab500.

## ANEXO B – Módulos Elásticos e Fatores de Qualidade

Tabela 6 – Módulos elásticos obtidos e Fatores de Qualidade estimados para as amostras da BRP (dados obtidas à pressão confinante de 40MPa).

| Amostra | $K(GPa)$ | $G(GPa)$ | $QP_{RE}$ | $QS1_{RE}$ | $QS2_{RE}$ | $QP_{SF}$ | $QS1_{SF}$ | $QS2_{SF}$ |
|---------|----------|----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| A1      | 14,1     | 11,3     | 15,3      | 20,5       | 25,0       | 45,2      | 50,1       | 76,0       |
| A2      | 12,5     | 10,1     | 18,0      | 28,3       | 31,1       | 25,2      | 45,4       | 71,1       |
| A3      | 9,5      | 7,2      | 14,6      | 26,2       | 16,8       | 21,6      | 36,5       | 56,2       |
| A4      | 20,2     | 16,8     | 36,7      | 22,6       | 19,9       | 20,6      | 48,5       | 46,6       |
| A5      | 23,9     | 18,9     | 84,8      | 31,2       | 35,9       | 30,5      | 77,0       | 68,7       |
| A6      | 16,8     | 12,4     | 32,7      | 38,2       | 43,5       | 39,4      | 66,2       | 76,5       |
| A7      | 15,2     | 11,8     | 15,5      | 16,3       | 12,1       | 18,3      | 37,0       | 52,4       |
| A8      | 20,6     | 15,6     | 6,1       | 13,3       | 12,7       | 19,1      | 33,7       | 53,6       |
| A9      | 12,8     | 9,6      | 10,3      | 21,2       | 14,2       | 8,5       | 37,5       | 52,1       |
| A10     | 22,2     | 16,7     | 15,9      | 14,3       | 11,9       | 12,3      | 51,4       | 68,5       |
| A11     | 11,0     | 10,0     | 10,4      | 11,8       | 8,7        | 12,6      | 31,5       | 58,9       |
| A12     | 10,9     | 9,0      | 18,8      | 15,6       | 19,3       | 19,1      | 42,9       | 74,4       |
| A13     | 13,6     | 10,1     | 12,6      | 10,1       | 8,3        | 15,7      | 30,9       | 56,1       |
| A14     | 9,1      | 8,6      | 104,0     | 16,2       | 14,2       | 45,9      | 37,0       | 76,5       |
| A15     | 35,4     | 24,0     | 69,3      | 57,5       | 44,1       | 22,3      | 67,3       | 76,6       |
| A16     | 10,0     | 8,5      | 12,7      | 14,3       | 6,8        | 21,0      | 23,2       | 46,0       |
| A17     | 7,6      | 6,7      | 4,5       | 12,9       | 10,9       | 18,0      | 43,5       | 78,0       |
| A18     | 19,6     | 16,0     | 34,0      | 25,2       | 27,3       | 29,4      | 44,0       | 88,4       |
| A19     | 20,0     | 17,0     | 80,3      | 40,8       | 40,3       | 30,8      | 59,7       | 90,2       |
| A20     | 20,5     | 16,8     | —         | 48,6       | 40,1       | 90,9      | 71,4       | 97,6       |
| A21     | 18,1     | 13,6     | 24,9      | 21,7       | 34,7       | 21,0      | 46,8       | 92,2       |
| A22     | 17,6     | 9,5      | 10,0      | 14,3       | 15,6       | 16,7      | 40,9       | 79,3       |
| A23     | 17,8     | 11,8     | 5,4       | 21,7       | 12,4       | 5,5       | 45,9       | 79,5       |
| A24     | 16,5     | 13,0     | 1,5       | 5,6        | 14,4       | 16,3      | 30,0       | 74,8       |
| A25     | 14,4     | 13,6     | 10,8      | 16,5       | 12,5       | 13,9      | 24,2       | 48,5       |
| A26     | 17,9     | 13,1     | 13,8      | 17,5       | 19,5       | 13,9      | 31,7       | 62,5       |
| A27     | 14,9     | 12,6     | 12,7      | 9,3        | 9,9        | 12,5      | 25,2       | 49,3       |
| A28     | 27,5     | 26,7     | 3,6       | 80,8       | 81,5       | 33,7      | 257,7      | 104,2      |
| A29     | 41,0     | 33,6     | 20,2      | 37,2       | 136,2      | 69,1      | 68,4       | 94,1       |
| A30     | 37,8     | 32,4     | —         | —          | —          | 23,2      | 115,9      | 159,2      |
| A31     | 33,4     | 28,5     | 16,2      | 21,3       | 102,2      | 36,3      | —          | —          |
| A32     | 32,8     | 26,8     | 10,7      | 64,0       | 48,5       | 17,8      | 64,1       | 78,2       |
| A33     | 38,4     | 26,8     | 11,5      | 3,0        | 2,2        | 10,4      | 13,3       | 19,5       |
| A34     | 41,6     | 28,2     | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| A35     | 41,5     | 27,8     | 4,6       | 56,3       | 21,2       | 49,5      | 57,6       | 38,0       |

Tabela 6 (Continuação)

| Amostra | $K(GPa)$ | $G(GPa)$ | $QP_{RE}$ | $QS1_{RE}$ | $QS2_{RE}$ | $QP_{SF}$ | $QS1_{SF}$ | $QS2_{SF}$ |
|---------|----------|----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| A36     | 25,2     | 8,5      | 4,7       | 6,2        | 6,0        | 13,1      | 29,8       | 55,3       |
| A37     | 12,1     | 10,1     | 8,3       | 17,7       | 13,8       | 21,4      | 31,2       | 49,3       |
| A38     | 20,8     | 11,8     | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| A39     | 15,5     | 12,8     | 28,6      | 13,5       | 14,7       | 13,4      | 28,4       | 54,4       |
| A40     | 15,7     | 13,6     | 30,1      | 15,3       | 16,8       | 15,2      | 35,6       | 62,0       |
| A41     | 9,6      | 8,4      | 8,4       | 9,3        | 9,7        | 22,5      | 35,9       | 65,7       |
| A42     | 10,3     | 8,2      | —         | —          | —          | 32,4      | —          | —          |
| A43     | 9,0      | 8,0      | 9,9       | 22,4       | 24,9       | 21,6      | 37,0       | 70,5       |
| A44     | 30,3     | 19,6     | 14,6      | 23,2       | 14,2       | 21,1      | 44,6       | 51,2       |
| A45     | 28,3     | 19,3     | —         | 20,8       | 13,3       | 89,3      | 42,7       | 47,4       |
| A46     | 26,3     | 18,4     | 129,0     | 30,9       | 32,9       | 76,6      | 55,9       | 107,1      |
| A47     | 16,4     | 10,8     | 31,0      | 26,9       | 28,7       | 44,4      | 61,3       | 91,9       |
| A48     | 21,7     | 15,6     | 6,7       | 6,6        | 6,0        | 7,9       | 17,6       | 37,4       |
| A49     | 25,8     | 18,3     | 21,7      | 18,9       | 17,2       | 7,3       | 40,6       | 68,1       |
| A50     | 25,1     | 18,0     | 19,8      | 22,7       | 14,1       | 38,3      | 41,9       | 59,1       |
| A51     | 23,5     | 16,2     | 25,5      | 20,2       | 15,9       | 34,3      | 34,9       | 42,7       |
| A52     | 25,1     | 16,8     | 14,6      | 27,5       | 31,2       | 24,8      | 50,1       | 88,8       |
| A53     | 23,8     | 15,9     | 28,7      | 30,6       | 27,9       | 41,9      | 54,5       | 85,6       |
| A54     | 15,3     | 11,4     | 18,4      | 23,2       | 16,1       | 78,1      | 46,7       | 63,9       |
| A55     | 16,1     | 11,4     | 47,4      | 23,3       | 28,6       | 53,4      | 53,9       | 94,5       |
| A56     | 19,3     | 14,9     | 29,3      | 12,8       | 10,3       | 23,9      | 34,7       | 66,9       |
| A57     | 19,2     | 14,5     | 48,6      | 41,6       | 33,7       | 64,1      | 70,0       | 97,9       |
| A58     | 20,7     | 16,2     | 11,2      | 21,2       | 19,5       | 24,7      | 44,0       | 76,4       |
| A59     | 12,5     | 9,2      | 36,3      | 24,4       | 19,4       | 57,7      | 52,3       | 76,6       |
| A60     | 10,9     | 8,4      | 46,3      | 24,0       | 21,7       | 52,8      | 57,7       | 92,5       |
| A61     | 11,4     | 9,1      | 34,5      | 19,5       | 23,3       | 43,3      | 47,1       | 84,6       |
| A62     | 12,5     | 9,3      | 47,9      | 24,0       | 28,5       | 93,1      | 53,8       | 93,6       |
| A63     | 10,2     | 7,7      | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| A64     | 12,2     | 10,3     | 44,0      | 20,3       | 18,6       | 46,1      | 47,9       | 79,7       |
| A65     | 17,7     | 13,6     | 74,9      | 29,4       | 31,4       | 75,7      | 52,7       | 92,4       |
| A66     | 18,3     | 13,9     | 41,4      | 30,8       | 32,7       | 40,3      | 52,3       | 92,3       |
| A67     | 17,5     | 13,7     | 53,6      | 23,0       | 31,0       | 208,0     | 52,4       | 90,4       |
| A68     | 17,9     | 13,9     | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| A69     | 10,5     | 7,4      | 53,4      | 58,2       | 36,1       | 62,6      | 57,8       | 88,7       |
| A70     | 9,5      | 7,2      | 65,1      | —          | —          | 91,7      | —          | —          |
| A71     | 9,7      | 7,1      | 56,1      | 53,4       | 42,2       | 79,7      | 68,1       | 112,4      |
| A72     | 8,6      | 7,1      | 16,4      | 32,0       | 20,6       | 20,6      | 45,8       | 82,4       |
| A73     | 8,4      | 6,9      | 52,5      | 49,9       | 39,5       | 78,8      | 62,0       | 102,7      |
| A74     | 9,2      | 6,6      | 36,8      | 39,1       | 43,5       | 48,8      | 54,6       | 84,4       |
| A75     | 17,6     | 11,6     | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| A76     | 15,3     | 14,6     | 10,9      | 10,1       | 10,9       | 22,3      | 25,2       | 47,4       |
| A77     | 14,2     | 11,1     | 23,4      | 23,4       | 22,0       | 32,7      | 49,5       | 81,4       |
| A78     | 12,0     | 9,3      | 8,4       | 10,7       | 10,5       | 15,4      | 33,7       | 66,6       |
| A79     | 20,9     | 13,9     | 8,6       | 16,8       | 11,8       | 14,7      | 36,0       | 58,8       |
| A80     | 20,8     | 12,9     | 10,6      | 18,9       | 14,7       | 14,7      | 38,5       | 75,0       |

Tabela 6 (Continuação)

| Amostra | $K(GPa)$ | $G(GPa)$ | $QP_{RE}$ | $QS1_{RE}$ | $QS2_{RE}$ | $QP_{SF}$ | $QS1_{SF}$ | $QS2_{SF}$ |
|---------|----------|----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| A81     | 19,7     | 14,1     | 7,9       | 15,3       | 14,4       | 12,7      | 37,1       | 74,7       |
| A82     | 11,9     | 8,4      | 24,0      | 10,5       | 12,8       | 36,6      | 29,8       | 57,2       |
| A83     | 11,0     | 7,6      | 18,7      | 17,5       | 16,3       | 27,5      | 43,2       | 75,8       |
| A84     | 12,1     | 10,4     | 13,6      | 88,2       | 68,9       | 16,6      | 60,2       | 62,0       |
| A85     | 25,8     | 21,8     | 33,6      | 48,8       | 58,0       | 44,6      | 54,0       | 57,8       |
| A86     | 13,1     | 11,9     | 27,7      | 41,2       | 39,9       | 26,5      | 66,9       | 62,4       |
| A87     | 27,9     | 19,1     | 23,5      | 17,0       | 18,1       | 52,9      | 80,5       | 82,7       |
| A88     | 32,8     | 25,5     | 32,6      | 51,9       | 58,2       | 33,8      | 84,7       | 96,4       |
| A89     | 10,7     | 10,3     | 20,5      | 20,0       | 22,8       | 42,8      | 90,9       | 92,4       |
| A90     | 25,4     | 18,9     | 40,6      | 206,0      | 143,6      | 41,0      | 115,2      | 117,2      |
| A91     | 24,5     | 20,1     | 21,7      | 20,0       | 27,7       | —         | —          | —          |
| F1      | 13,7     | 10,3     | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| F2      | 14,3     | 11,6     | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| F3      | 12,4     | 10,0     | 18,0      | 29,7       | 30,7       | 20,6      | 58,6       | 103,9      |
| F5      | 10,2     | 9,6      | 25,8      | 28,4       | 33,0       | 24,9      | 66,7       | 111,8      |
| F6      | 10,3     | 9,3      | 25,3      | 31,6       | 32,6       | 21,1      | 57,7       | 109,9      |
| F7      | 12,2     | 9,5      | 26,2      | 43,5       | 55,8       | 26,7      | 55,8       | 187,9      |
| F8      | 12,7     | 10,0     | 30,7      | 40,7       | 35,8       | 22,7      | 83,7       | 106,3      |
| F9      | 12,3     | 9,7      | 26,6      | 28,9       | 37,9       | 26,2      | 72,0       | 86,5       |
| F10     | 3,2      | 17,1     | 5,8       | 13,7       | 11,4       | 11,5      | 20,5       | 53,2       |
| F11     | 22,3     | 17,3     | 24,8      | 31,5       | 29,5       | 27,8      | 67,2       | 92,4       |
| F12     | 22,4     | 16,4     | 49,6      | 17,8       | 16,2       | 55,8      | 44,3       | 58,7       |
| F13     | 38,8     | 26,5     | —         | 11,4       | 39,1       | 35,1      | 16,3       | 125,9      |
| F14     | 12,9     | 11,8     | —         | 30,7       | 26,8       | 33,8      | 60,0       | 94,4       |
| F15     | 25,7     | 18,2     | 22,1      | 27,6       | 23,6       | 20,8      | 41,5       | 71,4       |
| F16     | 26,2     | 18,4     | 11,4      | 40,4       | 32,9       | 18,1      | 27,7       | 60,2       |
| F17     | 22,7     | 16,5     | —         | 19,9       | 16,6       | 25,3      | 44,8       | 71,9       |
| F18     | 34,3     | 19,5     | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| F19     | 21,1     | 15,0     | —         | —          | —          | —         | —          | —          |
| F20     | 13,8     | 7,9      | 12,4      | 10,8       | 12,8       | 10,4      | 34,8       | 57,2       |
| F21     | 13,4     | 6,4      | 18,4      | 10,4       | 12,5       | 5,8       | 34,3       | 58,4       |
| F22     | 9,9      | 7,0      | 21,2      | 9,6        | 10,8       | 19,7      | 37,9       | 74,7       |
| F23     | 11,8     | 9,8      | 14,2      | 30,2       | 30,6       | 28,1      | 43,2       | 83,9       |
| F24     | 21,1     | 16,1     | 2,5       | 46,2       | 20,4       | 14,5      | 39,4       | 68,1       |
| F25     | 30,9     | 21,1     | —         | 34,3       | 32,6       | 25,9      | 66,6       | 58,9       |
| F26     | 32,2     | 22,1     | —         | 13,4       | 16,0       | 10,8      | 24,3       | 49,6       |
| F27     | 21,7     | 16,9     | 49,8      | 40,7       | 53,6       | 22,6      | 65,8       | 96,3       |
| F28     | 19,5     | 14,5     | —         | 31,7       | 16,5       | 9,6       | 104,2      | 40,3       |
| F29     | 32,0     | 22,5     | —         | 210,0      | 113,0      | 49,0      | 111,4      | 111,5      |
| F30     | 29,7     | 24,1     | 13,9      | 31,5       | 10,7       | 17,0      | 94,9       | 64,3       |
| F31     | 23,1     | 17,8     | 65,7      | 33,3       | 27,1       | 28,2      | 44,3       | 81,1       |
| F32     | 29,0     | 19,5     | 36,4      | 64,8       | 24,0       | 55,7      | —          | —          |
| F33     | 18,7     | 15,7     | 194,0     | 110,2      | 105,7      | 33,9      | 118,9      | 153,9      |
| F34     | 11,7     | 10,8     | 58,7      | 81,8       | 85,0       | 57,4      | 85,7       | 102,9      |
| F35     | 11,5     | 10,9     | 18,5      | 102,5      | 72,3       | 31,3      | 116,9      | 105,7      |



Tabela 6 (*Continuação*)

| Amostra | $K(GPa)$ | $G(GPa)$ | $QP_{RE}$ | $QS1_{RE}$ | $QS2_{RE}$ | $QP_{SF}$ | $QS1_{SF}$ | $QS2_{SF}$ |
|---------|----------|----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| F36     | 11,4     | 10,3     | 20,3      | 25,8       | 21,3       | 43,9      | 94,9       | 94,2       |
| F37     | 12,0     | 12,4     | 11,8      | 7,8        | 10,6       | 26,0      | 68,3       | 73,4       |
| F38     | 12,3     | 10,5     | 20,1      | 16,8       | 19,2       | 37,1      | 91,0       | 89,7       |
| F39     | 9,5      | 10,0     | 19,6      | 16,7       | 15,6       | 36,5      | 74,9       | 74,0       |
| F40     | 11,4     | 10,0     | 28,4      | 25,6       | 25,6       | 54,7      | 112,2      | 110,4      |
| F41     | 12,5     | 10,9     | 15,0      | 8,5        | 52,1       | 22,7      | 28,6       | 19,8       |
| F42     | 12,1     | 10,7     | 1,5       | 28,7       | 23,9       | 6,7       | 58,3       | 123,9      |
| F43     | 16,6     | 15,4     | 5,4       | 30,3       | 27,5       | 12,4      | 40,4       | 43,6       |
| F44     | 9,7      | 10,5     | 16,2      | 33,2       | 24,3       | 30,1      | 171,0      | 55,3       |
| F45     | 14,1     | 11,7     | 21,3      | 25,7       | 42,2       | 37,1      | 75,4       | 76,5       |
| F46     | 15,8     | 12,9     | 16,3      | 57,4       | 28,9       | 18,0      | 76,4       | 78,3       |
| F47     | 15,0     | 12,3     | 68,2      | 27,0       | 33,5       | 86,5      | 96,9       | 95,6       |
| F48     | 18,5     | 17,6     | 258,0     | 16,7       | 41,4       | 361,7     |            |            |
| F49     | 18,8     | 15,8     |           |            |            |           |            |            |
| F50     | 22,5     | 16,4     | 2,4       | 25,3       | 17,6       | 17,2      | 20,4       | 13,4       |
| F51     | 17,8     | 18,1     | 10,5      | 11,8       | 29,1       | 10,8      | 51,5       | 67,1       |
| F52     | 9,7      | 7,2      | 19,0      | 10,7       | 23,4       | 31,1      | 63,1       | 62,1       |
| F53     | 17,3     | 15,7     | 7,9       | 7,7        | 6,6        | 17,6      | 37,0       | 35,5       |
| F54     | 19,8     | 17,6     | 9,5       | 16,0       | 19,6       | 15,4      | 34,4       | 36,0       |
| F55     | 15,3     | 14,2     | 17,2      | 93,6       | 58,9       | 15,2      | 64,4       | 73,2       |

Na tabela 6,  $K$  é o módulo de incompressibilidade,  $G$  o módulo de cisalhamento (ou rigidez),  $QP$ ,  $QS1$  e  $QS2$  referem-se ao fator de qualidade obtido a partir das ondas elásticas do tipo P, S1 e S2, respectivamente. O índice RE indica o fator de qualidade obtido pelo método da razão espectral, enquanto o índice SF refere-se ao fator de qualidade obtido através do método do shift de frequência.

## ANEXO C – Algoritmo MatLab para Extração dos Atributos de Atenuação

Nos algoritmos a seguir não está implementado a parte gráfica do software desenvolvido para esta dissertação, visto que tal detalhe foge ao escopo deste trabalho. Contudo, o tratamento dos dados, a parte central do processamento e as saídas gráficas são apresentadas, de modo distinto, para cada método utilizado.

Algoritmo para a extração de atributos de atenuação utilizando o método da razão espectral:

```
1 clear;
2
3 % _____Importar Ondas_____ %
4
5
6
7 pasta = 'tss';
8
9 dirData = dir(pasta);
10 dirIndex = [dirData.isdir];
11 filelist = {dirData(~dirIndex).name};
12
13
14 for i = 48:1:max(size(filelist))
15 pasta = 'tss';
16
17 dirData = dir(pasta);
18 dirIndex = [dirData.isdir];
19 filelist = {dirData(~dirIndex).name};
20 onda = filelist(i);
21 arquivo = strcat(pasta, '\', onda);
22 filename = char(arquivo);
23 [pathstr, name, ext] = fileparts(filename);
24
25 % _____Dados da Amostra_____ %
26
27 texto = ['Entre com o comprimento(mm) da amostra ' name];
28 prompt = texto;
29 dlg_title = 'Input';
30 num_lines = 1;
31 def = {'50'};
```

```
32 answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
33 acomp = str2double(answer);
34
35 rdata_load = char('Aluminium.tss');
36
37 [hst, hia, hpp, hps1, hps2, ref_data] = infoB(rdata_load);
38 [ast, aia, app, aps1, aps2, amst_data] = infoB(filename);
39 %[ast, aia, app, aps1, aps2, amst_data] = infoBs(filename);
40
41 L = [50 acomp]; %comprimento da amostra de ref. e da amostra ...
      analisada(mm) respectivamente%
42
43 name
44
45 for k = 2:8:18;
46
47 rdata(:,1) = ref_data(:,1);
48 rdata(:,2) = ref_data(:,k);
49
50 data(:,1) = amst_data(:,1);
51 data(:,2) = amst_data(:,k);
52
53 %Tempo Sistema
54 htp = 9.65e-6;
55 hts1 = 17.31e-6;
56 hts2 = 17.05e-6;
57
58
59 %      plot(rdata(:,1),rdata(:,2));
60 %      [rx,ry] = ginput(2);
61 %      close all
62
63 starttime = [17.26 17.24 17.36 17.36 17.39 17.39 17.48 17.48 33.36 ...
              33.36 33.36 33.39 33.39 33.42 33.45 33.48 33.15 33.15 33.15 33.15 ...
              33.15 33.15 33.21 33.33];
64 endtime   = [19.12 19.12 19.15 19.15 19.18 19.18 19.24 19.27 34.93 ...
              34.96 35.03 35.09 35.12 35.21 35.27 35.39 34.90 34.93 34.99 35.06 ...
              35.12 35.21 35.30 35.42];
65 %endtime   = [19.96 19.96 19.96 19.96 19.96 19.96 19.96 19.96 35.93 ...
              35.93 35.93 35.93 35.93 35.93 35.93 35.93 36.14 36.14 36.14 36.14 ...
              36.14 36.14 36.14 36.14];
66 rx = [starttime(k-1)*1e-6 endtime(k-1)*1e-6];
67
68     ffig = figure('Position',[10 10,1800,1000]);
69     plot(data(:,1),data(:,2));
70     [x,y] = ginput(2);
71     close all
```

```

72
73 startR = round((rx(1)-rdata(1,1))/(rdata(3,1)-rdata(2,1)));
74 endR = round((rx(2)-rdata(1,1))/(rdata(3,1)-rdata(2,1)));
75
76 startS = round((x(1)-data(1,1))/(data(3,1)-data(2,1)));
77 endS = round((x(2)-data(1,1))/(data(3,1)-data(2,1)));
78
79 v1 = L(1)*0.001/(rx(1)-htp);
80 v2 = L(2)*0.001/(x(1)-htp);
81 V = [v1 v2];
82
83 %_____Suavisar as formas de onda_____&
84
85 rdata(startR:endR,2) = rdata(startR:endR,2)-mean(rdata([1:100],2));
86 rdata(startR:endR,2) = smooth(rdata(startR:endR,2), 'moving', 32);
87 %
88 data(startS:endS,2) = data(startS:endS,2)-mean(data([1:startS],2));
89 data(startS:endS,2) = smooth(data(startS:endS,2), 'moving', 32);
90
91
92 %_____Tracos sem amplitude_____&
93 tracoR = [];
94 tracoR(:,1) = rdata(:,1);
95 tracoR(:,2) = zeros;
96
97
98 traco = [];
99 traco(:,1) = data(:,1);
100 traco(:,2) = zeros;
101
102
103 %_____
104 tracoR(startR:endR,2) = rdata(startR:endR,2);
105
106
107 traco(startS:endS,2) = data(startS:endS,2);
108
109
110 %_____
111 %FFT da onda 1 (referencia)
112 data1=tracoR(:,2);
113 dt1=tracoR(4,1)-tracoR(3,1);
114 nsample1=length(data1);
115 spectrum1=fft(data1);
116 sc1=.5/dt1;
117 ds1=2*sc1/nsample1;
118 sindex1=[0:ds1:sc1];

```

```
119 amp1=abs(spectrum1(1:length(sindex1)));
120 phase1=unwrap(angle(spectrum1(1:length(sindex1))));
121
122 %FFT da onda 2 (Amostra analisada)
123 data2=traco(:,2);
124 dt2=traco(4,1)-traco(3,1);
125 nsample2=length(data2);
126 spectrum2=fft(data2);
127 sc2=.5/dt2;
128 ds2=2*sc2/nsample2;
129 sindex2=[0:ds2:sc2];
130 amp2=abs(spectrum2(1:length(sindex2)));
131 phase2=unwrap(angle(spectrum2(1:length(sindex2))));
132
133 %-----
134
135 % Coeficiente de Atenuacao
136 xamp1=transp(sindex1);
137 fitamp1=fit(xamp1,amp1,'linearinterp');
138
139 xamp2=transp(sindex2);
140 fitamp2=fit(xamp2,amp2,'linearinterp');
141
142 df=0.0024e6;
143 for i=1:500,
144     yraz(i)=i.*df;
145     raz(i)=log(fitamp1(yraz(i))./fitamp2(yraz(i)));
146 end
147
148 yrazz=yraz(:);
149 razz=raz(:);
150
151 %     plot(yrazz(:),razz(:),'*b');
152 %     [pick1,pick2] = ginput(2);
153 %     close all
154 %
155 %     itf = round(pick1/2400);
156
157     if (k<=9)
158         itf = [167, 417];
159
160     else if (k>9 && k<18)
161         itf = [104, 334];
162
163     else
164         itf = [104, 334];
165
```

```

166     end
167 end
168
169 [fit1] = fit(yrazz(itf(1):itf(2)), razz(itf(1):itf(2)), 'poly1');
170 p = coeffvalues(fit1);
171 ajuste = p(1)*yrazz(:)+p(2);
172 ci = confint(fit1,0.95);
173
174 %-----
175
176 %Saidas graficas
177 subplot(3,1,1)
178 plot(tracoR(:,1),tracoR(:,2),'r',(traco(:,1)),traco(:,2),'b');
179 xlabel('Time (us)');
180 ylabel('Amplitude');
181 title('Waveform')
182 hold on
183 subplot(3,1,2)
184 plot(sindex1(:),amp1(:),'r',yraz(:),fitamp1(yraz(:)),'g')
185
186 xlabel('Frequency (Hz)')
187 ylabel('Amplitude')
188 hold on
189 subplot(3,1,3)
190 plot(sindex1(:),phase1(:),'.-r')
191 xlabel('Frequency (Hz)')
192 ylabel('Fase (radian)')
193 hold on
194 subplot(3,1,2)
195 plot(sindex2(:),amp2(:),'b',yraz(:),fitamp2(yraz(:)),'g')
196 xlim([1 500000])
197 xlabel('Frequency (Hz)')
198 ylabel('Amplitude')
199 subplot(3,1,3)
200 plot(sindex2(:),phase2(:),'.-b')
201 xlabel('Frequency (Hz)')
202 ylabel('Phase (rad)')
203 figure
204 plot(yrazz(1:500), razz(1:500), 'b*', yrazz(1:500), ajuste(1:500), 'g', 'LineWidth', 2)
205 xlabel('Frequency (Hz)')
206 ylabel('ln(Amp_1/Amp_2)')
207
208 %-----fator Q-----
209 DecLog = ci(1)/(L(2)*.001);
210 Qratio = pi/(DecLog*V(2))
211
212

```

```
213 fatorQPressao(k) = Qratio;
214 velocidade40MPa(k) = v2;
215 salvarData = [fatorQPressao', velocidade40MPa'];
216
217 waitforbuttonpress
218 close all
219
220
221 end
222
223 %save([name '_Q.dat'], 'salvarData', '-ascii')
224
225 clear variables
226 end
```

Algoritmo para a extração de atributos de atenuação utilizando o método do shift de frequência:

```
1 clear;
2
3 % _____Importar Ondas_____ %
4
5
6
7 pasta = 'tssl';
8
9 dirData = dir(pasta);
10 dirIndex = [dirData.isdir];
11 filelist = {dirData(~dirIndex).name};
12
13 for i = 1:1:max(size(filelist)),
14
15     pasta = 'tssl';
16
17 dirData = dir(pasta);
18 dirIndex = [dirData.isdir];
19 filelist = {dirData(~dirIndex).name};
20 onda = filelist(i);
21 arquivo = strcat(pasta, '\', onda);
22 filename = char(arquivo);
23 [pathstr, name, ext] = fileparts(filename);
24
25 message = ['FatorQ - Shift de frecuencia - para a amostra ' name];
26 uiwait(msgbox(message))
27
28 hdata_load = char('Head2Head.tss');
29
30 [hst, hia, hpp, hps1, hps2, sis_data] = infoH(hdata_load);
31 %[ast, aia, app, aps1, aps2, amst_data] = infoB(filename);
32 [ast, aia, app, aps1, aps2, amst_data] = infoBs(filename);
33
34 name
35
36 for k = 2:8:18;
37
38     if (k<=9)
39         col = 2;
40
41     else if (k>9 && k<18)
42         col = 3;
43
```



```

44     else
45         col = 4;
46
47     end
48 end
49
50 startAmostra = [app aps1 aps2];
51 sA = startAmostra(col-1);
52
53 hdata(:,1) = sis_data(:,1);
54 hdata(:,2) = sis_data(:,col);
55
56 data(:,1) = amst_data(:,1);
57 data(:,2) = amst_data(:,k);
58
59
60 starttime = [9.65 17.32 17.05];
61 %endtime   = [11.30 19.05 19.14]; %1 periodo
62 endtime   = [11.89 20.23 20.68]; %1,5 periodo
63
64
65
66 hx = [starttime(col-1)*1e-6 endtime(col-1)*1e-6];
67
68 startH = round((hx(1)-hdata(1,1))/(hdata(3,1)-hdata(2,1)));
69 endH = round((hx(2)-hdata(1,1))/(hdata(3,1)-hdata(2,1)));
70
71 IPa = round((startH+endH)/2);
72 IPb = (IPa-startH);
73
74
75 %     gfig = figure('Position',[10 10,1800,1000]);
76 %     plot(data(:,1),data(:,2),'r');
77 %     title('Selecione o periodo de interesse');
78 %     [x, y] = ginput(2);
79 %     close all
80 %
81 %     startA = round((x(1)-data(1,1))/(data(3,1)-data(2,1)));
82 %     endA = round((x(2)-data(1,1))/(data(3,1)-data(2,1)));
83
84
85 hdata((startH-IPb):(endH+IPb),2) = ...
    hdata((startH-IPb):(endH+IPb),2)-mean(hdata((1:startH),2));
86 hdata((startH-IPb):(endH+IPb),2) = ...
    smooth(hdata((startH-IPb):(endH+IPb),2),'moving',5);
87 %
88

```

```
89 teste = round(sA-IPb);
90 if teste ≤ 0
91     startA = 1;
92 else
93     startA = round(teste);
94 end
95
96     endA = round(sA+3*IPb);
97
98 data(startA:endA,2) = data(startA:endA,2)-mean(data((1:startA),2));
99 data(startA:endA,2) = smooth(data(startA:endA,2),'moving',5);
100
101
102 dt1 = hdata(4,1) - hdata(3,1);
103 dt2 = data(4,1) - data(3,1);
104
105
106 tracoH = [];
107 traco = [];
108
109 tracoH(:,1) = hdata(:,1);
110 tracoH(:,2) = zeros;
111 tracoH(startH:endH,2) = hdata(startH:endH,2);
112
113 traco(:,1) = data(:,1);
114 traco(:,2) = zeros;
115 traco(startA:endA,2) = data(startA:endA,2);
116
117 % _____ Taxa de Amostragem ...
118     _____%
119
120
121 % _____ FFT ...
122     _____%
123
123 data1 = tracoH(:,2);
124 N1 = length(data1);
125 ftm1 = fft(data1);
126 nfl = .5/dt1;
127 ds1 = 2*nfl/N1;
128 index1 = (0:ds1:nfl);
129 Hspec = abs(ftm1(1:length(index1)));
130 Hfase = unwrap(angle(ftm1(1:length(index1))));
131
132 data2 = traco(:,2);
133 N2 = length(data2);
```

```
134 nf2 = .5/dt2;
135 ds2 = 2*nf2/N2;
136 index2 = (0:ds2:nf2);
137 ftm2 = fft(data2);
138 Aspec = abs(ftm2(1:length(index2)));
139 Afase = unwrap(angle(ftm2(1:length(index2))));
140
141 % _____ %
142
143 df1 = 1/(N1*dt1);
144 f = (df1:df1:(N1*df1));
145
146 df2 = 1/(N2*dt2);
147 f2 = (df2:df2:(N2*df2));
148
149 in = round((1.0e+5)/df1)+1;
150 fim = round((1.5e+6)/df1)+1;
151 fim2 = round((1.5e+6)/df1)+1;
152
153
154 % _____ Graficos _____ %
155
156 figure
157 plot(1e6*tracoH(:,1),tracoH(:,2),'r',1e6*traco(:,1),traco(:,2),'b');
158 xlabel('Time (us)','FontSize',13);
159 ylabel('Amplitude','FontSize',13);
160 title('Waveform','FontSize',14)
161 %xlim([10 40]);
162
163 % figure
164 % plot(1e-3*index1(:),Hspec(:),'r',1e-3*f(in:fim),Aspec(in:fim),'b');
165 % xlabel('f(kHz)','FontSize',13);
166 % ylabel('Amplitude','FontSize',13);
167 % title('Amplitude Spectra','FontSize',14)
168
169
170 % _____ %
171
172
173
174 ampHead = Hspec(:);
175 ampSample = Aspec(:);
176
177 ampH = fit((f(1:fim))',ampHead(1:fim), 'gauss1');
178 ampA = fit((f(1:fim))',ampSample(1:fim), 'gauss1');
179
180 ampH_norm = ampH(f(1:fim))/max(ampH(f(1:fim)));
```

```
181 ampA_norm = ampA(f(1:fim))/max(ampA(f(1:fim)));
182
183 fitampH = fit((f(1:fim))',ampH_norm(:), 'gauss1');
184 fitampA = fit((f(1:fim))',ampA_norm(:), 'gauss1');
185
186 figure
187 plot(1e-3*f(1:fim), fitampH(f(1:fim)), 'r', ...
      1e-3*f(1:fim), fitampA(f(1:fim)), 'b');
188 xlabel('Frequency (Hz)')
189 ylabel('Normalized Gauss Amplitude')
190
191 %_____Fator Q_____ %
192
193 CH = coeffvalues(ampH);
194 CA = coeffvalues(ampA);
195
196 Sig = (CH(3)*CH(3));
197
198 dT = data(round(sA),1) - hdata(startH,1);
199 dF = CH(2)-CA(2);
200
201 Q_sf = (Sig*pi*dT)/(dF)
202
203 % fatorQpressure(k) = Q_sf;
204 % salvarData = fatorQpressure';
205
206 waitforbuttonpress
207 close all
208
209 clear hdata data data1 data2 Hspec Aspec ampHead ampSample ...
210      fitampH fitampA hx traco tracoH ftm1 ftm2 ampH ampA ampH_norm ...
211      ampA_norm CH CA Sig dT sA dF Q_sf col
212
213
214 end
215
216 %save([name '_Qsf.dat'], 'salvarData','-ascii')
217 clear variables
218
219
220 end
```