



Julio Cesar Ramos Justen

**Análise das propriedades elásticas de
rochas e minerais evaporíticos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Rio de Janeiro
Agosto de 2014



Julio Cesar Ramos Justen

Análise das propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Guilherme Fernandes Vasquez

CENPES/PETROBRAS

Dr. Marcio José Morschbacher

PETROBRAS

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de agosto de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Julio Cesar Ramos Justen

Graduou-se em Geologia na Universidade Federal do Rio de Janeiro no ano de 2001. Ingressou no corpo técnico da Petrobras como geofísico no ano de 2002 onde trabalha atualmente junto ao grupo de física de rochas. Iniciou no curso de mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro no ano de 2012, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental com enfoque em Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Justen, Julio Cesar Ramos

Análise das propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos / Julio Cesar Ramos Justen ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Junior – 2014.

121 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Evaporitos. 3. Ensaios Ultrassônicos. 4. Ensaios Triaxiais. 5. Geomecânica. 6. Módulos Elásticos. I. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

A Cassi, Cissa e Bia

Agradecimentos

Em especial aos meus pais, Julio e Neide, por toda a dedicação e esforço que tiveram e têm comigo ao longo destes anos. Aos meus irmãos, Luciano e Cristiane, pelo companheirismo e os motivos de orgulho.

A minha esposa Cassiane por toda a compreensão, cumplicidade e auxílio no desenvolvimento desta dissertação que ao seu final já rendera dois dos mais belos frutos: Cecília e a pequena Beatriz.

Ao meu orientador Euripedes do Amaral Vargas Junior por acolher este tema de cunho experimental vindo de um geólogo que hoje trilha os caminhos da geofísica.

Aos amigos do grupo de física de rochas da PETROBRAS, que por mais de 12 anos não se cansam de compartilhar os seus conhecimentos: Guilherme, Marcos Leão, Marcio, Irapoan, Tagore, Ana Julia, Guilherme, Douglas e Maurício.

Aos técnicos do laboratório de mecânicas de rochas da PETROBRAS pelo apoio nos ensaios de compressão triaxial: Rafael, Igor, Anselmo e Erick.

Ao técnico Julio que continua na COPPE com a mesma presteza no preparo das amostras.

Aos geofísicos Luiz Alberto e André Bulcão pelo auxílio na modelagem da equação da onda 2D.

Aos técnicos dos laboratórios da PETROBRAS pelo apoio nesta jornada: Ailton, Rose, Surmas e Beth.

Ao grupo de exploração da unidade operacional de Sergipe pelo apoio durante a etapa de coleta de amostras na mina, em especial ao geólogo Jairo Mascarenhas pelo tempo e ensinamentos sobre os evaporitos.

Aos técnicos Afonso Carvalho e Rodrigo Silva da mina de Taquari-Vassouras da Companhia Vale do Rio Doce S.A por ceder a este estudo o cerne desta dissertação, as amostras.

Aos Professores, alunos, amigos e companheiros de curso de mestrado na PUC-Rio, em especial a Rita de Cássia pelo apoio.

À PUC-Rio pela concessão de bolsa de isenção de custos durante o desenvolvimento do mestrado.

À PETROBRAS S.A. pela possibilidade de desenvolver esta dissertação dentro do seu programa interno de pós-graduação.

Enfim, a todos que nestes pouco mais de dois anos me ajudaram a chegar até aqui.

Obrigado.

Resumo

Justen, Julio Cesar Ramos; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral. **Análise das propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos**. Rio de Janeiro, 2014. 121p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os minerais evaporíticos formam as rochas e os depósitos evaporíticos. A maior parte a partir da evaporação da água por restrições de antigos oceanos. Os evaporitos hoje encontrados nos registros geológicos são de grande interesse para a indústria de mineração, como na produção de potássio em minas de carnalita e silvita, e para a exploração de petróleo, seja como rocha geradora, reservatório, selo ou elemento de estruturação do sistema petrolífero. Nesta dissertação foram analisadas amostras de evaporitos salinos de idade Aptiana oriundos da bacia de Sergipe-Alagoas, obtidos na única mina de potássio em operação no Brasil, desenvolvida atualmente pela Vale S.A.. Foi proposta uma metodologia de caracterização mineralógica e volumétrica para este tipo de material baseada em descrição macroscópica, análises de lâmina delgada, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), microtomografia de raios X, análise de radioatividade natural e porosimetria a hélio. Após a caracterização dos evaporitos, foram realizados ensaios de propagação de pulso ultrassônico e ensaios de compressão triaxial, a fim de determinar os módulos elásticos do material, principal objetivo desta dissertação. Ao final foram comparados os resultados dinâmicos (ensaio ultrassônico) com os resultados estáticos (ensaio triaxial), relacionando-os com a caracterização mineralógica e volumétrica feita anteriormente. Estes módulos elásticos, como o módulo de Young, são de grande importância e de aplicação direta na engenharia de petróleo, de perfuração, de mineração e geofísica.

Palavras-chave

Evaporitos; ensaios ultrassônicos; ensaios triaxiais; geomecânica; módulos elásticos.

Abstract

Justen, Julio Cesar Ramos; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral (Advisor). **Analysis of elastic properties of rocks and evaporite minerals**. Rio de Janeiro, 2014. 121p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The evaporite minerals form the evaporite rocks and deposits. The major part has been deposited from evaporation of water in ancient restricted oceans. The evaporite deposits found in geological records today are of great interest to the mining industry, such as in potassium production in carnallite and sylvite mines, and oil exploration, either as source rock, reservoir, seal or structuring element of the petroleum system. In this dissertation samples of Aptian saline evaporite age from the Sergipe-Alagoas Basin, obtained in the only potash mine in operation in Brazil, currently developed by Vale S.A. were analyzed. A methodology for mineral and volume characterization for this type of material based on macroscopic description, thin section analysis, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray microtomography, natural radioactivity analysis and helium porosimetry is proposed on this work. Following this characterization, ultrasonic pulse propagation tests and triaxial compression tests were made in order to determine the dynamic and static elastic moduli of the material, respectively, the main objective of this dissertation. At the end we compare the dynamic results (ultrasonic tests) with static results (triaxial tests) relating them to the mineralogical and volumetric characterization made earlier. These elastic modulus, such Young's modulus, are very important in petroleum engineering, drilling, mining and geophysics.

Keywords

Evaporite; ultrasonic measurements; triaxial measurements; geomechanics; elastic modulus

Sumário

1 Introdução	21
1.1. Objetivos	22
1.2. Organização	23
2 Minerais e Rochas Evaporíticas	24
2.1. Composição química da água do mar e dos minerais evaporíticos	24
2.2. Sequência de deposição de minerais evaporíticos	26
2.3. Sedimentação de evaporitos	29
2.4. Ambientes modernos de sedimentação de evaporitos	32
2.5. Evaporitos no Brasil	35
2.6. A Mina de Taquari Vassouras	37
3 Metodologia	39
3.1. Coleta, Preparo e Armazenamento das Amostras	39
3.2. Caracterização Mineralógica	42
3.2.1. Descrição Macroscópica	43
3.2.2. Lâmina Delgada	43
3.2.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)	46
3.2.4. Análise da radioatividade natural (Spectral Core Gamma)	46
3.3. Caracterização Volumétrica	48
3.3.1. Microtomografia de Raios X	48
3.3.2. Massa Específica do grão (Densidade do grão)	51
3.4. Caracterização Elástica	54
3.4.1. Método Dinâmico – Ensaio de Velocidades Elásticas	54
3.4.2. Método Estático – Ensaio Triaxial	58
4 Resultados	61
4.1. Caracterização Mineralógica	61
4.2. Caracterização Volumétrica	72

4.3. Caracterização Elástica	82
4.3.1. Método Dinâmico – Ensaio de Velocidades Elásticas	83
4.3.1.1. Modelagem Ultrassônica Via Método das Diferenças Finitas	90
4.3.2. Método Estático – Ensaio Triaxial	96
4.3.3. Comparação Entre os Resultados Dinâmicos e Estáticos	104
5 Conclusões	108
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	110
6 Referências Bibliográficas	111
Apêndice	114

Lista de figuras

- Figura 2.1 – Sequência de deposição dos minerais evaporíticos. Relação entre a densidade da salmoura e o percentual de evaporação da água do mar. Modificado de Sonnenfeld (1984). 27
- Figura 2.2 – Suíte básica de perfis de um poço da bacia de Santos que perfilou a sequência evaporítica. Os perfis de raio gama e densidade, trilhas 3 e 7, são os principais identificadores litológicos. Na trilha 8 estão coloridos os diferentes tipos de evaporitos, indicando a ciclicidade litológica: anidrita na cor púrpura, carnalita na cor vermelha e halita na cor verde. 28
- Figura 2.3– Modelo de deposição concêntrica para a formação de ciclos evaporíticos. Mohriak *et al.* (2008). 29
- Figura 2.4 – Modelos de bacias evaporíticas com barreiras. Mohriak *et al.* (2008). 31
- Figura 2.5 – Modelos conceituais de bacias evaporíticas. Mohriak *et al.* (2008). 31
- Figura 2.6 – Figura esquemática mostrando a extensão areal de depósitos evaporíticos antigos e recentes. Todas as áreas estão representadas na mesma escala. Warren (2010). 32
- Figura 2.7 – Mapa global mostrando as bacias evaporíticas modernas na África, Arábia e Ásia. Fonte: Earth 3D Amazing Atlas. 32
- Figura 2.8 – Mapa global mostrando a localização do mar Cáspio e do lago Kara-Bogaz-Gol. Fonte: Earth 3D Amazing Atlas. 33
- Figura 2.9 – Imagens de satélite mostrando o lago Kara-Bogaz-Gol cinco anos após o fechamento da ligação com o mar Cáspio (A) e oito anos após a reabertura do canal de ligação entre o mar e o lago (B). Fonte: USGS. 34
- Figura 2.10 – Imagem de satélite mostrando o salar de Uyuni na Bolívia e o salar de Atacama, no Chile. Fonte: Google Earth. 34
- Figura 2.11 – Bacias sedimentares brasileiras, Milani *et al.* 2000. 36
- Figura 2.12 – Minerador contínuo tipo Marietta utilizado na operação de desmonte nos painéis da lavra. A distância entre o topo e a base da galeria é de aproximadamente 3 metros. 38
- Figura 3.1 – Fotografia de parte das amostras recolhidas na mina. Amostras cilíndricas do furo de sondagem sub-horizontal e amostras de mão (blocos). 40
- Figura 3.2 – Dessecador à vácuo. Nesta fotografia podemos identificar as amostras envolvidas em filme plástico do tipo PVC acondicionadas no dessecador a vácuo. 42

Figura 3.3 – Lâminas delgadas de silvinita (silvita + halita). A coloração vermelha se deve a grande quantidade de óxido de ferro. 44

Figura 3.4 – Irradiação de amostras de halita por raios gama. As imagens b e c são de amostras que passaram pelo processo de irradiação, coloração azul característica. Notar em c a microestruturação dos cristais de halita que só fica aparente após a irradiação. Schoenherr *et al.* (2007). 45

Figura 3.5 – Amostra de silvinita fotografada em microscópio petrográfico de luz transmitida. Em A com os polarizadores em paralelo. Em B com os polarizadores cruzados, mostrando a extinção completa esperada em materiais isotrópicos. Em C com polarizadores cruzados e com placa de quartzo. 45

Figura 3.6 – Em A, mosaico formado por imagens ao MEV por elétrons retroespalhados; Em B, fotografia da amostra de halita com argila; Em C, detalhe da imagem A. 47

Figura 3.7 – Equipamento de análise da radioatividade natural da unidade de operação do Espírito Santo - Petrobras/UO-ES, (Core Gamma Spectral Gamma Logger, Core Laboratories Instruments). 48

Figura 3.8 – Microtomógrafo modelo V tome XL300 (GE/Phoenix). IRF/Laboratório de Tomografia do CENPES. 49

Figura 3.9 – Na figura superior está ilustrado o esquema de processo de projeção de imagem microtomográfica de raios X. Na figura inferior, desenho esquemático da reconstrução de imagens a partir de projeções, Fernandes *et al.* (2011). 50

Figura 3.10 – Processo de binarização de uma amostra. (a) Seção 2D e (b) seção binarizada da região definida pelo polígono em (a). Ao centro o histograma de valores médios de radiodensidade, onde se definiu o limiar entre grão e poro (linha azul). Fernandes *et al.* (2011). 51

Figura 3.11 - Permo-porosímetro a hélio DV-4000 (Weatherford laboratories). 51

Figura 3.12 – Amostra de sal, recipiente de volume conhecido e os cilindros calibrados utilizados na medida de massa específica do grão. 53

Figura 3.13 – Tomografia de raios X em duas amostras de evaporitos: A) amostra de carnalita e em B) amostra de halita. Podemos notar que a amostra de carnalita sofre mais com a dissolução devido à umidade do ambiente. 54

Figura 3.14 – Esquema ilustrativo do sistema de medidas de velocidades elásticas em amostras de rochas. Vasquez *et al.* (2010). 55

- Figura 3.15 – Amostra ajustada ao cabeçote de medida preparada para análise. Neste caso foi utilizado material termo-retrátil para isolar a amostra do fluido confinante. 56
- Figura 3.16 – Fotografia de detalhe do conjunto de cristais piezoelétricos. 57
- Figura 3.17 – Formas de onda compressional (acima) e de cisalhamento (abaixo), mostrando a correlação do sinal do tempo de sistema (curva azul) e o sinal da amostra (curva vermelha). Morschbacher *et al.* (2010). 57
- Figura 3.18 – Célula triaxial cilíndrica axissimétrica RTR-1500 (rapid rock triaxial system) desenvolvida pela empresa GCTS. Na fotografia da direita podemos observar uma amostra com a instrumentação de deformação instalada. 58
- Figura 3.19 – Sistemas típicos de medição de deformação lateral. No equipamento RTR-1500 o sistema utilizado é o circunferencial. 59
- Figura 3.20 – Etapas dos ensaios de compressão triaxial para a amostra PE-K-2. Em A está definido o ciclo hidrostático e em B o ciclo triaxial. 60
- Figura 4.1 – Corpos de prova cilíndricos das diferentes classes obtidas de furo de sondagem sub-horizontal. Na parte superior da figura: Amostras PE-A-1, PE-B-1, PE-C-1 e PE-D-1, na parte inferior PE-E-1, PE-F-1, PE-G-1 e PE-K-1. Cada quadrado do papel reticulado mede 5 mm de lado. 62
- Figura 4.2 – Corpos cilindros oriundos das amostras de mão recolhidas na mina. Amostras PE-H-1, PE-I-1 e PE-J-1 da esquerda para a direita. Cada quadrado do papel reticulado mede 5 mm de lado. 62
- Figura 4.3 – Análise de raios gama total. As três primeira trilhas indicam a contribuição de cada um dos elementos (U, Th e K). A trilha 4 é o resultado do somatório das três contribuições em unidade API. O círculo vermelho mostra o efeito de borda ao se analisar a caixa 1 pela segunda vez. A trilha 6 apresenta o resultado de raios gama total corrigido quanto aos erros de posicionamento da caixa no equipamento. 65
- Figura 4.4 – Análise de MEV e EDS da amostra de silvinita PE-A-1. Os espectros da análise de EDS indicam a presença de halita (1) e silvita (3). As classes A, B e I apresentam análises de MEV e EDS semelhantes, podendo ser classificadas como silvinita. 66
- Figura 4.5 – Análise de MEV e EDS da amostra de halita com filmes de argila PE-C-1. Os espectros da análise do EDS indicam a presença de Halita (1) e de aluminossilicato (3), provavelmente um argilomineral. A classe C pode ser classificada como halita com presença de lamina de argila. 67

Figura 4.6 – Análise de MEV e EDS da amostra de halita PE-F-1. Os espectros da análise do EDS indicam a presença de halita (1) e silicato (2), provavelmente quartzo. Nestas imagens o silicato aparece como impureza entre os cristais de halita. 67

Figura 4.7 – Análise de MEV e EDS da amostra de halita PE-D-1. Os espectros da análise do EDS indicam a presença de halita (1 e 2). As classes D, E, F e K apresentam análises de MEV e EDS semelhantes, podendo ser classificadas como halita. 68

Figura 4.8 – Análise de MEV e EDS da amostra de halita de zona de brecha PE-G-1. Os espectros da análise do EDS indicam além da presença de halita a formação de cristais de anidrita (2), de carbonatos ricos em Mg (3), presença de silicatos (5) e sulfetos ricos em ferro (6). 68

Figura 4.9 – Análise de MEV e EDS da amostra de carnalita PE-H-1. Os espectros da análise do EDS indicam a presença de carnalita (1) e silvita (4). É possível identificar os cristais de silvita precipitando sobre a carnalita, material de cor branca sobre a carnalita esverdeada da foto. 69

Figura 4.10 – Detalhe da análise de MEV e EDS da amostra de carnalita PE-H-1. É possível identificar a formação de cristais cúbicos de silvita sobre a matriz de carnalita, formando uma capa de alteração, devido a exposição da amostra à umidade do ambiente durante a análise. 70

Figura 4.11 – Cristalinidade, ou tamanho do cristal, do mineral evaporítico. Comparação entre amostra de halita microcristalina com presença de argilossilicato (A) com cristais de tamanho médio inferior à 0,1mm com amostra de silvinita (B) com cristais de halita e silvita com tamanho médio próximo a 2 mm, cerca de 20 vezes maior. Mesma escala. 71

Figura 4.12 - Gráficos esquemáticos mostrando a relação entre a resolução vertical de ferramentas de perfilagem elétrica e sua profundidade de investigação, Crain (2001). 73

Figura 4.13 - Gráfico entre a densidade e a vagarosidade compressional. Os pontos cinzas representam os valores de perfis elétricos. Os pontos coloridos representam os diferentes valores da literatura, tabela 4.4. Justen *et al.* (2013). 73

Figura 4.14 – Comparação entre os valores de massa específica do mineral (G) e de massa específica aparente seca (Ga). Neste gráfico não está representada a única amostra de carnalita analisada (PE-H-1). 76

Figura 4.15 – Relação entre a porosidade e a massa específica do mineral (G). As amostras de silvinita (classes A, B e I) são as que apresentam os maiores valores de porosidade seguidos pelas

halitas brechadas (classe G). Neste gráfico não está representada a única amostra de carnalita analisada (PE-H-1). 76

Figura 4.16 – Resultado da análise de massa específica dos grãos. Gráfico de barras esquemático indicando o valor médio e o desvio padrão. O valor médio está localizado no limite entre a barra vermelha e a verde. O desvio padrão positivo é a barra verde e o desvio padrão negativo é a barra vermelha. Neste gráfico não está representada a amostra de carnalita (PE-H-1). 78

Figura 4.17 – Imagem tomográfica ortogonal ao comprimento da amostra PE-I-1. 79

Figura 4.18 - Resultados da segmentação da amostra PE-I-1. Halita (azul claro), Silvita (azul escuro) e eventual espaço poroso vazio ou fratura (preto). 80

Figura 4.19 – Cálculo de volume para seção ortogonal ao comprimento da amostra. Intervalo entre as seções, fatias, é de 36.5 μm (resolução obtida nesta análise). Curva vermelha: halita. Curva preta: silvita. 80

Figura 4.20 – Microtomogramas da amostra PE-C-3 após a ruptura em ensaio triaxial. 81

Figura 4.21 – Análise de velocidade ultrassônica da amostra PE-D-3. Os três gráficos superiores mostram a identificação dos eventos nas formas de onda adquiridas para VP, VS1 e VS2. Os três gráficos inferiores mostram os resultados interpretados para velocidade. Carregamento em azul e descarregamento em preto. 84

Figura 4.22 – Comparação entre as análises de velocidade de propagação de ondas das amostras PE-D-3 (gráficos superiores) e PE-G-2 (gráficos inferiores). Notar a baixa relação sinal-ruído na amostra PE-G-2 dificultando a identificação dos eventos. 85

Figura 4.23 – Gráficos de correlação entre as velocidades cisalhantes ortogonais (VS1 e VS2) e entre a velocidade compressional e cisalhante para tensão de confinamento de 5000 psi. No gráfico da esquerda a reta preta indica valores idênticos (1:1), enquanto que as retas tracejadas indicam a variação de 2% positivo e negativo. As amostras de halita estão representadas pelo círculos vermelhos preenchidos, as amostras de silvinita pelos círculos azuis preenchidos e a amostra de carnalita pelo círculo verde preenchido. Os círculos sem preenchimento são os valores da referência 4 da tabela 4.4, mostrando uma excelente concordância com a literatura. 87

Figura 4.24 – Comparação entre as análises de velocidade das amostras de silvinita e o volume da fase halita definido na tabela 4.7. As amostras de silvinita estão representadas por círculos azuis preenchidos e o valor de halita da referência 4 da tabela 4.4 por círculo vermelho sem preenchimento. 89

- Figura 4.25 – Velocidade compressional (VP) e cisalhante (VS) em função da tensão confinante ou pressão confinante, Popp e Kern (1997). 89
- Figura 4.26 – Microtomografia de raios X da amostra PE-I-1. A imagem da direita ilustra o microtomograma utilizado na modelagem numérica. Em preto a fase silvita e em branco a fase halita. A imagem tem dimensão de 1222x701 pixels. 90
- Figura 4.27 – Resultado da simulação por diferenças finitas. São mostrados vários snapshots a partir da emissão do sinal. As linhas vermelhas indicam a posição do emissor (superior) e do receptor (inferior). 92
- Figura 4.28 – Figura esquemática mostrando o cálculo da velocidade. Relação simples entre a distância do emissor ao receptor e o tempo gasto durante a propagação do pulso na amostra (seta preta). Em vermelho o sinal da fonte e em verde os receptores. 92
- Figura 4.29 – Resultado da simulação por diferenças finitas. Em A o modelo implementado em Matlab. Em B o modelo utilizado na Petrobras. Note que o modelo B não apresenta o efeito de reflexão nas bordas do modelo. 93
- Figura 4.30 – Figura esquemática mostrando as simulações de mudança do teor de halita em amostra de silvinita. 94
- Figura 4.31 – Resultado da simulação por diferenças finitas. Gráfico da esquerda mostrando as formas de onda para cada um dos cenários simulados. Gráfico da direita mostrando o valor de velocidade obtido, linha azul. Em vermelho e preto os limites teóricos de Voigt e Reuss. Em verde estão plotadas as amostras de silvinita, figura 4.24. 95
- Figura 4.32 – Correlação entre o teor de halita e a velocidade. Modelo considerando 1% e 2% de porosidade. A amostra PE-A-3 que apresenta o maior valor de velocidade aparenta estar com o teor de halita subestimado. 95
- Figura 4.33 – Primeiros ensaios de compressão triaxial. A primeira coluna de gráficos ilustra a trajetória de tensão ao qual a amostra foi submetida. A segunda coluna mostra a deformação axial e radial com tempo. A terceira coluna mostra a curva típica de tensão e deformação para este tipo de ensaio triaxial. Os gráficos superiores se referem a amostra PE-C-1, os médios à amostra PE-K-2 e os inferiores à amostra PE-K-3. 97
- Figura 4.34 – Ciclo de descarregamento e carregamento hidrostático para a amostra PE-C-3. O ajuste linear para obtenção do módulo de incompressibilidade (K) foi feito na parte do ciclo de tensão confinante (MPa) 80-5-35. 98

- Figura 4.35 – Gráfico com as taxas de deformação e de tensão ao longo do experimento. Gráficos da segunda coluna se referem ao detalhe do primeiro ciclo triaxial da amostra PE-C-3. 99
- Figura 4.36 – Ensaios de compressão triaxial para as amostras da classe E. A primeira coluna de gráficos ilustra a trajetória de tensão ao qual a amostra foi submetida. A segunda coluna mostra a deformação axial e radial com tempo. A terceira coluna mostra a curva típica de tensão e deformação para este tipo de ensaio triaxial. Os gráficos superiores se referem a amostra PE-E-1, os médios à amostra PE-E-2 e os inferiores à amostra PE-E-3. 100
- Figura 4.37 – Gráfico com as taxas de deformação e de tensão ao longo do experimento. Gráficos da segunda coluna se referem ao detalhe do terceiro ciclo triaxial da amostra PE-E-2. 102
- Figura 4.38 – Ensaios de compressão triaxial para as amostras da classe D. A primeira coluna de gráficos ilustra o padrão de tensão ao qual a amostra foi submetida. A segunda coluna mostra a deformação axial e radial com tempo. A terceira coluna mostra a curva típica de tensão e deformação para este tipo de ensaio triaxial. Os gráficos superiores se referem a amostra PE-D-1, os médios à amostra PE-D-2 e os inferiores à amostra PE-D-3. 103
- Figura 4.39 – Curva típica de Fluência do sal. Falcão *et al.* (2007). 105
- Figura 4.40 – Comparação entre o módulo de incompressibilidade estático e dinâmico. A reta na cor preta é a relação 1:1. 107
- Figura 4.41 – Comparação entre o módulo de Young estático e dinâmico. A reta na cor preta é a relação 1:1. 107
- Figura 4.42 – Gráfico de correlação entre o módulo de Young e o módulo de incompressibilidade. Os valores obtidos pelo método dinâmico estão plotados como cruz de cor azul. Os outros pontos são os resultados do ensaio estático. 107

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Teores médios de íons e sais na água do mar com salinidade normal. Mohriak <i>et al.</i> (2008).	25
Tabela 2.2 – Composição química dos principais minerais evaporíticos.	25
Tabela 2.3 – Relação dos principais países produtores de potássio. Fonte: DNPM/SE.	37
Tabela 3.1 – Relação de amostras coletadas na mina de Taquari-Vassouras.	40
Tabela 3.2 – Relação dos corpos de prova utilizados nas análises desta dissertação.	41
Tabela 3.3 – Propriedades cristalográficas dos principais minerais evaporíticos.	44
Tabela 4.1 – Relação dos ensaios de caracterização mineralógicas realizados nas amostras de evaporitos.	63
Tabela 4.2 – Tabela esquemática da resposta típica aos perfis de densidade e raio gama natural dos cinco principais minerais evaporíticos encontrados nas bacias brasileiras.	64
Tabela 4.3 – Descrição mineralógica das classes de amostras analisadas.	71
Tabela 4.4 – Propriedades físicas de minerais típicos de rochas evaporíticas, caracterizados em perfis elétricos de poços. Os números na última coluna indicam a fonte de referencia: 1 – Blum (1997); 2 – Crain (2001); 3 – Mohriak <i>et al.</i> (2008) e 4 – Mavko <i>et al.</i> (2003). Modificado de Justen <i>et al.</i> (2013).	72
Tabela 4.5 – Resultado da análise de massa específica dos grãos. Massa específica do mineral (G). Massa específica aparente seca (Ga). As amostras PE-C-3, PE-K-1 e PE-K-2 não foram analisadas.	75
Tabela 4.6 - Resultado da análise de massa específica dos grãos.	77
Tabela 4.7– Resultado da análise de massa específica dos grãos. Cálculo considerando que a amostra é constituída apenas por halita e silvita.	78
Tabela 4.8 – Comparação entre os resultados.	79

Tabela 4.9 – Resultado da interpretação da análise de velocidade ultrassônica da amostra de halita PE-D-3.	84
Tabela 4.10 – Resumo dos resultados da interpretação da análise de velocidade para as amostras de evaporitos utilizadas nesta dissertação. A amostra PE-A-1 rompeu durante o ensaio. Valores para tensão de confinamento igual a 5000 psi. Para o cálculo dos módulos elásticos foi considerado o valor médio das duas ondas cisalhantes.	86
Tabela 4.11 – Resultado da análise de velocidade. Valores médios e desvio padrão.	88
Tabela 4.12 – Resultado da análise de velocidade para os módulos elásticos. Valores médios e desvio padrão.	88
Tabela 4.13 – Parametrização dos ensaios de compressão triaxial.	96
Tabela 4.14 – Resultado das análises iniciais de compressão triaxial. Em vermelho os valores razão de Poisson acima do valor teórico máximo para materiais elásticos e isotrópicos.	98
Tabela 4.15 – Resultado das análises iniciais de compressão triaxial. Amostras de halita da classe E.	99
Tabela 4.16 – Comparação entre os valores de razão de Poisson obtidos na análise de compressão triaxial (RP) e o valor teórico (RP elast).	101
Tabela 4.17 – Resultado das análises iniciais de compressão triaxial. Amostras de halita da classe D.	102
Tabela 4.18 – Comparação entre os valores de razão de Poisson obtidos na análise de compressão triaxial (RP) e o valor teórico (RP elast) calculados a partir de K e E.	104
Tabela 4.19 – Comparação entre os módulos elásticos obtidos em ensaios estáticos e dinâmicos.	106

Lista de Símbolos

P	Pressão
V	Volume
n	Mols de gás
r	Constante universal dos gases perfeitos
T	Temperatura
Rhog	Massa específica do grão
%A	Percentual do componente A
%B	Percentual do componente B
Vc	Volume do cilindro
Vs	Volume dos sólidos
VP	Velocidade da onda compressional
VS1	Velocidade da onda cisalhante 1
VS2	Velocidade da onda cisalhante 2
VS	Velocidade da onda cisalhante média
dx	Comprimento da amostra
dt	Intervalo de tempo
t	Tempo final
t ₀	Tempo inicial
Δt	Diferença entre o tempo final e o inicial
σ ₁	Tensão principal maior
σ ₂	Tensão principal média
σ ₃	Tensão principal menor
DTc	Vagarosidade compressional
DTs	Vagarosidade cisalhante
G	Massa específica do mineral
Ga	Massa específica aparente seca
ρ	Densidade
K	Módulo de incompressibilidade
μ e G	Módulo de cisalhamento
E	Módulo de Young
RP	Razão de Poisson
c	Campo de velocidade acústica
Kdry	Módulo de incompressibilidade da rocha seca
K ₀	Módulo de incompressibilidade do mineral
φ	Porosidade
φ _c	Porosidade crítica
L	Comprimento
ΔL	Variação do comprimento
ε	Deformação
ε ₀	Deformação elástica

1

Introdução

Os evaporitos são rochas e minerais que têm sua deposição diretamente ligada à evaporação de um corpo de água salino. Formam depósitos de grande expressão no registro geológico de diversas bacias sedimentares espalhadas pelo mundo, contrastando com a pequena presença de regiões atualmente propícias à deposição deste material.

Na sua mais simples subdivisão, podem ser separados em evaporitos carbonáticos e evaporitos salinos. Os evaporitos são rochas que desempenham importante papel na modelagem de sistemas petrolíferos, pois podem ser rocha geradora, reservatório, selo e agente estruturador de reservatórios de petróleo. Entretanto, na área de engenharia, seja na mineração ou na exploração de petróleo, este é um material que apresenta uma complexidade mecânica que demanda estudos específicos para a sua correta caracterização. Na região do pré-sal apesar da presença dos evaporitos estar relacionada com inúmeros casos de sucesso exploratório, vários são os casos de problemas operacionais relatados durante a perfuração de poços de petróleo.

Estudos laboratoriais neste tipo de material têm se mostrado escassos com o passar dos tempos, seja pela mudança de foco quanto aos evaporitos (como no início do século XX no evaporito Neopermiano de Zechstein, nas minas de sal do norte da Alemanha, onde se iniciaram os principais estudos de geologia e química dos evaporitos ou nas pesquisas de disposição de resíduos realizados na década de oitenta pelo *Sandia National Laboratories* até a instalação da planta *WIPP-Waste Isolation Pilot Plant* em 1999) ou pela crescente aplicação de métodos numéricos na simulação de processos elásticos e mecânicos. No entanto, mesmo no último caso, os módulos elásticos são fundamentais para a correta definição do modelo matemático proposto, demonstrando a importância da caracterização elástica das rochas evaporíticas.

1.1. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é analisar as propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos. Para este fim, foram definidas etapas metodológicas de caracterização mineralógica, volumétrica e elástica das amostras de evaporitos oriundas da mina de Taquari-Vassouras.

A etapa de caracterização mineralógica, cuja importância está na necessidade de definição composicional do corpo de prova analisado, consistiu na realização de ensaios tradicionais de caracterização de rochas como descrição macroscópica, análise em lupa ótica digital, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e análise de radioatividade natural.

A caracterização volumétrica proposta nesta dissertação vem de encontro com a necessidade de interpretar os resultados de maneira mais quantitativa, permitindo relacionar os resultados elásticos e mecânicos à composição da amostra analisada. Foram utilizadas técnicas de microtomografia de raios X e análise de massa específica do grão, esta última através de equipamento de medição de porosidade e permeabilidade a hélio.

A etapa final, caracterização elástica, consistiu na realização de ensaios dinâmicos e estáticos a fim de se obter os módulos elásticos dos evaporitos. Os ensaios dinâmicos, de caráter não-destrutivo, foram realizados através da técnica de propagação de pulsos ultrassônicos. Os módulos elásticos são obtidos a partir dos valores de velocidades e densidade do material utilizando os conceitos da teoria da elasticidade. No método estático, os módulos elásticos foram obtidos através da execução de ensaios de compressão triaxial com diversos ciclos de carregamento e descarregamento, no intuito de caracterizar o material durante o trecho elástico. Ao final os módulos elásticos resultantes dos dois métodos de análise são comparados a fim de se verificar a correlação entre os módulos estáticos e dinâmicos.

1.2. Organização

Esta dissertação se encontra dividida em seis capítulos mais o apêndice contendo os resultados das análises realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 1 é feita a introdução e contextualização do objetivo do presente trabalho, além da apresentação da organização deste texto.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica do material geológico analisado: os evaporitos. São realizadas considerações sobre a sua gênese e disposição atual sobre a crosta terrestre. São listados os principais eventos relacionados a deposição deste litotipo no Brasil, além de uma breve descrição da mina de Taquari-Vassouras, de onde foram obtidas as amostras analisadas.

No capítulo 3 são apresentadas as metodologias de análise propostas para a caracterização mineralógica, volumétrica e elástica dos evaporitos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta no capítulo 3 de caracterização dos corpos de prova evaporíticos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente trabalho, além de sugestões de continuidade de pesquisa sobre este tema.

No capítulo 6 são listadas as referências bibliográficas utilizadas ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Ao final foram anexados em forma de apêndice os resultados analíticos de experimentos realizados nos corpos de prova evaporíticos.

2

Minerais e Rochas Evaporíticas

Evaporitos são minerais e rochas sedimentares que têm a sua formação, ou deposição, associada à evaporação de água salina. Em geral estão relacionados a ambiente marinho ou lagunar restrito onde o influxo de água é menor do que a evaporação. A intensa evaporação da água em ambiente restrito, seja por aridez ou por diminuição do aporte de água, favorece a precipitação dos sais nela dissolvidos, formando os chamados depósitos evaporíticos. Depósitos que são associados a bacias evaporíticas identificadas desde o Proterozóico até o recente.

Sonnenfeld apresenta em trabalho publicado na década de oitenta (Sonnenfeld, 1989), uma lista de cem minerais evaporíticos primários associados a sequências marinhas e lacustrinas, bem como suas principais alterações diagenéticas. No entanto, para estudos práticos e importância de ocorrência, esta lista se resume a menos de duas dezenas de minerais, dos quais menos da metade será tratada nesta dissertação. Os termos rocha e mineral no caso de depósitos evaporíticos muitas vezes são aplicados sem distinção, entretanto sabemos da geologia que rocha é um agregado de minerais ou substâncias orgânicas e mineral uma substância de ocorrência natural, inorgânica, caracterizado por uma estrutura cristalina típica. Nesta dissertação faremos sempre que possível esta distinção.

2.1.

Composição química da água do mar e dos minerais evaporíticos

A água do mar possui uma concentração salina média de 35.000 mg/l aproximadamente constante nos diferentes oceanos. A tabela 2.1 apresenta os teores médios dos íons e sais presentes na água do mar, (Mohriak *et. al.*, 2008).

Com a evaporação da água ocorre a precipitação dos sais dissolvidos, dando origem aos minerais evaporíticos, cuja composição química dos principais componentes deste grupo é listada na tabela 2.2. Pode-se notar a correspondência entre as tabelas 2.1 e 2.2, indicando a presença, nos oceanos, dos principais íons formadores de minerais evaporíticos.

Íons	Concentração (peso em partes por mil)	Sais	Porcentagem em peso (%)
Na^+	10,560	NaCl	78,03
Mg^{++}	1,270	MgCl_2	9,21
Ca^{++}	0,400	MgSO_4	6,53
K^+	0,380	CaSO_4	3,84
Sr^{++}	0,008	KCl	2,11
Cl^-	19,000	CaCO_3	0,33
SO_4^{--}	2,650	MgBr_2	0,25
HCO_3^-	0,140	SrSO_4	0,05
Br^-	0,065	NaF	0,01
F^-	0,001		
B	0,005		

Tabela 2.1 – Teores médios atuais de íons e sais na água do mar com salinidade normal. Mohriak *et al.* (2008).

Mineral	Composição química
Calcita	CaCO_3
Magnesita	MgCO_3
Dolomita	$\text{Ca(Fe,Mg)(CO}_3)_2$
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anidrita	CaSO_4
Halita	NaCl
Silvinita	KCl
Carnalita	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Taquidrita	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Bischofita	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Tabela 2.2 – Composição química dos principais minerais evaporíticos.

2.2.

Sequência de deposição de minerais evaporíticos

Segundo a mais simples subdivisão os minerais evaporíticos primários podem ser separados em evaporitos carbonáticos e evaporitos salinos (Warren 2006). Os evaporitos carbonáticos (como calcita, magnesita, aragonita e dolomita, por exemplo), tendem a se formar nos estágios iniciais da concentração da salmoura hipersalina, sendo os primeiros minerais a se precipitarem, seja por acumulação inorgânica ou por crescimento biológico. Os evaporitos carbonáticos podem conter e preservar elevados teores de matéria orgânica que podem subsequentemente gerar hidrocarbonetos. Os evaporitos salinos são formados em estágios mais elevados de concentração salina após a precipitação dos carbonatos alcalinos, seguindo ciclos bem definidos em função das diferentes solubilidades. Para os estudos realizados nesta dissertação serão considerados apenas os evaporitos salinos, material que apresenta comportamento elástico e mecânico bem distintos dos evaporitos carbonáticos.

A deposição dos evaporitos em solução aquosa obedece a diferentes leis da química, resultando em distintos minerais, frente à solubilidade típica do componente salino. Como comentado anteriormente, para que isso ocorra, é necessário que a taxa de evaporação seja maior do que a taxa de influxo de água (precipitação pluviométrica e entrada de água doce ou salgada na bacia). A aridez e isolamento da bacia também são fatores necessários para a concentração e precipitação sequencial dos evaporitos.

Ao se observar o registro geológico de antigas bacias evaporíticas é possível identificar sucessões litológicas ao longo dos estratos, indicando variação da salinidade, ou conteúdo de íons, na salmoura original ao longo do tempo geológico. Mudanças climáticas ou de aporte de água no sistema imprimem certa ciclicidade aos depósitos evaporíticos, permitindo identificar diferentes ciclos evaporíticos. Ciclos que são definidos pelo aumento da salinidade da salmoura até o influxo de água nova causando a sua súbita diminuição.

Mohriak *et al.* (2008) definem que cada ciclo primário é marcado na base por camadas contínuas de folhelhos pretos ricos em matéria orgânica. A precipitação dos evaporitos segue uma ordem de deposição dependente de dois fatores: a solubilidade e a quantidade de cada composto disponível na salmoura.

Na figura 2.1 está representada a sequência típica de precipitação de minerais evaporíticos relacionando a evaporação da água do mar e a densidade da salmoura original.

Inicialmente são depositados os evaporitos carbonáticos como calcita, aragonita e dolomita, que podem ou não ser precipitados químicos. O primeiro evaporito salino a se depositar é a gipsita, que mais tarde é transformada em anidrita com a contínua perda de água estrutural, em geral associada à subsidência da bacia. Esta mudança de fase mineral é acompanhada por uma compactação de cerca de 60%, ajudando a explicar a diferença entre a massa específica da gipsita ($2,35 \text{ g/cm}^3$) e a da anidrita ($2,98 \text{ g/cm}^3$).

Posteriormente se deposita a halita, que vem a ser o mineral evaporítico mais abundante na crosta terrestre, seja em depósitos salinos ou dissolvido na água do mar (tabela 2.1). O próximo mineral a se depositar é a silvita, que difere da halita pela substituição do sódio pelo potássio. A silvita é um mineral de grande interesse para a indústria de exploração de potássio. Entretanto, não se espera a formação de grandes estratos de silvita. Em geral a silvita observada em depósitos evaporíticos está relacionada à alteração do mineral seguinte na ordem de deposição: a carnalita.

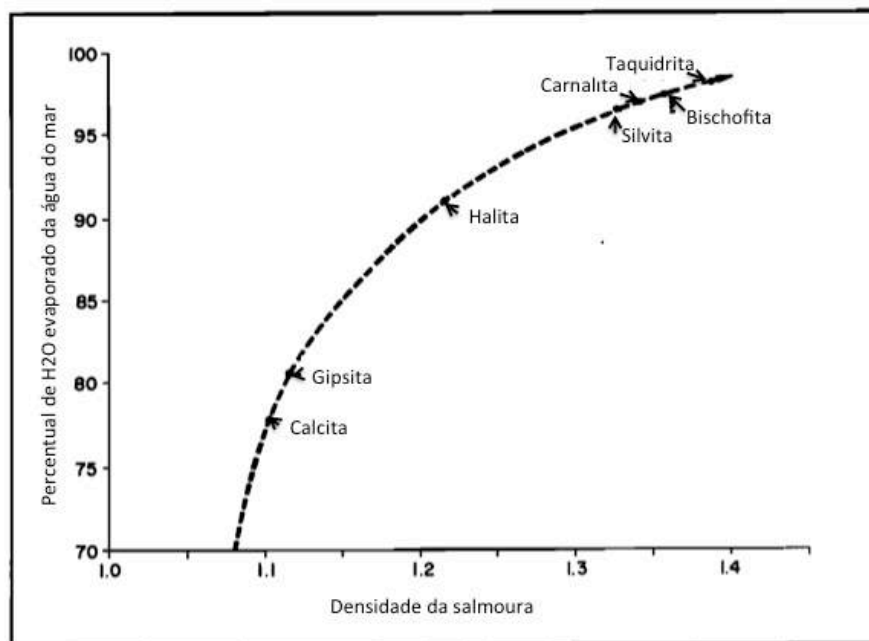


Figura 2.1 – Sequência de deposição dos minerais evaporíticos. Relação entre a densidade da salmoura, em g/cm^3 , e o percentual de evaporação da água do mar. Modificado de Sonnenfeld (1984).

A carnalita inicia a sequência de minerais evaporíticos que apresentam água na sua composição cristalina, se depositando apenas em salmouras altamente concentradas. Este mineral também é de grande interesse para a indústria do potássio e tem sua exploração normalmente realizada em sistemas de dissolução por água. Encerrando a sequência de precipitação dos evaporitos ocorre a bischofita. No entanto, caso o sulfato presente na salmoura original não tenha precipitado todo o cálcio, podemos observar ainda a formação do mineral taquidrita em substituição à bischofita. Em geral associa-se a decomposição bacteriana dos sulfatos à presença de taquidrita no final do ciclo evaporítico.

Entretanto, no registro geológico, o que observamos é uma sucessão de ciclos evaporíticos, por vezes sem a presença dos minerais típicos de salmoura altamente concentrada como carnalita ou bischofita, indicando o influxo de água ou mudanças climáticas que não permitiram uma completa evaporação, figura 2.2.

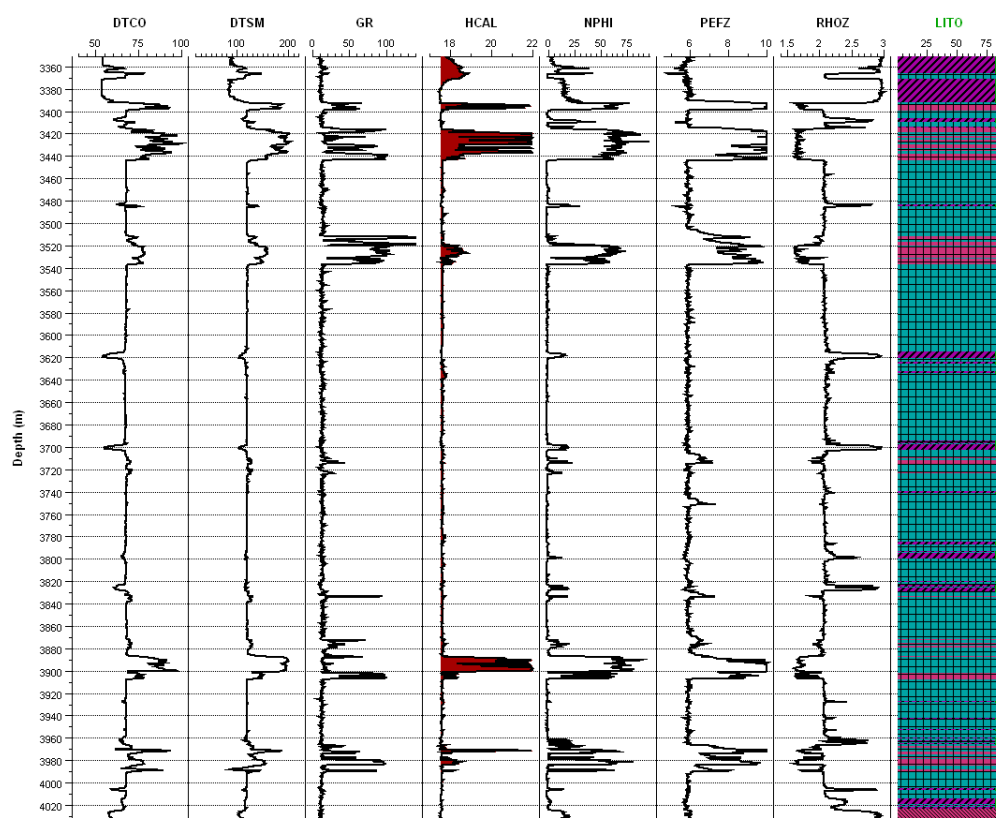


Figura 2.2 – Suíte básica de perfis de um poço da bacia de Santos que perfilou a sequência evaporítica. Os perfis de raio gama e densidade, trilhas 3 e 7, são os principais identificadores litológicos. Na trilha 8 estão coloridos os diferentes tipos de evaporitos, indicando a ciclicidade litológica: anidrita na cor púrpura, carnalita na cor vermelha e halita na cor verde.

2.3. Sedimentação de evaporitos

Bacias evaporíticas são identificadas desde o Proterozóico até o recente, de maneira que alguns conceitos observados atualmente, apesar de hoje não observarmos exemplos de deposição de grandes acumulações de evaporitos, ajudam a entender estes depósitos. Questões como aridez, ambiente restrito e balanço hidrológico já foram discutidas em seções anteriores, no entanto, a mais importante observação dos ambientes atuais está relacionada ao fato de que grande parte das bacias de evaporitos que hoje depositam estes minerais típicos estão situadas abaixo do nível médio dos mares.

Os modelos de sedimentação de evaporitos mais aceitos atualmente pressupõem que as acumulações são formadas em bacias sedimentares isoladas por barreiras naturais que dificultariam a troca de água com o oceano. Um dos primeiros modelos propostos para explicar a deposição dos depósitos evaporíticos foi o “modelo de deposição concêntrica para a formação de ciclos evaporíticos”, olho de boi (*bull's eye model*) e gota de lágrima (*tear drop model*). Sendo este último mais assimétrico. Nestes modelos, se espera a deposição inicial dos carbonatos, seguida pelos sulfetos e, ao final do ciclo, os cloretos, conforme a figura 2.3. Dependendo do grau extremo de concentração da salmoura podem ser precipitados os cloretos de potássio e magnésio, onde a bischofita e a taquidrita são os últimos minerais a se cristalizarem.

ORIGEM DO CICLO EVAPORÍTICO

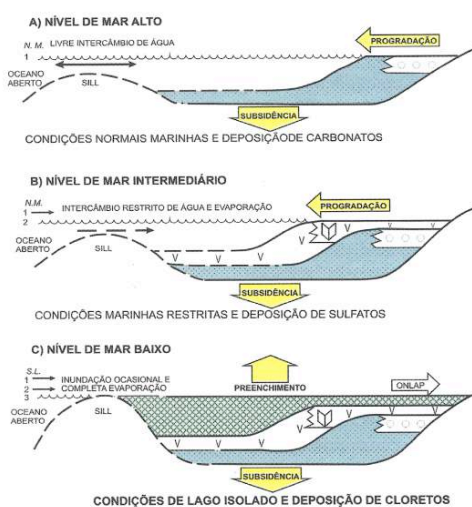
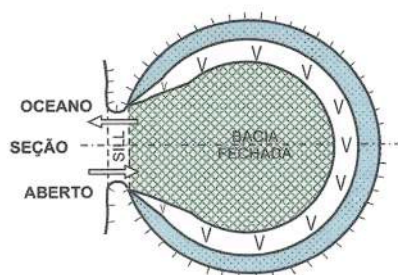


Figura 2.3– Modelo de deposição concêntrica para a formação de ciclos evaporíticos. Mohriak *et al.* (2008).

Neste modelo a grande espessura dos depósitos estaria relacionada à contínua subsidência da bacia, modelo de bacia rasa e água rasa, o que é contestado por sedimentologistas frente à pequena batimetria dos ambientes evaporíticos atuais, o que resultaria em uma taxa de subsidência muito acentuada para as acumulação de milhares de metros de evaporitos em alguns milhões de anos, figura 2.4 B.

Uma outra opção é o modelo de bacia profunda e água profunda, onde se admite que os evaporitos são formados na interface água-ar e se depositariam no fundo desta bacia profunda, explicando assim as grandes espessuras de evaporitos encontradas em algumas bacias, figura 2.4 A. Novamente, frente às observações atuais, este modelo é muito contestado baseado no fato de que os depósitos atuais estão associados com ambientes marinhos rasos e em depósitos antigos se observa a presença de feições sedimentares como gretas de contração, típicas de exposição subaérea.

O modelo proposto para contornar estas contestações é o modelo de bacia profunda e água rasa, figura 2.4 C. Nele se admite a presença de uma barreira que isola a bacia evaporítica do oceano ou fonte principal do influxo de água. Como observado por Hsu (1972), este modelo se baseia nas observações do mar mediterrâneo, onde a bacia original estaria abaixo do nível médio dos mares. Associado à aridez e à ausência de influxo de água este modelo admite a precipitação de evaporitos pelo completo ressecamento da bacia. Em casos de subida do nível no mar, atingindo um nível superior à barreira, esta bacia poderia ser novamente afogada admitindo um ciclo transgressivo marinho associado a uma nova sequência evaporítica.

Mohriak *et al.* (2008) observam a ausência de grandes bacias marinhas com deposição de evaporitos nos dias atuais, de maneira que os depósitos antigos devem estar associados aos mais diversos contextos tectônicos. A figura 2.5 destaca os modelos conceituais para deposição de evaporitos em bacias interiores e margens continentais. Os modelos A, B e C são associados a bacias interiores e os modelos D e E ao contexto de margens continentais terrígenas e carbonáticas, respectivamente. O modelo F, tipo marinho profundo oceânico, se assemelha ao contexto de deposição dos evaporitos do Mediterrâneo, onde os sais estão intercalados com os sedimentos marinhos.

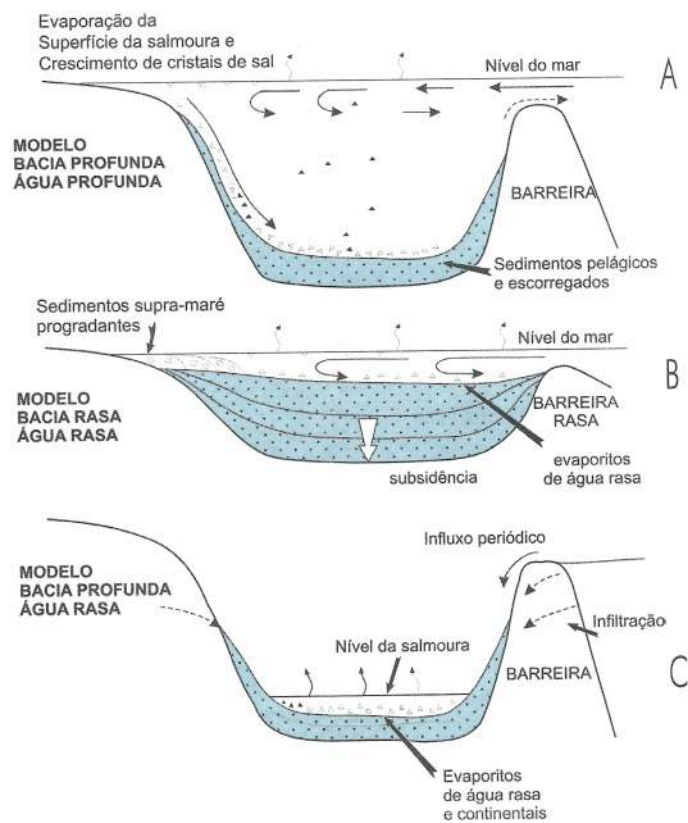


Figura 2.4 – Modelos de bacias evaporíticas com barreiras. Mohriak *et al.* (2008).

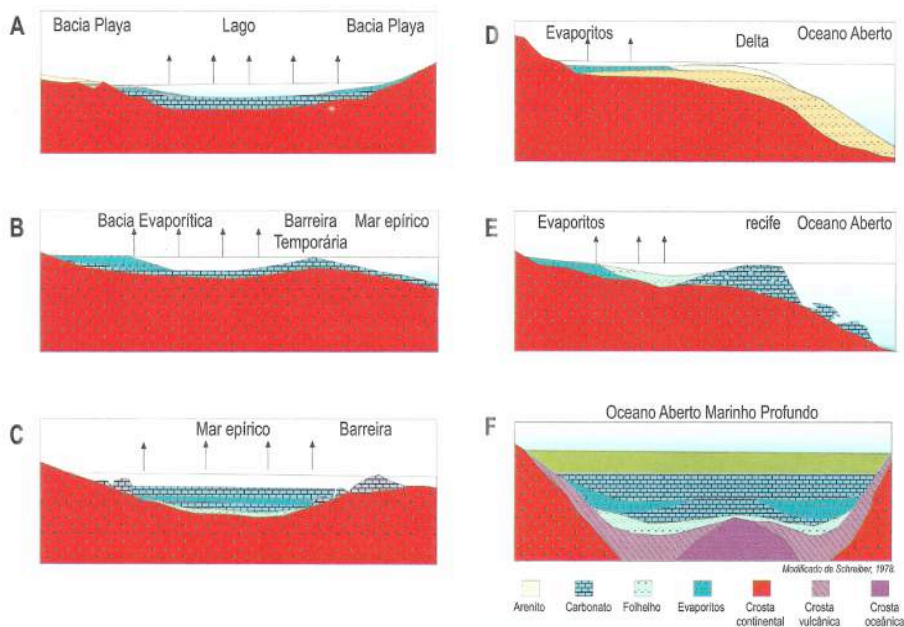


Figura 2.5 – Modelos conceituais de bacias evaporíticas. Mohriak *et al.* (2008).

2.4.

Ambientes modernos de sedimentação de evaporitos

Ao compararmos as grandes bacias evaporíticas do passado, como os depósitos terciários da bacia do Mediterrâneo, depósitos cretáceos da bacia do Atlântico Sul ou depósitos permianos bacia do Mar do Norte, com os restritos depósitos evaporíticos recentes, fica claro o quanto o ambiente no Holoceno é inapropriado para o desenvolvimento de grandes depósitos evaporíticos, figura 2.6. Segundo Mohriak *et al.* (2008), os poucos ambientes modernos favoráveis à deposição de evaporitos ocorrem na região do Golfo Pérsico, Mar Vermelho, Mar Morto, Kara-Bogaz-Gol, no mar Cáspio, e lago Assal, no norte da África, figura 2.7

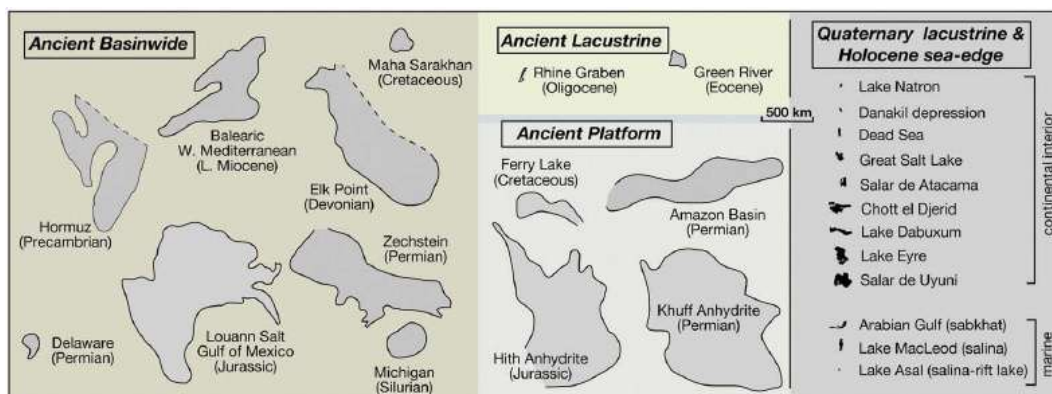


Figura 2.6 – Figura esquemática mostrando a extensão areal de depósitos evaporíticos antigos e recentes. Todas as áreas estão representadas na mesma escala. Warren (2010).



Figura 2.7 – Mapa global mostrando as bacias evaporíticas modernas na África, Arábia e Ásia. Fonte: Earth 3D Amazing Atlas.

O lago Kara-Bogaz-Gol, figura 2.8, é um exemplo recente de deposição de evaporitos que pôde ser acompanhado na escala de tempo humana. Este lago no Turquemenistão, com cerca de 22 mil quilômetros quadrados, está localizado à leste do mar Cáspio, com nível d'água situado 3 metros mais baixo que o mar que o alimenta com água salgada por uma pequena ligação. O mar Cáspio hoje está cerca de 28 metros abaixo do nível médio dos mares. Em 1980, para preservar o nível do mar Cáspio, que sofria com a diminuição do aporte de água após obras de irrigação na sua parte norte, os soviéticos fecharam a ligação entre o mar e o lago construindo uma barragem, imaginando que o nível de água se manteria no lago. Isto não ocorreu. Em 1983 com o contínuo processo de evaporação o lago Kara-Bogaz-Gol secou quase que por completo, figura 2.9a, causando graves problemas em regiões agrícolas com a exposição e dispersão do sal pelo vento. Em 1992, com o intuito de resolver estes problemas, a barragem foi removida e o lago voltou às suas características originais, figura 2.9b.



Figura 2.8 – Mapa global mostrando a localização do mar cáspio e do lago Kara-Bogaz-Gol. Fonte: Earth 3D Amazing Atlas.

Na América do Sul ocorrem espessas camadas de sal no Altiplano Andino, associadas às bacias sedimentares intramontanas, formada em regiões de convergência de placas tectônicas. Os salares de Atacama, no Chile, e de Uyuni, na Bolívia, são exemplos destas bacias, figura 2.10. A formação destes depósitos de evaporitos está associada ao ressecamento de um lago formado em grande altitude, na época da orogenia Andina. As grandes altitudes restringem a pluviosidade mantendo o clima desértico na região. A idade de formação destes depósitos é aceita como sendo Pleistoceno.

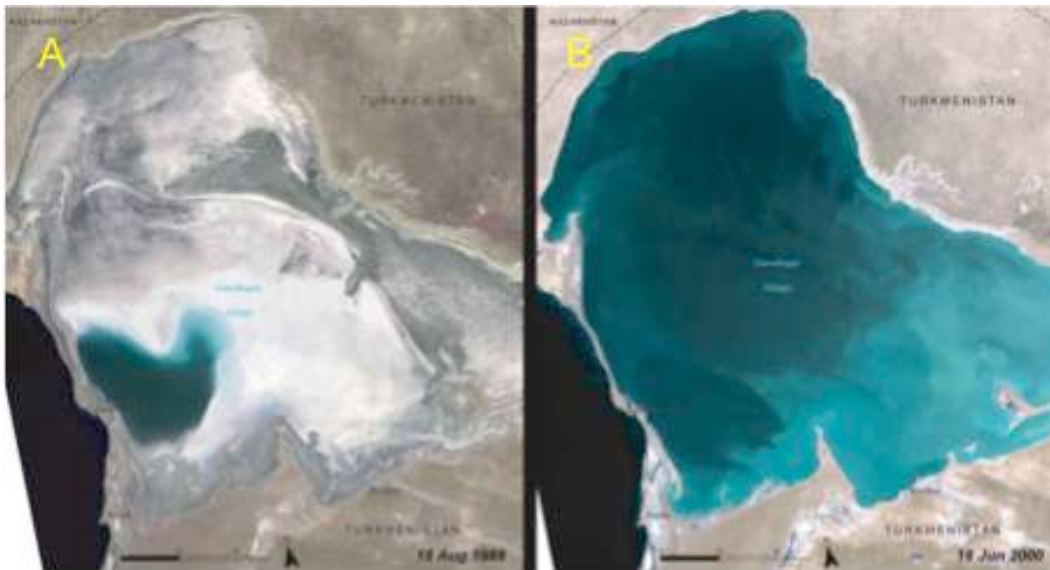


Figura 2.9 – Imagens de satélite mostrando o lago Kara-Bogaz-Gol cinco anos após o fechamento da ligação com o mar Cáspio (A) e oito anos após a reabertura do canal de ligação entre o mar e o lago (B). Fonte: USGS.



Figura 2.10 – Imagem de satélite mostrando o salar de Uyuni na Bolívia e o salar de Atacama, no Chile. Fonte: Google Earth.

2.5. Evaporitos no Brasil

Nas bacias sedimentares brasileiras, figura 2.11, foram identificados nove níveis de deposição evaporítica ao longo do registro geológico (Mohriak *et al.*, 2008):

- Rifeano/Vendiano – bacia do Parecis e possivelmente bacia do São Francisco;
- Permocarbonífero – bacia do Amazonas, do Solimões, do Parecis, do Parnaíba e do Paraná;
- Triássico/Jurássico – bacias do Tacutu, do Acre e de Parecis;
- Aptiano inferior – bacia Sergipe-Alagoas;
- Aptiano médio – bacia Sergipe-Alagoas. Denominado de sal tipo Paripueira;
- Aptiano superior – Distribuído em praticamente toda a costa leste brasileira, da bacia de Santos à bacia de Sergipe-Alagoas. Comumente chamado de sal tipo Ibura;
- Albiano – Ocorrências isoladas na costa leste brasileira;
- Cenomaniano/Turoniano – bacia Potiguar;
- Terciário – bacia de Campos e na margem equatorial brasileira entre as bacias de Pará/Maranhão e Foz do Amazonas.

O evento do fim do Proterozóico (Rifeano-Vendiano) é caracterizado mundialmente pela deposição de espessas camadas de evaporitos como, por exemplo, no Oriente Médio e na Índia. No Brasil ainda é pouco conhecido. No Permocarbonífero todas as bacias Paleozoicas brasileiras apresentam estas litologias na sua coluna estratigráfica. São nestas sequências de sulfetos que se desenvolve a indústria de exploração de gesso na bacia do Parnaíba. Mundialmente várias bacias evaporíticas foram depositadas nesta mesma época: Zechstein, no norte da Europa, *Permian Basin* no Texas/EUA, Volga-Urais e Sibéria Ocidental na Rússia. Todas relacionadas hoje em dia à grande produção de petróleo e mineração.

A sequência do Triássico/Jurássico, no contexto do megacontinente Gondwana, se entende do oeste deste continente até o norte em direção ao que é hoje a costa oeste canadense e o Mar do Norte.

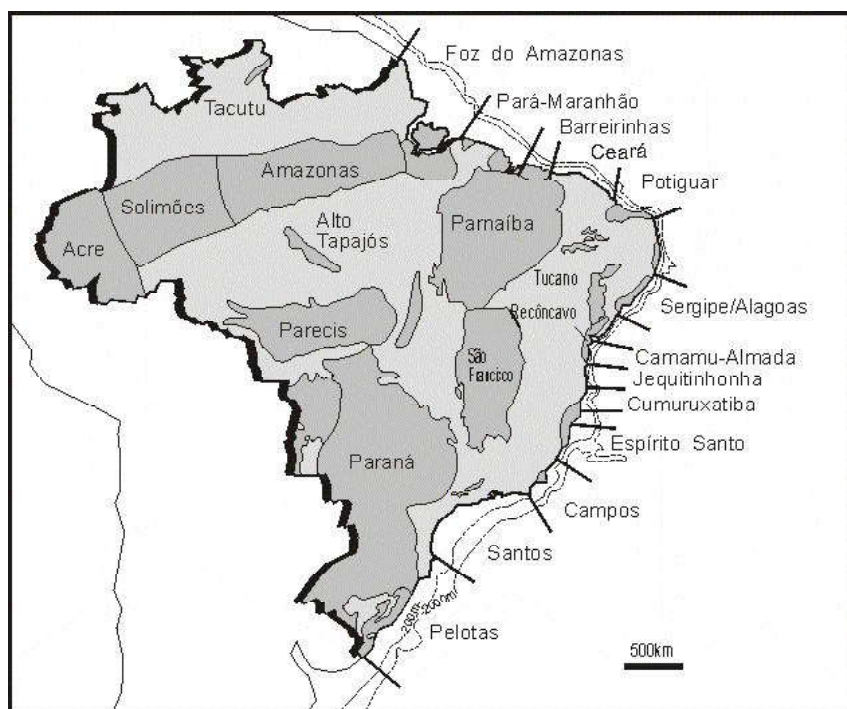


Figura 2.11 – Bacias sedimentares brasileiras, Milani *et al.* 2000.

As sequências depositadas no Aptiano estão relacionadas à abertura do Atlântico Sul e se desenvolveram em três níveis: Aptiano Inferior, Aptiano Médio e Aptiano Superior. Nos dois primeiros níveis a deposição foi restrita a pequenos grábens enquanto que no nível final os evaporitos tiveram grande deposição ao longo das bacias da margem leste brasileira. As halitas Paripueiras, relacionadas ao Aptiano Médio são exploradas na área de Maceió, Alagoas. No Aptiano Superior estão registradas grandes acumulações de sulfetos e cloretos no nordeste brasileiro. São em evaporitos desta idade que ocorre a mineração comercial de potássio da mina de Taquari-Vassouras em Sergipe, operada pela Vale S.A.. Foi desta região que foram recolhidas as amostras de evaporitos utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

Nas duas outras ocorrências do Cretáceo, Albiano e Cenomaniano/Turoniano, os depósitos de evaporitos não são muito espessos, típicos evaporitos de borda de bacia. Os evaporitos do Terciário são reportados como pequenos horizontes evaporíticos não muito desenvolvidos e isolados, em geral associados ao rebaixamento do nível do mar. No mundo estes evaporitos do Terciário tem importante papel no sistema petrolífero atuando como selos extremamente efetivos na Líbia, no Golfo de Suez e no Oriente Médio.

2.6.

A Mina de Taquari Vassouras

A mina subterrânea de Taquari-Vassouras localiza-se no município de Rosário do Catete, estado de Sergipe e é a única unidade produtora de potássio em funcionamento no Brasil. A Mina está localizada entre os campos petrolíferos de Carmópolis e Sirizinho. O potássio é extraído da silvinita, minério constituído por quantidades variáveis de silvita (KCl) e halita (NaCl). As reservas estimadas em 2010 são da ordem de 17 milhões de toneladas de K₂O equivalente e a produção de 418 mil toneladas de K₂O equivalente, o que faz o Brasil ocupar a 11^a colocação em termos de reserva e a 9^a posição em relação à produção mundial (tabela 2.3). No ano de 2010 a produção doméstica representou cerca de 11,6% do consumo interno (3.600 10³t K₂O), confirmando a posição do Brasil como grande consumidor e importador de potássio. O potássio é utilizado quase que totalmente na indústria de fertilizantes.

	Reservas (10 ³ t K ₂ O)	Produção (10 ³ t K ₂ O)	
	2010	2010	2009
Brasil	17.684	418	453
Canadá	4.400.000	9.500	4.320
Rússia	3.300.000	6.800	3.730
Bielorrússia	750.000	5.000	2.490
Alemanha	150.000	3.000	1.800
China	210.000	3.000	3.000
Outros países	397.000	5.702	5.049

Tabela 2.3 – Relação dos principais países produtores de potássio. Fonte: DNPM/SE

A silvinita é produzida em Sergipe em minas subterrâneas onde o material é minerado por abertura de galerias, no sistema tradicional de câmaras e pilares, por equipamentos do tipo *Marietta*, figura 2.12. A profundidade da mina está entre 430 a 640 metros. O minério é quebrado e depois transportado para o exterior da mina através de correias transportadoras. Na superfície o minério é beneficiado

pelo método de flotação, separando o KCl do NaCl. O cloreto de sódio é dissolvido e descartado no mar através de um salmouroduto.

Fonseca (1973) e Szatmari *et al.* (1974) dividem a sequência evaporítica em vários ciclos, em função da variação da salinidade. A concentração dos depósitos de silvita ocorrem no ciclo VII em camadas de 40 metros de espessura (Mohriak *et al.*, 2008).

Ainda em Sergipe são conhecidas grandes reservas de carnalita que, segundo estimativas, chegaria a 12,9 bilhões de toneladas (medida + indicada + inferida). Hoje esta área é foco de um projeto piloto de produção de carnalita por solução, como é feito na halita Paripueira em Maceió. Neste método a água é injetada sob pressão pelo tubo central do poço, direcionado para área não revestida de halita que se deseja minerar. O sal retorna dissolvido para a superfície pelo espaço anular do revestimento. O minério lavrado é comercializado sob a forma de salmoura saturada em NaCl diretamente para a indústria química.



Figura 2.12 – Minerador contínuo tipo *Marietta* utilizado na operação de desmonte nos painéis da lavra. A distância entre o topo e a base da galeria é de aproximadamente 3 metros.

3

Metodologia

Neste capítulo será descrita a metodologia experimental proposta de caracterização mineralógica, volumétrica e elástica para as amostras de evaporitos cedidas pelo corpo técnico da Companhia Vale do Rio Doce.

3.1.

Coleta, Preparo e Armazenamento das Amostras

O material analisado nesta dissertação foi cedido pelo corpo técnico da mina de potássio Taquari-Vassouras que hoje é operada pela Companhia Vale do Rio Doce (Vale S.A.), no estado de Sergipe. Parte das amostras é oriunda de um furo de sondagem sub-horizontal (amostras das classes A, B, C, D, E, F e G), enquanto outra parte vem de blocos de rochas retirados do interior da mina (amostras da classes H, I e J). As amostras da classe K pertencem a outro furo de sondagem não identificado que já se encontrava na pilha de material de descarte. A tabela 3.1 lista esta relação de origem. Por ser um furo sub-horizontal, paralelo à orientação das camadas, foi possível selecionar, na grande maioria, amostras com textura mais homogênea, evitando assim a presença de bandeamentos composicionais nas mesmas. A figura 3.1 mostra parte das amostras selecionadas na mina.

As amostras do furo de sondagem têm a forma cilíndrica com diâmetro externo próximo a 1 ½”, com pequenas variações que posteriormente precisaram ser ajustadas para a confecção dos corpos de prova utilizados no estudo. Para o comprimento tentou-se resguardar material suficiente para manter a relação 2:1 entre a altura e a base do corpo de prova. Foram seguidas as instruções da norma ASTM D4543-08 para preparação dos corpos de prova.

As amostras de mão, blocos de rocha, foram recolhidas no interior da mina e, diferente das amostras do furo sub-horizontal, precisaram ser preparadas através de ferramenta de perfuração rotativa. Foi utilizado óleo mineral como fluido de resfriamento da broca. Os corpos cilíndricos resultantes têm o diâmetro externo de 1 ½”, porém com comprimento inferior a 3”, não mantendo a relação 2:1.



Figura 3.1 – Fotografia de parte das amostras recolhidas na mina. Amostras cilíndricas do furo de sondagem sub-horizontal e amostras de mão (blocos).

As faces dos corpos cilíndricos resultantes foram cortadas a seco e posteriormente retificadas para garantir o perfeito paralelismo entre o topo e a base da amostra. A tabela 3.2 sumariza os parâmetros geométricos e a massa dos 33 corpos cilíndricos obtidos após a preparação das amostras. Estes serão os corpos de prova utilizados no desenvolvimento desta dissertação.

Classe	Distância da parede	Litologia
A	54 - 55 metros	Silvinita
B	55 - 56 metros	Silvinita
C	74 – 75 metros	Halita
D	90 – 91 metros	Halita
E	91 – 93 metros	Halita
F	194 – 195 metros	Halita
G	199 – 200 metros	Halita
H	Amostra de mão	Carnalita
I	Amostra de mão	Silvinita
J	Amostra de mão	Halita
K	Furo sub-horizontal	Halita

Tabela 3.1 – Relação de amostras coletadas na mina de Taquari-Vassouras.

Classe	Código	Comprimento	Diâmetro	Massa
		mm	mm	g
A	PE – A – 1	76,15	39,02	182,27
A	PE – A – 2	77,91	38,99	191,30
A	PE – A – 3	29,90	39,19	71,34
B	PE – B – 1	70,88	39,07	171,02
B	PE – B – 2	77,70	39,09	188,25
B	PE – B – 3	68,56	39,00	162,84
C	PE – C – 1	78,40	39,27	206,91
C	PE – C – 2	25,79	39,45	67,66
C	PE – C – 3	76,63	39,42	200,1
C	PE – C – 4	43,05	39,42	110,21
C	PE – C – 5	69,07	39,51	181,39
C	PE – C – 6	77,53	39,43	202,88
C	PE – C – 7	56,79	39,39	148,65
D	PE – D – 1	77,51	38,97	197,33
D	PE – D – 2	74,11	38,98	188,27
D	PE – D – 3	79,01	39,08	199,61
E	PE – E – 1	76,26	38,97	193,41
E	PE – E – 2	77,91	38,95	199,7
E	PE – E – 3	77,88	39,14	197,91
F	PE – F – 1	71,26	38,24	176,63
F	PE – F – 2	68,96	39,09	173,44
F	PE – F – 3	75,30	38,49	187,02
G	PE – G – 1	78,08	38,89	198,55
G	PE – G – 2	79,61	38,67	198,88
G	PE – G – 3	73,29	38,85	185,70
G	PE – G – 4	77,24	38,81	195,74
H	PE – H – 1	22,39	37,43	39,09
I	PE – I – 1	55,49	37,78	128,17
J	PE – J – 1	34,36	37,61	81,43
J	PE – J – 2	56,73	37,86	137,61
K	PE – K – 1	75,21	39,92	199,89
K	PE – K – 2	77,18	39,89	205,73
K	PE – K – 3	78,46	39,90	209,80

Tabela 3.2 – Relação dos corpos de prova utilizados nas análises desta dissertação.

Os minerais evaporíticos são altamente higroscópicos, ou seja, possuem a propriedade de absorver água. Quando o grau de absorção de água é elevado o mineral começa a se dissolver na própria água absorvida. Este processo é mais efetivo nos minerais carnalita e taquidrita. Desta maneira é importante acondicionar os corpos de prova em um ambiente de baixa, ou quase nula, umidade.

O processo de armazenamento das amostras consistiu em envolver cada um dos cilindros em papel filme do tipo PVC e posteriormente acondiciona-los em um dessecador a vácuo com base de polipropileno sobre um recipiente onde se era acondicionada sílica gel para absorver a umidade. A amostra era pesada antes de cada ensaio a fim de se verificar a mudança do material. Após o ensaio a amostra era novamente pesada, envolvida em filme PVC e acondicionada no dessecador a vácuo. A figura 3.2 ilustra o dessecador utilizado aberto.



Figura 3.2 – Dessecador a vácuo. Nesta fotografia podemos identificar as amostras envolvidas em filme plástico do tipo PVC acondicionadas no dessecador a vácuo.

3.2. Caracterização Mineralógica

A correta caracterização mineralógica do material analisado é fundamental para o desenvolvimento desta dissertação. Todos os resultados obtidos foram correlacionados diretamente com a composição mineral.

As amostras foram inicialmente descritas macroscopicamente a olho nu e em lupa binocular. Em alguns casos foram descritas microscopicamente através de lâmina delgada e microscópio eletrônico de varredura (MEV). A informação da composição química vem da espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e da análise da radioatividade natural das amostras (*Spectral Core gamma*)

3.2.1. Descrição Macroscópica

Na descrição de um mineral ou rocha evaporítica alguns parâmetros são importantes na identificação. A composição predominante e a presença de outros minerais auxiliam na definição de pureza do mesmo. A cor e a tonalidade ajudam a definir alguns tipos de minerais. A propriedade relacionada à passagem de luz pelo corpo (translucidez) muitas vezes se relaciona ao tamanho do cristal, onde amostras com cristais muito finos (<1mm) tendem a apresentar baixa translucidez, comportamento opaco, quando comparadas com amostras com maiores tamanhos de cristais. Por fim a textura observada em amostra de mão pode ser diretamente relacionada ao ambiente de formação da rocha evaporítica.

3.2.2. Lâmina Delgada

A confecção de lâmina delgada em amostras de evaporitos é extremamente complexa, muitas das vezes totalmente manual. O resfriamento e lubrificação da máquina de polimento devem ser feito com óleo mineral e ao final do processo a lamínula vítrea que recobre a lâmina deve ter suas arestas recobertas com resina a fim de isolar o mineral da umidade externa. Na figura 3.3 estão representadas quatro lâminas delgadas de amostras de silvinita (silvita + halita). A coloração vermelha está relacionada à grande quantidade de óxido de ferro presente.

A interpretação mineralógica destas lâminas também se mostra bastante complexa frente às propriedades cristalográficas dos principais minerais evaporíticos, vide tabela 3.3. Em lâmina delgada, com os polarizadores do microscópio petrográfico de luz transmitida em paralelo, os minerais evaporíticos descritos na tabela 3.3 são em geral translúcidos e transparentes, dificultando a sua caracterização. A halita e a silvita, por serem cúbicas, apresentam ainda a

característica de isotropia com os polarizadores cruzados aparecendo sempre em extinção, o que muitas vezes pode ser confundido com vazios na lâmina.

Como solução alguns autores, Schoenherr *et al.* (2007) e Urai *et al.* (1987), sugerem irradiar as amostras com raios gama em temperaturas de 120°C por períodos de até 3 meses. Esta técnica é muito utilizada para o estudo da microestrutura do sistema cristalino, figura 3.4. Outra opção, Mohriak *et al.* (2008), consiste em utilizar uma placa de gipso ou de quartzo para repolarizar o cristal e com isso modificar o padrão extinção total esperado. Esta técnica foi aplicada na descrição de uma lâmina delgada de silvinita, figura 3.5. Os cristais de halita aparecem na cor púrpura claro e os de silvita na cor púrpura escuro.

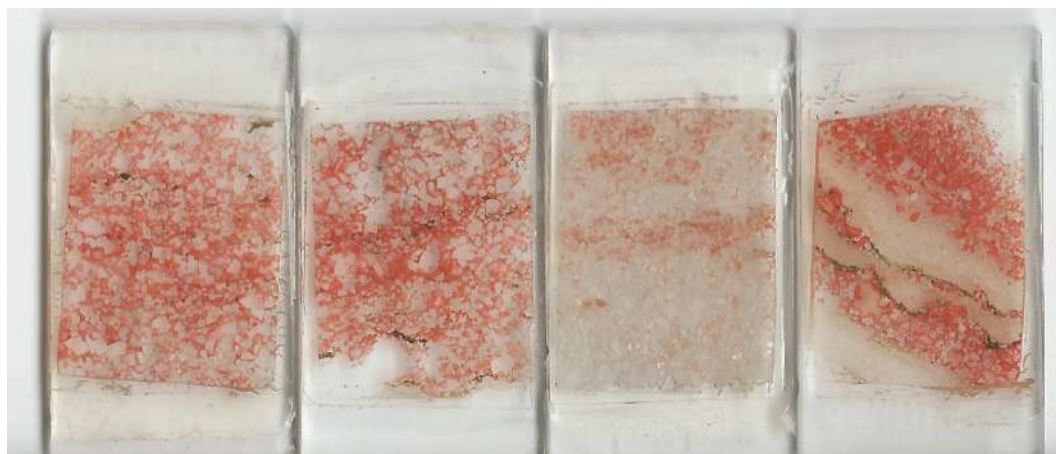


Figura 3.3 – Lâminas delgadas de silvinita (silvita + halita). A coloração vermelha se deve a grande quantidade de óxido de ferro.

Mineral	Composição química	Sistema cristalino
Halita	NaCl	Cúbico
Silvita	KCl	Cúbico
Anidrita	CaSO ₄	Ortorrômico
Carnalita	KMgCl ₃ •6H ₂ O	Ortorrômico
Taquidrita	CaMg ₂ Cl ₆ •12H ₂ O	Hexagonal

Tabela 3.3 – Propriedades cristalográficas dos principais minerais evaporíticos.

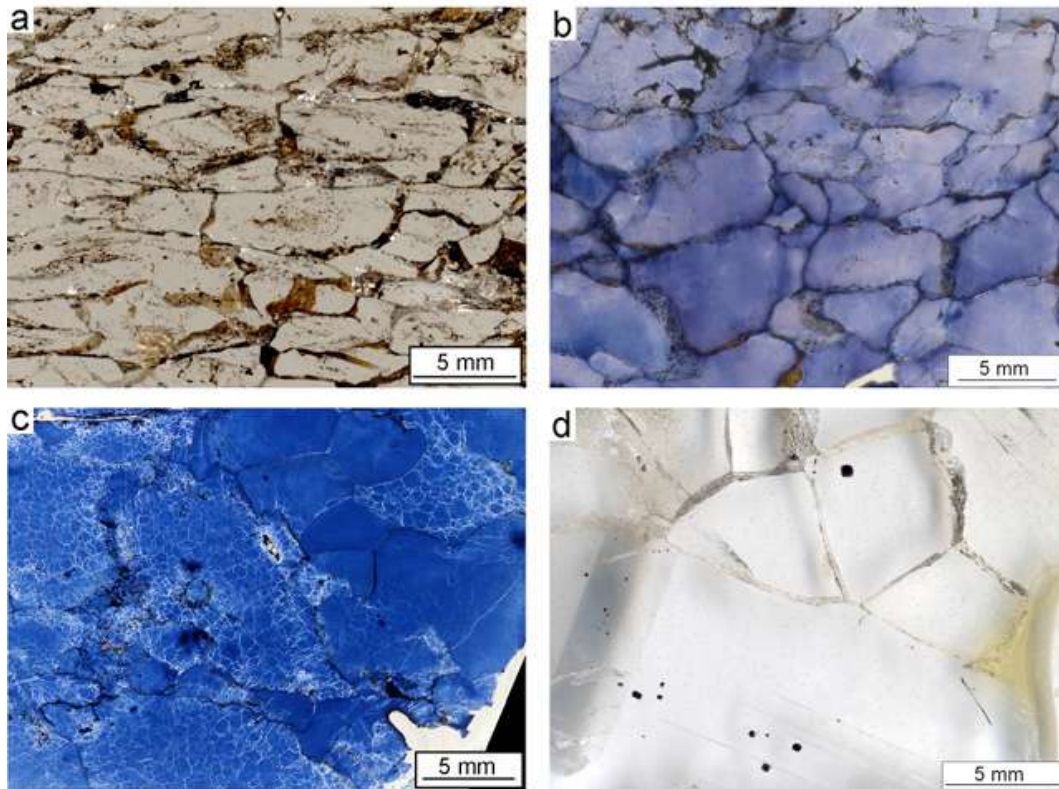


Figura 3.4 – Irradiação de amostras de halita por raios gama. As imagens **b** e **c** são de amostras que passaram pelo processo de irradiação, coloração azul característica. Notar em **c** a microestruturação dos cristais de halita que só fica aparente após a irradiação. Schoenherr *et al.* (2007)

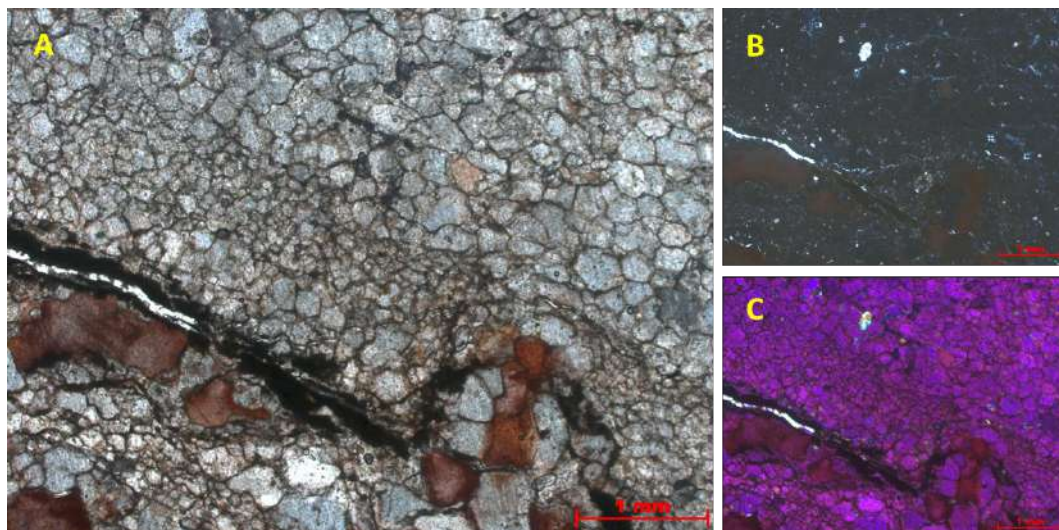


Figura 3.5 – Amostra de silvinita fotografada em microscópio petrográfico de luz transmitida. Em A com os polarizadores em paralelo. Em B com os polarizadores cruzados, mostrando a extinção completa esperada em materiais isotrópicos. Em C com polarizadores cruzados e com placa de quartzo.

Entretanto, frente à dificuldade no preparo e interpretação de lâminas delgadas de evaporitos, aliado ao excelente resultado obtido nas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), optou-se por não utilizar esta técnica na caracterização mineralógica do material analisado.

3.2.3.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

Durante o processo de faceamento dos corpos de prova foram separados 11 cilindros de 1 ½” de diâmetro e cerca de 1cm de altura, um para cada uma das classes definidas na tabela 3.1. Posteriormente estas amostras tiveram uma das faces recobertas por uma delgada camada condutora de carbono através do metalizador Emitech K950x. Em seguida foram analisadas usando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo ZEISS EVO 40 no laboratório de microscopia eletrônica do Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), em imagens por elétrons retroespalhados, operando em alto vácuo.

A imagem por elétrons retroespalhados (*Backscattering Electron Image*) representa em sua escala de cinza a variação da composição média analisada, onde materiais de peso atômico maior produzirão imagens mais claras, enquanto materiais de baixo peso atômico produzirão imagens escuras.

As microanálises de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram obtidas através do sistema de microanálises OXFORD Inca, acoplado ao MEV.

A excelente resolução alcançada pelo MEV, vide figura 3.6, associada aos resultados de composição elementar do EDS, permitiu a sua definição como principal método a ser utilizado na caracterização mineralógica dos materiais analisados nesta dissertação.

3.2.4.

Análise da radioatividade natural (Spectral Core Gamma)

O equipamento utilizado nesta análise é o modelo *Core Gamma Spectral Gamma Logger* do fabricante *Core Laboratories Instruments*, figura 3.7. A calibração das emissões se processa através da emissão de uma fonte padrão de aferição do isótopo radioativo Cs-137. Esta ferramenta é utilizada na análise de rotina de caracterização de testemunhos retirados de poços de petróleo. Ela mede

basicamente a radioatividade natural da rocha. Em geral a sua aplicação está relacionada ao auxílio no correto posicionamento do corpo de rocha analisado, correlacionando os dados obtidos na análise com o perfil de raios gama corrido no poço.

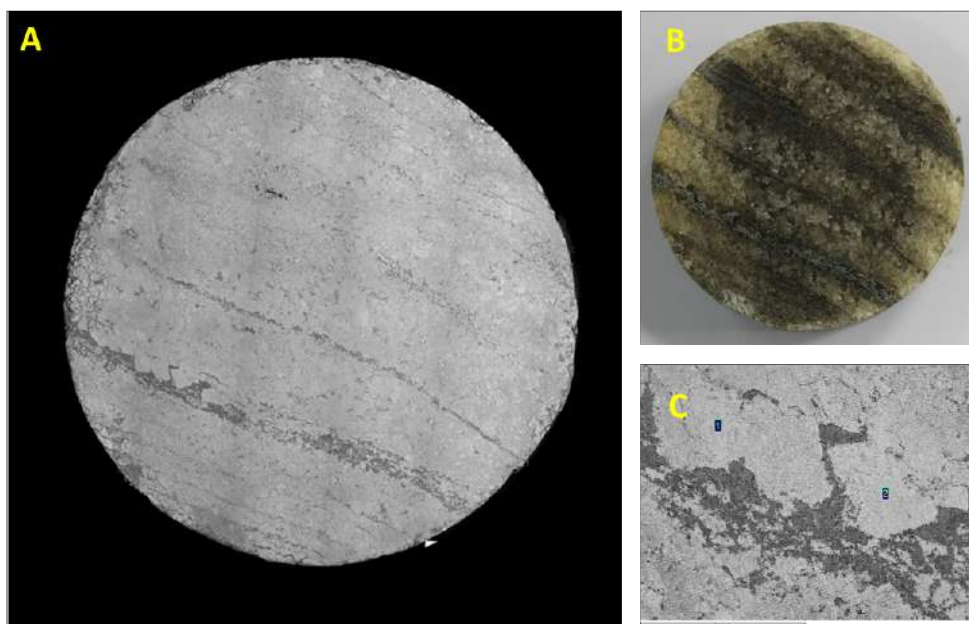


Figura 3.6 – Em A, mosaico formado por imagens ao MEV por elétrons retroespalhados; Em B, fotografia da amostra de halita com argila; Em C, detalhe da imagem A.

Este equipamento, chamado de *spectral core gamma*, é capaz de identificar a contribuição de cada um dos elementos radioativos que decaem naturalmente: isótopo radioativo do potássio (K^{40}), urânio (U) e tório (Th). Nas amostras de evaporitos o isótopo radioativo do potássio é o principal emissor de raios gama natural. O decaimento do K^{40} é acompanhado pela emissão de um raio gama simples com energia de 1,46 MeV. Desta maneira as rochas com os minerais silvita e carnalita, vide tabela 3.3, devem apresentar alta contagem em unidades API.

Durante a análise, as amostras de mesma classe foram acondicionadas em caixas de armazenamento de testemunho seguindo a ordem da tabela 3.1. Cada classe era separada por um cilindro de borracha nitrílica a fim de reduzir a influência entre as classes vizinhas. Foram utilizadas quatro caixas no total. O resultado da análise são os valores de U, Th, K^{40} e gama total, na forma de um perfil contínuo com intervalo de amostragem de 2cm.



Figura 3.7 – Equipamento de análise da radioatividade natural da unidade de operação do Espírito Santo - Petrobras/UO-ES, (*Core Gamma Spectral Gamma Logger, Core Laboratories Instruments*).

3.3. Caracterização Volumétrica

Esta etapa é de suma importância na interpretação dos resultados, auxiliando na definição volumétrica de cada uma das fases minerais presentes na rocha evaporítica. Foram utilizadas análises de microtomografia de raios X e análises de massa específica de grão.

3.3.1. Microtomografia de Raios X

A tomografia de raios X com propósitos médicos se desenvolveu rapidamente após sua invenção por G. Hounsfield no início dos anos de 1970, Zinszner e Pellerin (2007). Os autores citam ainda o início da aplicação nas geociências nos anos de 1980. Hoje em dia esta técnica, não destrutiva, é usada rotineiramente na análise de rochas.

Para esta análise foi utilizado um microtomógrafo modelo V tome XL300 da marca GE/Phoenix, figura 3.8. O princípio básico do equipamento está relacionado à atenuação dos raios X durante a propagação na amostra, entre a fonte e os receptores. A fim de se reconstruir o sólido em três dimensões, a amostra é rotacionada em torno de seu eixo longitudinal, mantendo a fonte e os receptores fixos. A este processo se dá o nome de reconstrução tomográfica, onde a unidade de medida, radiodensidade ou transparência aos raios X, é o Hounsfield, figura 3.9. No caso de um tomógrafo médico, é o par fonte-receptor que se desloca ao redor do objeto a ser analisado.



Figura 3.8 – Microtomógrafo modelo V tome XL300 (GE/Phoenix). IRF/Laboratório de Tomografia do CENPES.

Após a aquisição da imagem ocorre a etapa de processamento. Filtros de condicionamento e melhora de sinal são aplicados a fim de eliminar os ruídos de aquisição. Ao final do condicionamento cada voxel da imagem em três dimensões tem a densidade de 16 bits, ou seja, 65536 valores possíveis.

O processo seguinte é denominado binarização da imagem, usando o conceito de limiar (*threshold*), onde em análises de rochas reservatórios se tenta separar o grão e o espaço poroso, transformando os 65536 valores em dois ou três valores possíveis. Três valores no caso de se separar duas fases minerais, por exemplo, calcita e dolomita, e o espaço poroso. Fernandes *et al.* (2011), apresentam em seu artigo um interessante exemplo ilustrativo do processo de binarização, figura 3.10.

Para esta dissertação a microtomografia tem como objetivo separar as fases minerais halita e silvita em amostras de silvinita, resultando num valor quantitativo da distribuição volumétrica de cada um destes dois minerais no corpo de prova.

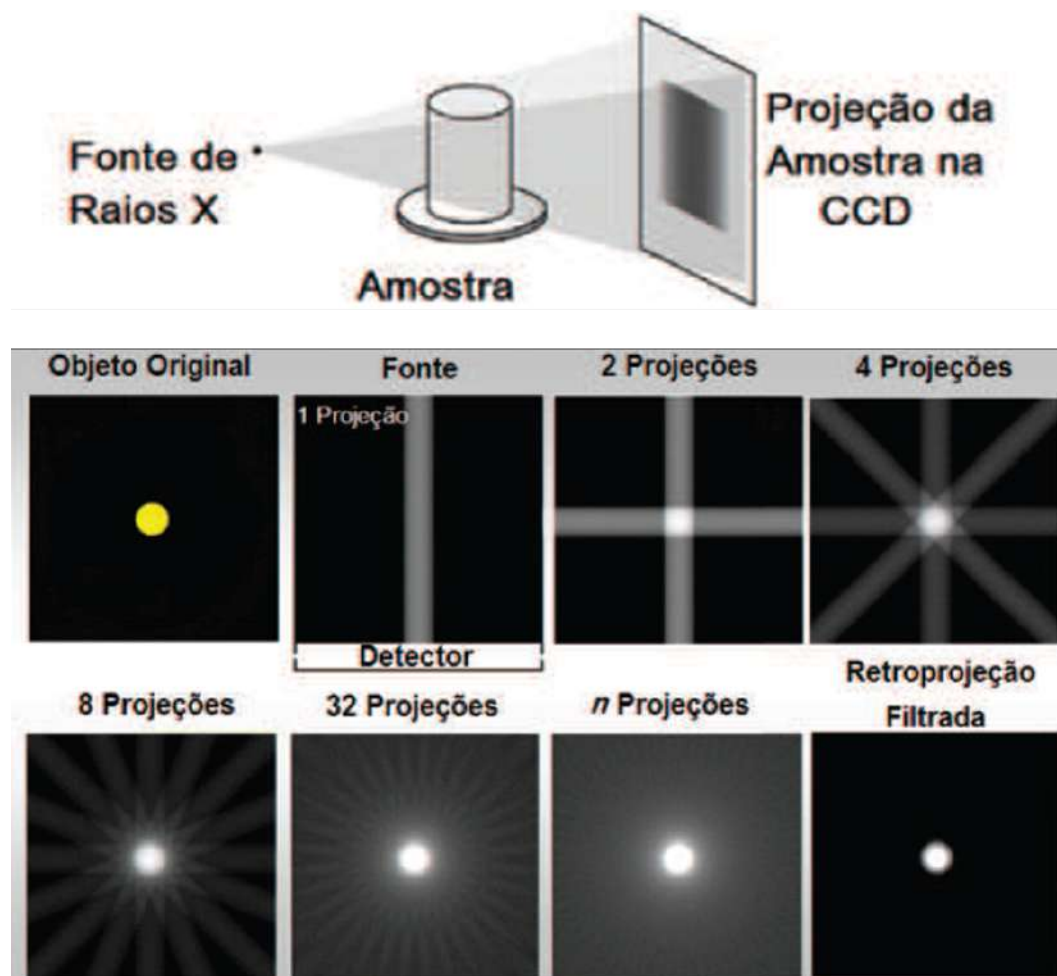


Figura 3.9 – Na figura superior está ilustrado o esquema de processo de projeção de imagem microtomográfica de raios X. Na figura inferior, desenho esquemático da reconstrução de imagens a partir de projeções, Fernandes *et al.* (2011)

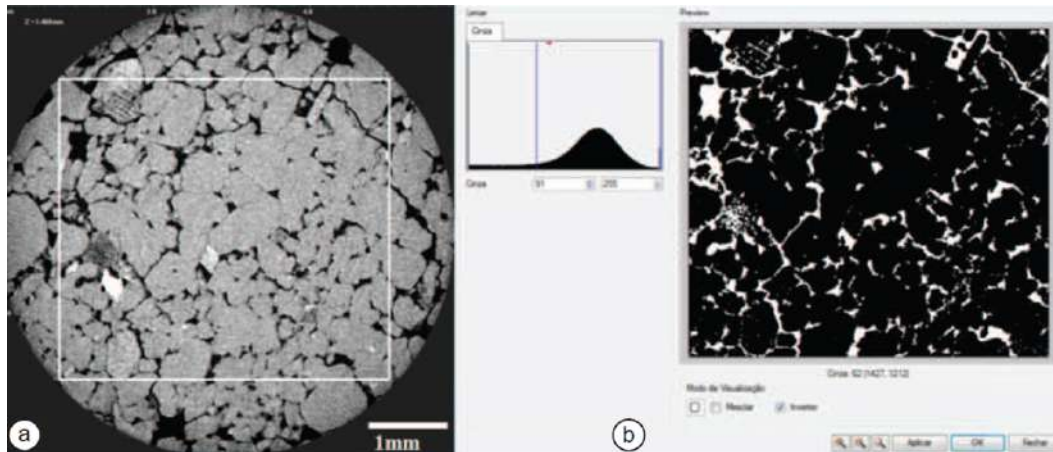


Figura 3.10 – Processo de binarização de uma amostra. (a) Seção 2D e (b) seção binarizada da região definida pelo polígono em (a). Ao centro o histograma de valores médios de radiodensidade, onde se definiu o limiar entre grão e poro (linha azul). Fernandes *et al.* (2011).

3.3.2. Massa Específica do grão (Densidade do grão)

Para estas análises foi utilizado um permo-porosímetro a hélio modelo DV-4000 fabricado pela *Weatherford laboratories*, figura 3.11. O método se baseia na lei de Boyle-Marriote utilizando o gás hélio para determinar o volume dos grãos, equação 3.1 (Zinszner e Pellerin, 2007).

$$P V = n r T \quad (3.1)$$

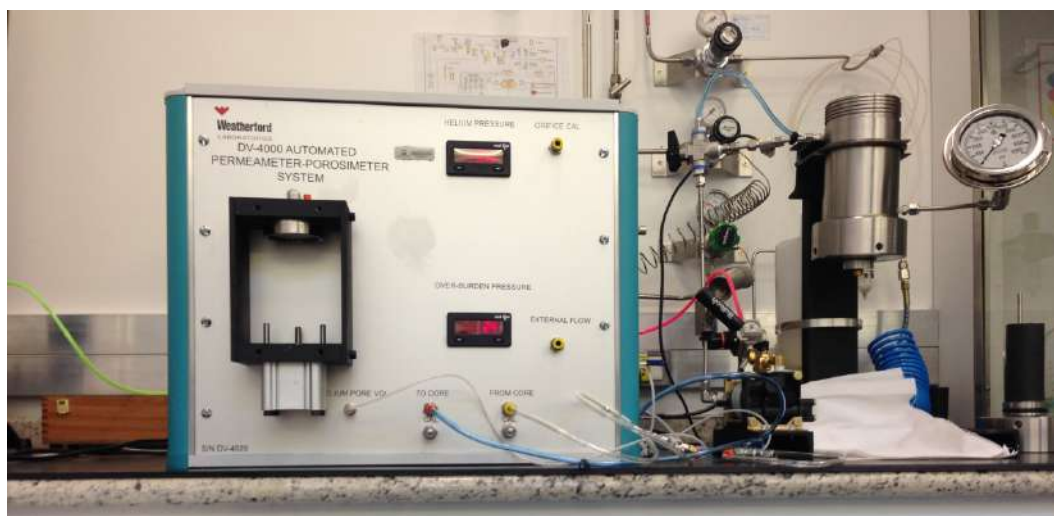


Figura 3.11 - Permo-porosímetro à hélio DV-4000 (*Weatherford laboratories*).

No processo de calibração do equipamento se utiliza o gás hélio numa pressão inicial de 98 psia para definir a relação inicial entre a pressão e o volume de um recipiente metálico conhecido em uma dada temperatura. Para tal se usam cilindros de volume calibrado, figura 3.12. Posteriormente o corpo de prova cilíndrico é acondicionado neste mesmo recipiente junto com os cilindros calibrados definidas pelo *software* de processamento no intuito de diminuir o espaço vazio, melhorando a precisão do método. No passo seguinte é aplicada uma pressão inicial de 98 psia de hélio, a mesma do processo de calibração, no conjunto recipiente-amostra-bilhas. Transdutores de pressão monitoram a variação da pressão por um período previamente definido pelo usuário, neste caso 10 segundos. A pressão se mantendo constante por este intervalo de tempo o ensaio é encerrado. Usando a equação 3.2 pode se calcular o volume dos sólidos.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} \frac{T_2}{P_2} = V_2 \quad \text{para } T_1 = T_2$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} \quad (3.2)$$

De posse do volume calculado e da massa medida em balança com duas casas decimais de precisão se obtém o valor da massa específica dos grãos pela divisão simples da massa pelo volume. Sabendo que cada um dos minerais evaporíticos tem um valor típico de massa específica do grão é possível calcular o volume de cada uma das fases identificadas no corpo de prova usando uma relação linear como a da equação 3.3, para o caso de mistura de dois minerais (balanço de massa).

$$Rho_g = \frac{\%A}{100} \times Rho_A + \frac{(100 - \%A)}{100} \times Rho_B \quad (3.3)$$

$$\%A = 100 \times \frac{Rho_g - Rho_b}{Rho_a - Rho_b}$$

$$\%B = 100 - \%A$$



Figura 3.12 – Amostra de sal, recipiente de volume conhecido e os cilindros calibrados, utilizados na medida de massa específica do grão.

O valor da massa específica de grão por este método é bem mais preciso e apresenta melhor correlação que o cálculo da massa específica aparente seca. Mesmo assumindo a baixa porosidade das amostras de evaporitos.

Para o cálculo da massa específica aparente seca assumimos a forma ideal de um cilindro para o corpo de prova a fim de calcularmos o seu volume. A divisão da massa medida pelo volume calculado resulta na massa específica aparente seca. No entanto as amostras de rocha evaporítica, principalmente os sais mais higroscópicos como a carnalita e a taquidrita, tendem a apresentar forma bem distinta da figura geométrica cilíndrica, como podemos verificar na figura 3.13.

Desta forma, em geral, subestimamos o valor da massa específica aparente seca por utilizar um volume maior do que o ocupado pela rocha. A fim de minimizar este efeito o comprimento e o diâmetro da amostra são tomados em cinco pontos distintos do corpo de prova, no intuito que a média destes valores resulte num valor de volume mais apropriado.

Mesmo sabendo desta limitação foram calculadas as porosidades das amostras que passaram pela análise de massa específica de grão usando a equação 3.4.

$$porosidade = \frac{V_c - V_s}{V_c} \quad (3.4)$$

Onde o volume do cilindro (V_c) é calculado considerando a altura e diâmetro da amostra e o volume dos sólidos (V_s) é obtido na análise da massa específica dos grãos.

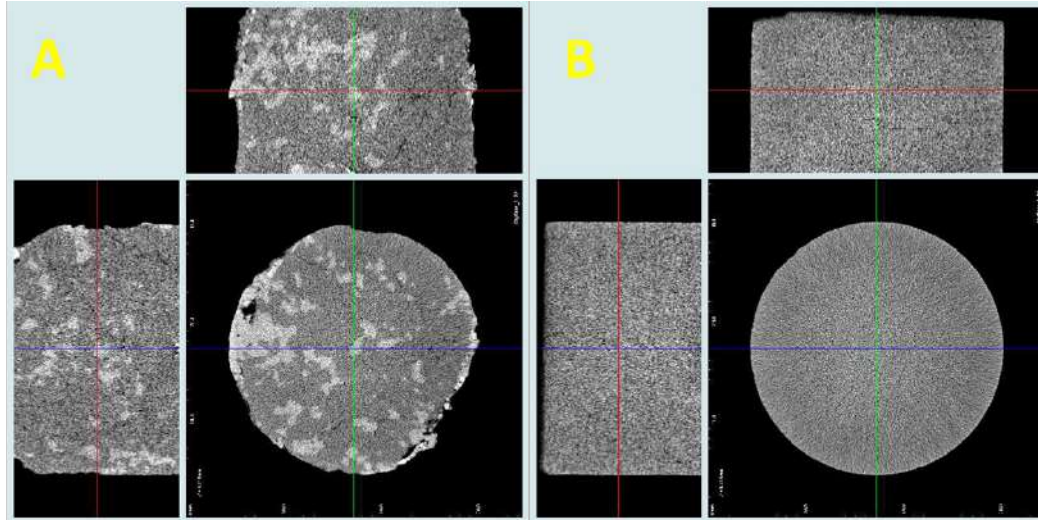


Figura 3.13 – Tomografia de raios x em duas amostras de evaporitos: A) amostra de carnalita e em B) amostra de halita. Podemos notar que a amostra de carnalita sofre mais com a dissolução devida à umidade do ambiente.

3.4. Caracterização Elástica

O principal resultado analítico desta dissertação são os módulos elásticos. A caracterização elástica dos corpos de prova de rochas evaporíticas foi realizada seguindo o método dinâmico, propagação de pulso ultrassônico, e estático, ensaio de compressão triaxial. Ao final é feita a comparação entre os dois resultados.

3.4.1. Método Dinâmico – Ensaio de Velocidades Elásticas

O sistema de medidas de velocidades elásticas utilizado nesta análise consiste basicamente em uma parte eletrônica e outra hidráulica, como ilustrado na figura 3.14. Este método segue os padrões estabelecidos pela norma ASTM D2845-08.

Na parte eletrônica tem-se um gerador de funções e um amplificador de potência que fornecem um sinal bem conhecido para um transdutor piezelétrico de

material cerâmico. O transdutor transforma o sinal eletrônico em uma vibração mecânica, compressional ou cisalhante, conforme o caso. Após percorrer a amostra de rocha, a vibração mecânica é recebida por outro transdutor, que a converte em sinal elétrico. O sinal eletrônico do receptor é analisado em um osciloscópio após passar por um amplificador, caso necessário. As formas de onda são armazenadas em computador para análises posteriores.

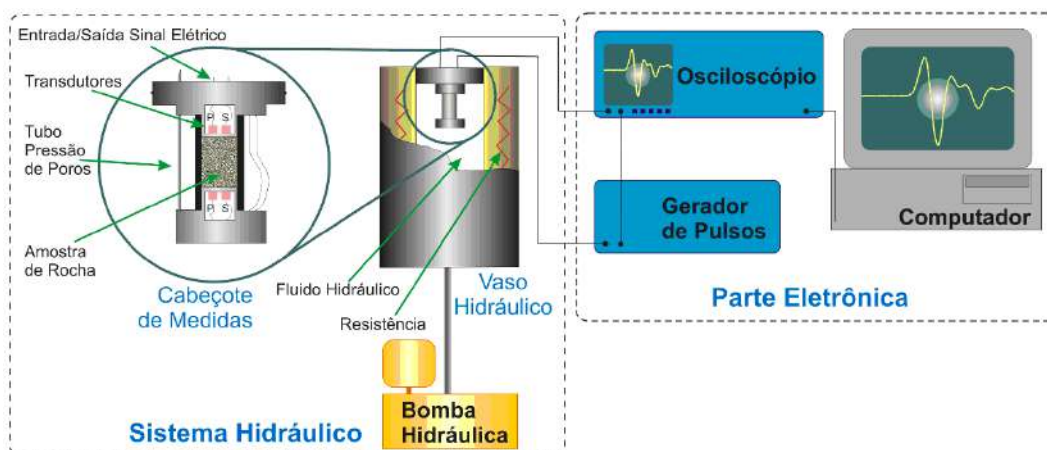


Figura 3.14 – Esquema ilustrativo do sistema de medidas de velocidades elásticas em amostras de rochas. Vasquez et al. (2010).

A parte hidráulica do sistema consiste num vaso hidráulico em cujo flange é montado o cabeçote de medida. A amostra é inserida entre os transdutores emissor e receptor, que se encontram dentro de cabeçotes metálicos no intuito de isolá-los hidráulica e eletricamente. Este vaso é equipado ainda com uma resistência elétrica que permite o aquecimento da amostra para realização de ensaios a temperaturas controladas. A figura 3.15 ilustra a configuração de montagem do corpo de prova no cabeçote de medida, utiliza-se material termo-retrátil ou borracha nitrílica para separar a amostra do fluido confiante. Para estas análises foi utilizado mel como fluido acoplante, inserido entre o topo e a base da amostra e o cabeçote metálico a fim de melhorar o sinal de saída.

Os ensaios aqui reportados foram realizados com um cabeçote de medida do equipamento Autolab 500 da empresa *New England Research*, que contém três transdutores cilíndricos que geram, separadamente, uma onda compressional (P) e duas ondas cisalhantes ortogonalmente polarizadas (S1 e S2), conforme ilustrado

na fotografia da Figura 3.16. A frequência natural destes transdutores é de 700 kHz.

O sistema conta também com dispositivos para imposição de pressão de poros e pressão de confinamento, permitindo assim a simulação completa de condições hidrostáticas de reservatório. Uma vez que, como boa aproximação, as velocidades dependem apenas da pressão efetiva (diferença entre pressão de confinamento e pressão de poros), os ensaios aqui registrados foram realizados em amostras secas e pressão de poros aberta à pressão atmosférica.



Figura 3.15 – Amostra ajustada ao cabeçote de medida preparada para análise. Neste caso foi utilizado material termo-retrátil para isolar a amostra do fluido confinante.

As velocidades de propagação das ondas elásticas nas rochas são calculadas dividindo-se o comprimento da amostra, dx , pelo tempo dt efetivamente gasto pela onda para percorrer a amostra, equação 3.5

$$Velocidade = \frac{dx}{dt} \quad (3.5)$$

Conforme ilustrado na figura 3.17, o tempo de trânsito da onda na amostra é igual ao tempo observado no osciloscópio diminuído do tempo do sistema ou tempo de atraso t_0 (intrínseco ao sistema de medida), que é o tempo gasto pelo sinal na parte eletrônica e nos cabeçotes metálicos, sem nenhuma amostra inserida entre os mesmos: $dt = t - t_0$

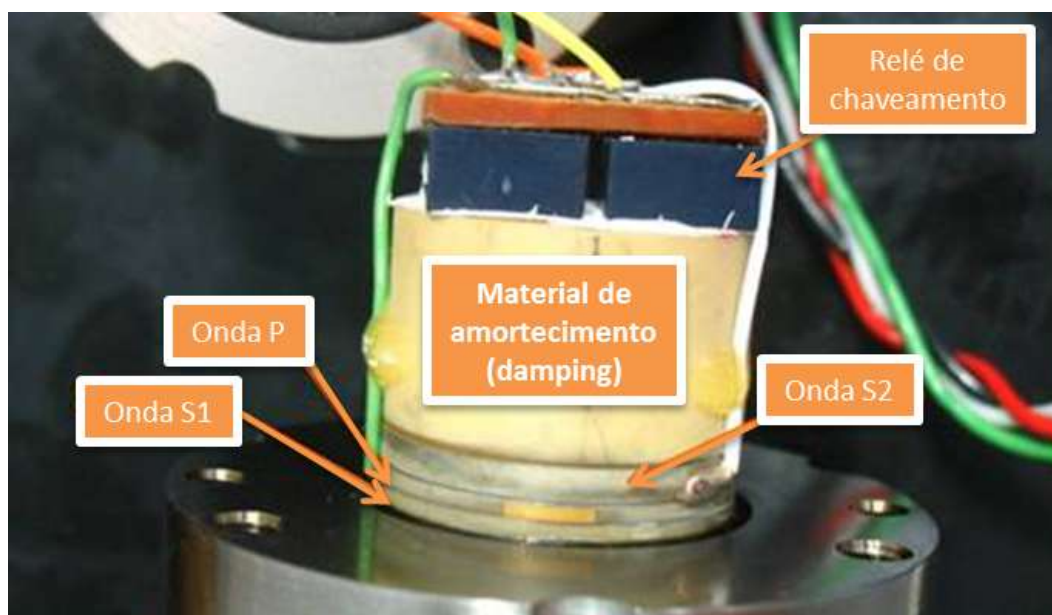


Figura 3.16 – Fotografia de detalhe do conjunto de cristais piezelétricos.

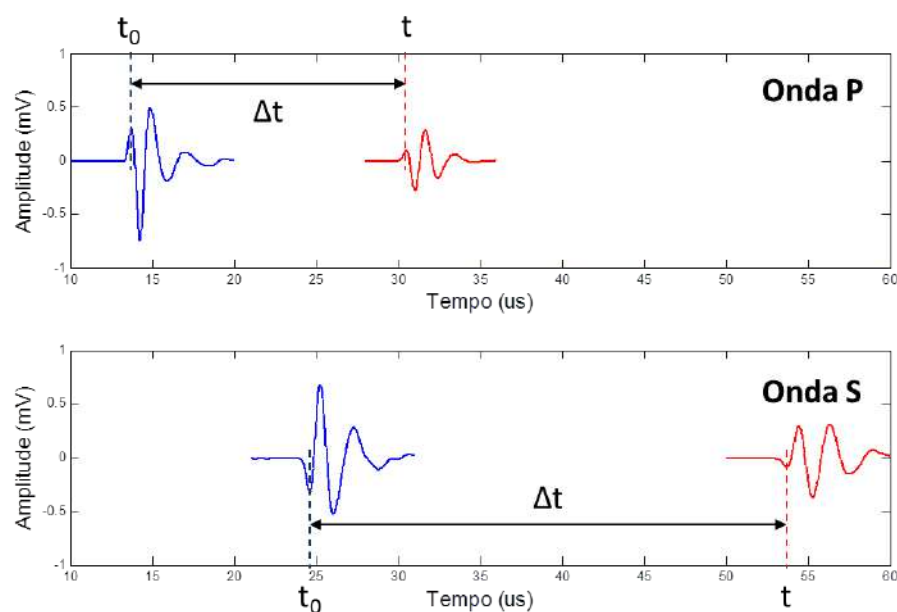


Figura 3.17 – Formas de onda compressional (acima) e de cisalhamento (abaixo), mostrando a correlação do sinal do tempo de sistema (curva azul) e o sinal da amostra (curva vermelha). Morschbacher *et al.* (2010).

Neste estudo assumimos para o tempo de trânsito o tempo do primeiro pico (ou vale) após a primeira quebra. Apesar de alguns autores afirmarem que a primeira quebra é a “metodologia mais correta”, em Morschbacher *et al.* (2010)

mostra-se que a estimativa do tempo de trânsito da onda através da picagem dos tempos no primeiro pico ou vale da onda gera resultados mais próximos da velocidade de fase estimada através da análise de Fourier das formas de onda. Considerando-se as incertezas nas medidas de tempo e comprimento, a incerteza na determinação de velocidades varia de 1% a 2%, podendo chegar a 5% em casos de amostras mal consolidadas, com fraturas ou muito heterogêneas, apresentando nestes casos formas de onda pouco definidas.

As velocidades foram medidas a pressões de confinamento de 500 a 5000 psi, adquiridas em intervalos de 500 psi, na trajetória ascendente e descendente de pressão confinante.

3.4.2. Método Estático – Ensaio Triaxial

Para a análise dos parâmetros elásticos por método estático foi utilizada uma célula triaxial cilíndrica axissimétrica, $\sigma_2 = \sigma_3$, modelo RTR-1500 desenvolvida pela empresa GCTS (*Geotechnical Consulting & Testing Systems*), figura 3.18. O software de controle do ensaio triaxial utilizado foi o *CATS Triaxial Test Mode 1.85 For Rocks*. Para a medição do deslocamento foram utilizados dois sensores do tipo lvdt (*linear variable differential transformer*) para a direção axial e um sensor circunferencial para a direção radial, figuras 3.18 e 3.19.



Figura 3.18 – Célula triaxial cilíndrica axissimétrica RTR-1500 (*rapid rock triaxial system*) desenvolvida pela empresa GCTS. Na fotografia da direita podemos observar uma amostra com a instrumentação de deformação instalada.

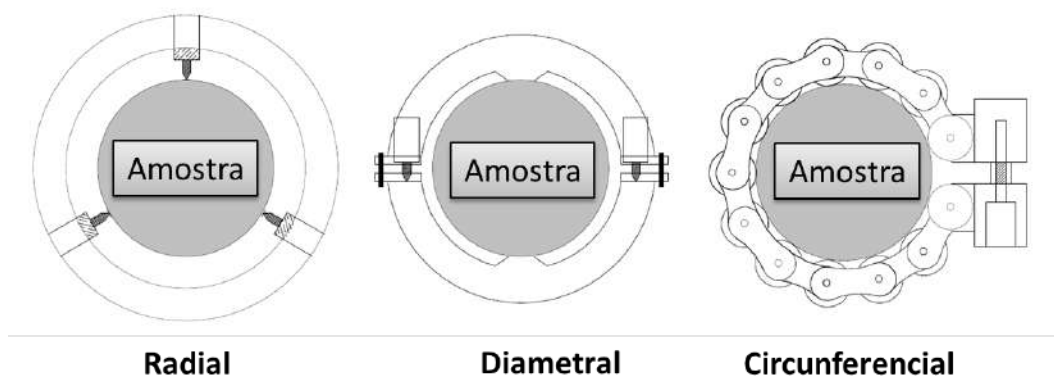


Figura 3.19 – Sistemas típicos de medição de deformação lateral. No equipamento RTR-1500 o sistema utilizado é o circunferencial.

O equipamento apresenta alta rigidez mecânica (1750 kN/mm) e capacidade de carga de 1500 kN. Intensificadores servo controlados de pressão podem confinar o sistema ou aplicar pressão de poros até 140 MPa.

Para os ensaios de compressão triaxial foram seguidas as recomendações estabelecidas na norma ASTM 7012-13, método B. Entretanto para este tipo de material, rochas evaporíticas, dentro do próprio escopo da norma (item 1.4) é feito um comentário sobre os problemas de deformação inelástica inerentes a este tipo de material. Como solução é sugerido que o módulo elástico seja obtido em ciclos de descarregamento-carregamento, método que não é discutido nesta norma técnica. Desta maneira parametrizamos os ensaios de compressão em duas etapas: ciclo hidrostático, com tensão desviadora constante de 2 MPa para garantir o acoplamento da amostra, e ciclo triaxial, com tensão desviadora variante com o tempo, como ilustrado na figura 3.20.

No ciclo hidrostático, onde $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, é feito um carregamento inicial da amostra até 35 MPa seguido de um ciclo de descarregamento e carregamento. Neste trecho é calculado o módulo de compressão volumétrica (K), inverso da compressibilidade, que tem relação direta com os ensaios dinâmicos discutidos no tópico anterior. O carregamento hidrostático foi feito com controle de tensão à taxa constante de 0,1 MPa/s.

O ciclo triaxial segue-se logo após o último carregamento hidrostático, mantendo a pressão confinante em 35 MPa. São feitos vários ciclos de carregamento e descarregamento ao longo do aumento da tensão desviadora a fim

de calcular o módulo de Young e a razão de Poisson em diferentes estados de tensão. Neste ciclo foram feitas análises com controle de tensão e com controle de deformação axial, onde este último mostrou melhores resultados frente ao fenômeno de fluência natural do material. Por este motivo também foi retirada a etapa de estabilização após o ciclo hidrostático, normalmente aplicada em ensaios triaxiais em rochas. Foram realizadas análises com diferentes taxas de deformação a fim de verificar o efeito da fluência no ensaio de compressão triaxial. Taxas de deformação axial da ordem de 10^{-5} /s apresentaram resultados mais coerentes com o regime elástico, o que resultava em taxas de tensão da ordem de 0,5 MPa/s nos ciclos de descarregamento-carregamento.

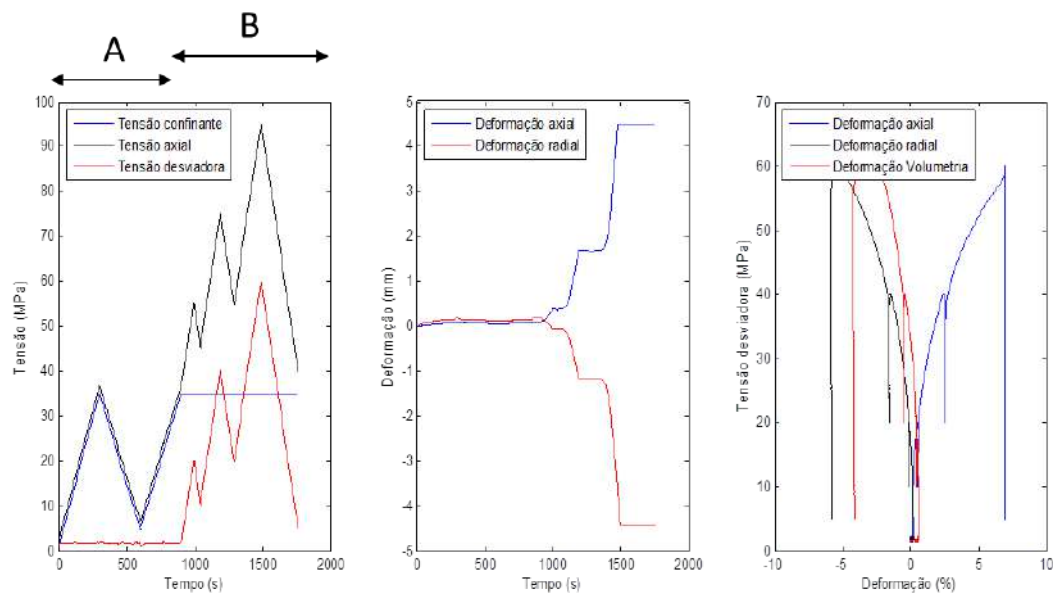


Figura 3.20 – Etapas dos ensaios de compressão triaxial para a amostra PE-K-2. Em A está definido o ciclo hidrostático e em B o ciclo triaxial.

4

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta para caracterização mineralógica, volumétrica e elástica de amostras de rochas evaporíticas. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente. Foram analisadas 29 amostras no total, sendo 25 amostras obtidas em furo de sondagem sub-horizontal, separadas em oito classes, e 4 amostras oriundas de blocos recolhidos na mina, separadas em três classes, vide tabela 3.1. Nas figuras 4.1 e 4.2 estão representadas as amostras tipo de cada classe.

Nem todas estas amostras passaram por todos os ensaios, algumas por limitação de geometria, como as amostras com razão altura x base inferiores a 2:1 no caso de ensaios de compressão triaxial, outras por opção ou por prazo para realização dos ensaios em laboratórios externos. Entretanto o número de ensaios associado a seleção das amostras foi suficiente para atingir o objetivo proposto nesta dissertação.

4.1.

Caracterização Mineralógica

A petrografia macroscópica é o ponto inicial da caracterização mineralógica. Todos os corpos de prova foram analisados quanto aos parâmetros típicos de descrição de rochas evaporíticas vistas a olho nu ou com auxílio de equipamento ótico simples, como lupa binocular de baixo aumento. Nesta etapa foi possível separar as amostras, antes agrupadas em classes, em três tipos de evaporitos: silvinita, halita e carnalita, tabela 4.1. Sendo a silvinita formada pelo mineral halita e silvita. Então, a priori, três minerais evaporíticos: halita, silvita e carnalita.

Dos tipos principais de minerais evaporíticos listados na tabela 3.3 não foram amostrados a anidrita e a taquidrita. A primeira por não estar exposta nas galerias da mina de Taquari-Vassouras a que tivemos acesso, pois em geral ocorre próxima ao lençol freático e por isso mantém-se uma distância segura destas camadas, e a segunda por ser de difícil coleta e armazenamento. De fato as

amostras de mão de taquidrita recolhidas na mina se desagregaram antes de efetuarmos o armazenamento e isolamento dos blocos da umidade ambiente.

Realizou-se ensaios de análise de radioatividade natural (Spectral Core Gamma) em todas as amostras. Para os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram selecionadas onze amostras, uma de cada classe, dada a homogeneidade macroscópica observada. A relação das amostras e dos ensaios realizados para a caracterização mineralógica está listada na tabela 4.1.



Figura 4.1 – Corpos de prova cilíndricos das diferentes classes obtidas de furo de sondagem sub-horizontal. Na parte superior da figura: Amostras PE-A-1, PE-B-1, PE-C-1 e PE-D-1, na parte inferior PE-E-1, PE-F-1, PE-G-1 e PE-K-1. Cada quadrado do papel reticulado mede 5 mm de lado.

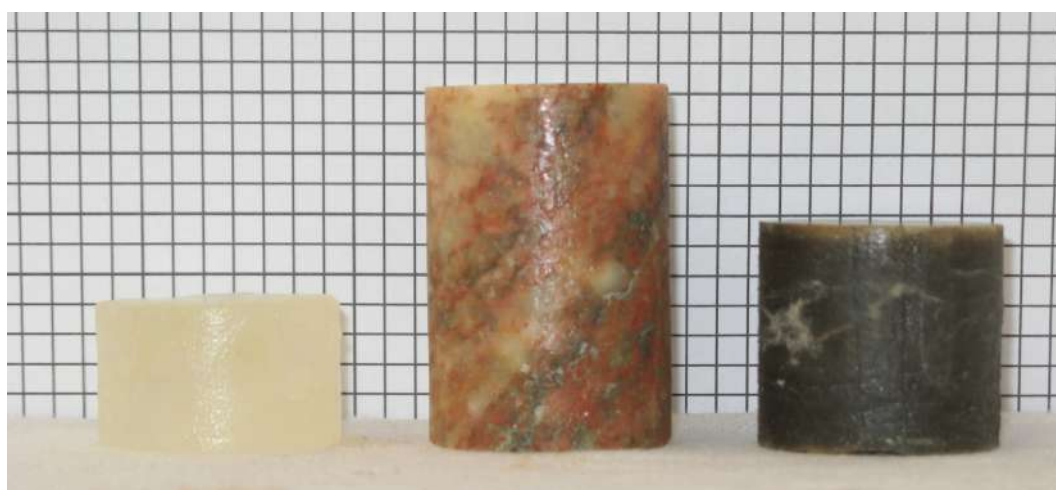


Figura 4.3 – Corpos cilindros oriundos das amostras de mão recolhidas na mina. Amostras PE-H-1, PE-I-1 e PE-J-1 da esquerda para a direita. Cada quadrado do papel reticulado mede 5 mm de lado.

Caracterização mineralógica						
Amostra	Litologia	Classe	Fotografia	Core gamma	MEV	EDS
PE-A-1	Silvinita	A	S	S	S	S
PE-A-2	Silvinita	A	S	S		
PE-A-3	Silvinita	A	S	S		
PE-B-1	Silvinita	B	S	S	S	S
PE-B-2	Silvinita	B	S	S		
PE-B-3	Silvinita	B	S	S		
PE-C-1	Halita	C	S	S	S	S
PE-C-2	Halita	C	S	S		
PE-C-3	Halita	C	S	S		
PE-C-4	Halita	C	S	S		
PE-C-5	Halita	C	S	S		
PE-C-6	Halita	C	S	S		
PE-C-7	Halita	C	S	S		
PE-D-1	Halita	D	S	S	S	S
PE-D-2	Halita	D	S	S		
PE-D-3	Halita	D	S	S		
PE-E-1	Halita	E	S	S	S	S
PE-E-2	Halita	E	S	S		
PE-E-3	Halita	E	S	S		
PE-F-1	Halita	F	S	S	S	S
PE-F-2	Halita	F	S	S		
PE-F-3	Halita	F	S	S		
PE-H-1	Carnalita	H	S	S	S	S
PE-I-1	Silvinita	I	S	S	S	S
PE-J-1	Halita	J	S	S	S	S
PE-J-2	Halita	J	S	S		
PE-K-1	Halita	K	S	S	S	S
PE-K-2	Halita	K	S	S		
PE-K-3	Halita	K	S	S		

Tabela 4.1 – Relação dos ensaios de caracterização mineralógicas realizados nas amostras de evaporitos.

Dos três minerais identificados na descrição macroscópica, dois apresentam o elemento potássio (K) em sua composição química: carnalita e silvita. O isótopo radioativo do potássio (K^{40}), junto com o urânio (U) e o tório (Th), emite raios gama durante o decaimento radioativo natural. Desta maneira a análise de radioatividade natural é um excelente indicador mineral. De fato o perfil elétrico de raio gama é utilizado na indústria de petróleo junto com o perfil de densidade como indicador de tipo de evaporito durante a perfilagem de poços, tabela 4.2.

Mineral	Densidade	Raio Gama
Anidrita	Alta	Baixa
Halita	Média	Baixa
Silvita	Média	Alta
Carnalita	Baixa	Alta
Taquidrita	Baixa	Baixa

Tabela 4.2 – Tabela esquemática da resposta típica aos perfis de densidade e raio gama natural dos cinco principais minerais evaporíticos encontrados nas bacias brasileiras.

Para esta análise as amostras foram acondicionadas em caixas de armazenamento de testemunhos de sondagem e agrupadas segundo as classes. A fim de evitar o efeito de borda na análise, as amostras foram separadas por cilindros de borracha nitrílica que não apresentam radioatividade natural. A sequência de análise foi: caixa 1, caixa 2, caixa 3, caixa 4, caixa 1, caixa 2, caixa 3 e caixa 4. Cada uma das caixas foi analisada duas vezes para confirmar o resultado. O equipamento utilizado normalmente adquire os dados de cada um dos componentes analisados (K, U e Th) em intervalos de 1 ou ½ pé (30,48 cm ou 15,24 cm), que é o intervalo típico de perfilagem na indústria de petróleo. Nesta análise foram adquiridos pontos a cada 1 cm. O resultado final está representado na figura 4.3.

Da análise de raios gama natural ficou claro que o componente K é o que apresenta o resultado mais anômalo, como já era esperado. Os componentes U e Th apresentam resultados na zona de ruído do equipamento, o que indica a ausência destes elementos no material analisado. O componente U ainda apresenta problemas na aquisição, gerando intervalos espúrios, mas que quando integrados junto com o Th e K no perfil de raios gama total (trilha 4 e 6, esta última com a profundidade corrigida, na figura 4.3), se mostram de pouca importância. O círculo vermelho na figura 4.3 mostra o efeito de borda presente ao se analisar a caixa 1 pela segunda vez, com a caixa 4 que continha amostras de silvinita ainda no aparelho.

Com isso as classes A, B, H e I confirmaram a presença de material rico em potássio (silvita ou carnalita), identificados na análise macroscópica, enquanto que as outras classes mostram a ausência destes minerais em quantidades perceptíveis ao equipamento.

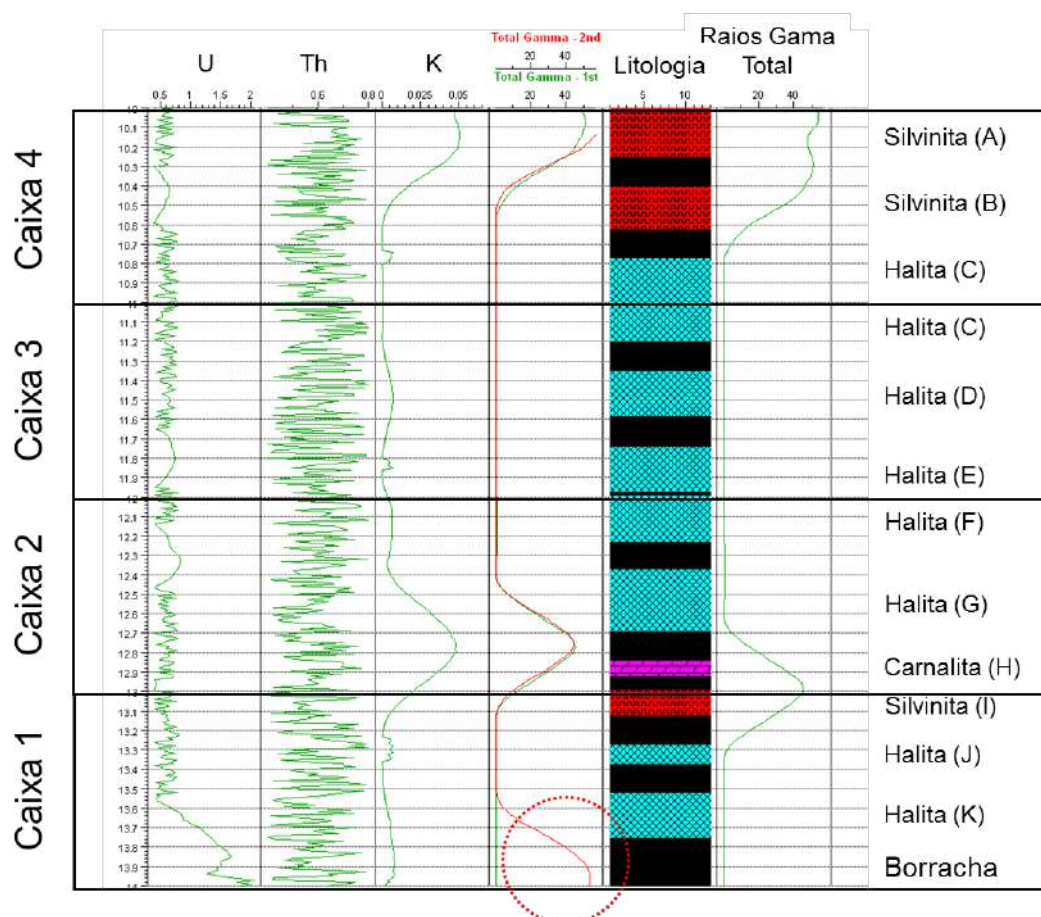


Figura 4.3 – Análise de raios gama total. As três primeira trilhas indicam a contribuição de cada um dos elementos (U, Th e K). A trilha 4 é o resultado do somatório das três contribuições em unidade API. O círculo vermelho mostra o efeito de borda ao se analisar a caixa 1 pela segunda vez. A trilha 6 apresenta o resultado de raios gama total corrigido quanto aos erros de posicionamento da caixa no equipamento.

A fim de caracterizar a microestrutura e a identificação dos minerais foram realizados ensaios de MEV e EDS em 11 amostras previamente selecionadas, tabela 4.1.

Nas amostras de silvinita (classes A, B e I) foi possível identificar os cristais de halita e silvita através dos espectros de análise do EDS, figura 4.4. Na figura de alta resolução composta por mosaicos de imagens do MEV a halita aparece em tons de cinza mais escuros enquanto que a silvita aparece em tons mais claros. Na área em detalhe da figura 4.4 é possível ver a característica cristalina típica de rochas evaporíticas, como as faces dos cristais bem definidas e com muito pouco ou nenhum espaço entre elas, indicando a quase nula porosidade esperada para este tipo de rocha.

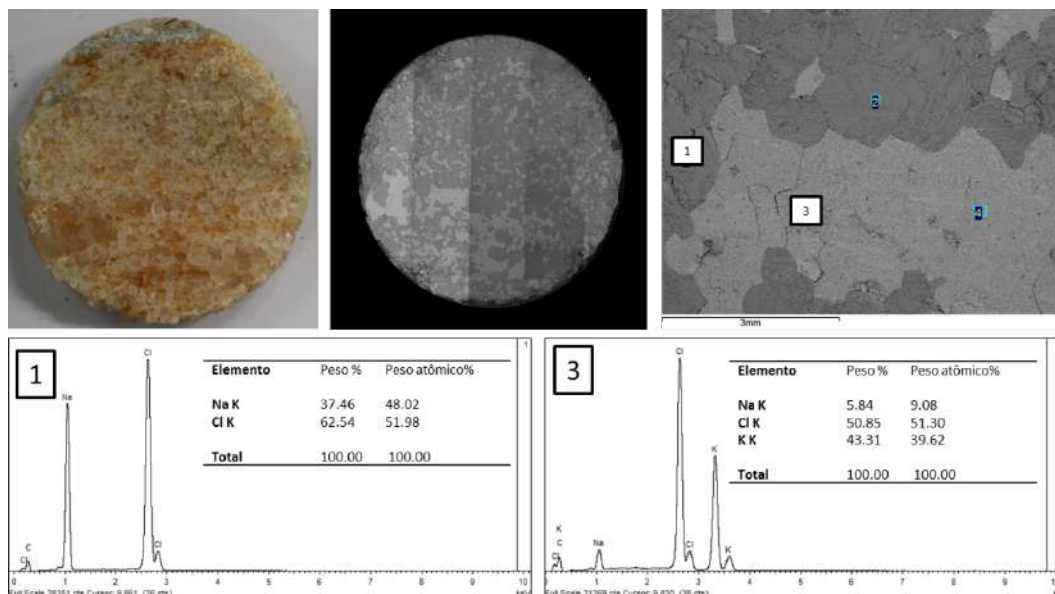


Figura 4.4 – Análise de MEV e EDS da amostra de silvinita PE-A-1. Os espectros da análise de EDS indicam a presença de halita (1) e silvita (3). As classes A, B e I apresentam análises de MEV e EDS semelhantes, podendo ser classificadas como silvinita.

As amostras das classes C, D, E, F, J e K foram definidas como halita pela descrição macroscópica e não apresentaram anomalia de potássio na análise de raios gama total. As halitas da classe C exibem filmes e lâminas de argila junto a matriz de halita. A análise de MEV e EDS identificou a presença de argilomineral rico em potássio e alumínio nestas amostras, figura 4.5. Na mina de Taquari-Vassouras é observada a presença de finas camadas de argila ao longo dos ciclos de deposição dos evaporitos, indicando a chegada de terrígenos no sistema. Estas finas camadas servem de marcos estratigráficos que auxiliam na identificação e posicionamento das camadas lavradas. Na amostra PE-F-1, da classe F, é possível observar uma fina camada de impureza na amostra, ao se analisar no microscópio eletrônico foi identificada a presença de pequenos cristais de silicato, provavelmente quartzo, figura 4.6. As amostras de halita das demais classes se apresentaram mais puras onde o resultado típico da análise deste material mais homogêneo pode ser visto na figura 4.7. O espectro da análise do EDS indica praticamente sódio (Na) e cloro (Cl). Na imagem do MEV é possível discriminar facilmente as bordas dos cristais. As fraturas observadas nesta escala em geral estão relacionadas ao processo de corte e preparo dos corpos de prova.

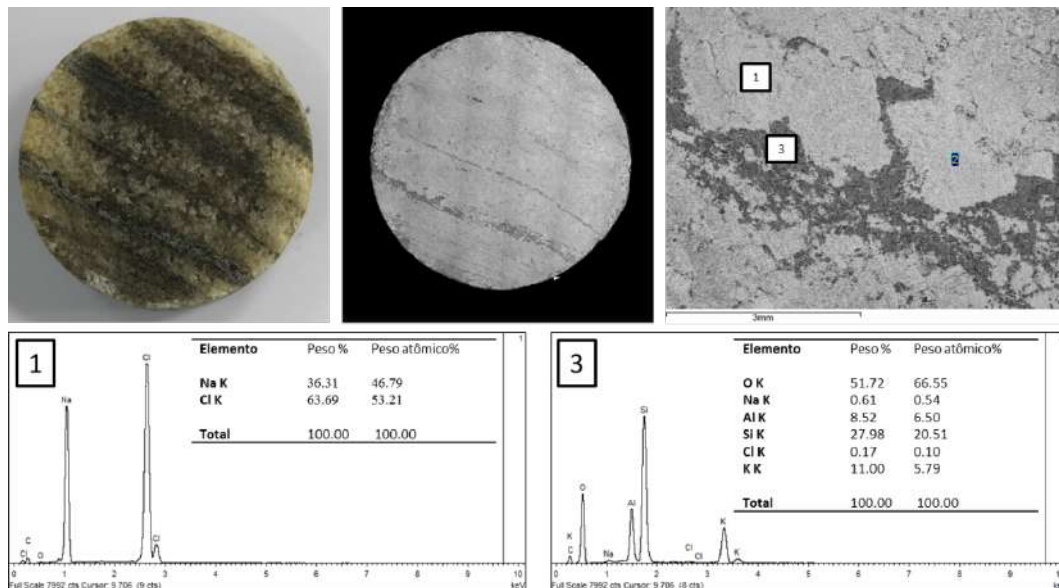


Figura 4.5 – Análise de MEV e EDS da amostra de Halita com filmes de argila PE-C-1. Os espectros da análise do EDS indicam a presença de Halita (1) e de aluminossilicato (3), provavelmente um argilomineral. A classe C pode ser classificada como halita com presença de lâminas de argila.

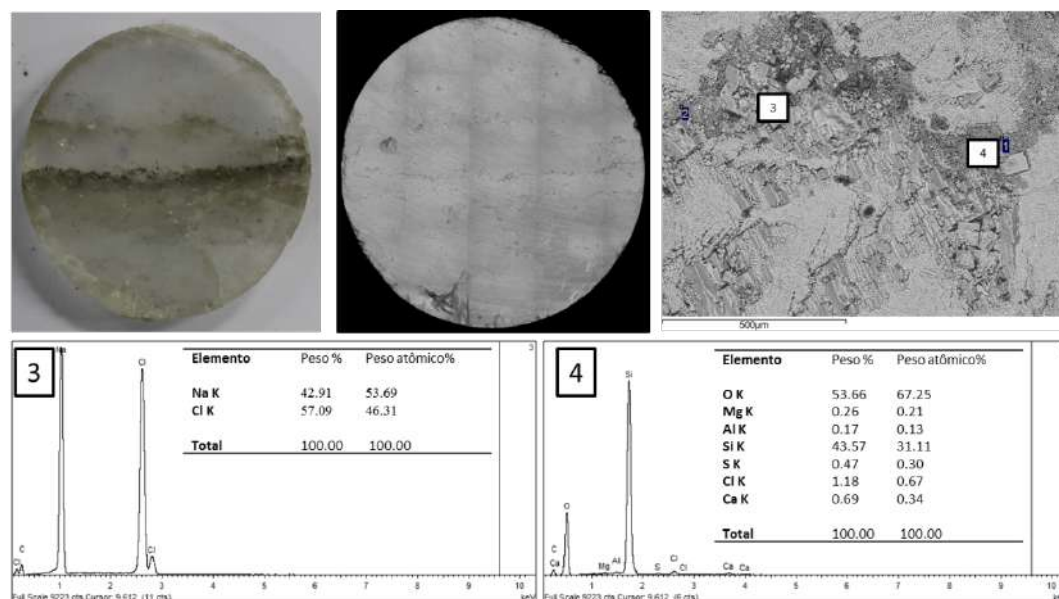


Figura 4.6 – Análise de MEV e EDS da amostra de Halita PE-F-1. Os espectros da análise do EDS indicam a presença de halita (1) e silicato (2), provavelmente quartzo. Nestas imagens o silicato aparece como impureza entre os cristais de halita.

As amostras da classe G estão relacionadas a zonas de brechas de dissolução. Com textura característica, as amostras são constituídas por halita, carbonatos magnesianos, silicatos e sulfetos ricos em ferro, figura 4.8.

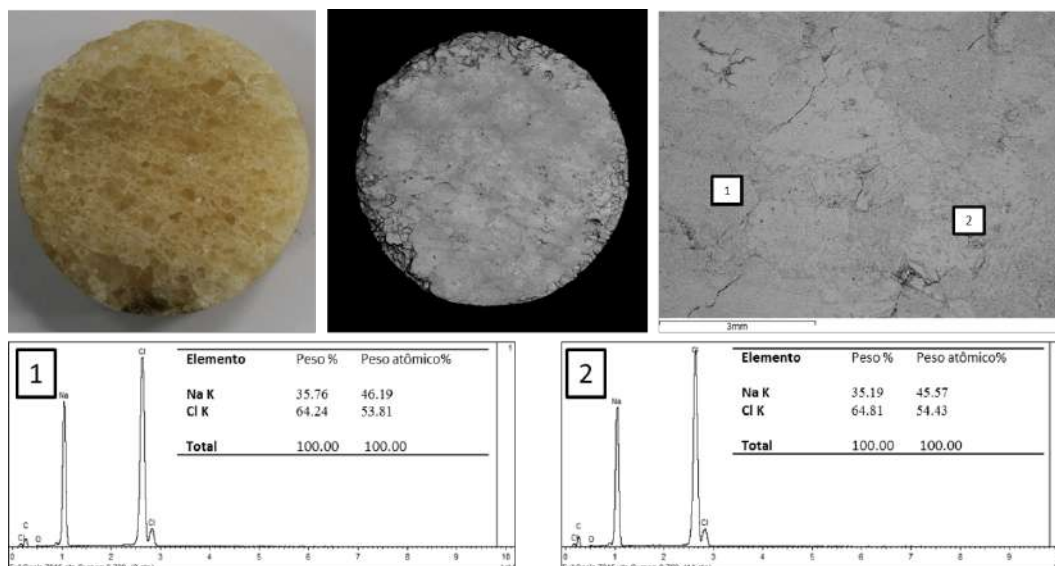


Figura 4.7 – Análise de MEV e EDS da amostra de Halita PE-D-1. Os espectros da análise do EDS indicam a presença de halita (1 e 2). As classes D, E, F e K apresentam análises de MEV e EDS semelhantes, podendo ser classificadas como halita.

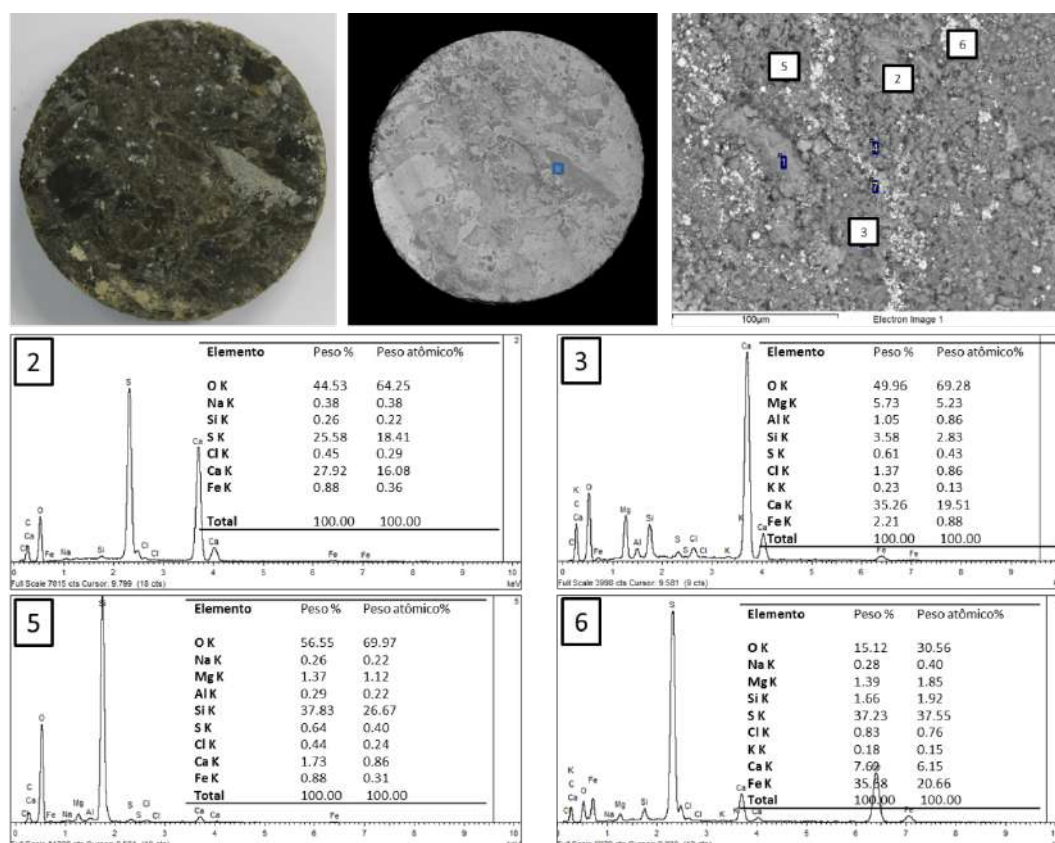


Figura 4.8 – Análise de MEV e EDS da amostra de halita de zona de brecha PE-G-1. Os espectros da análise do EDS indicam além da presença de halita a formação de cristais de anidrita (2), de carbonatos ricos em Mg (3), presença de silicatos (5) e sulfetos ricos em ferro (6).

A amostra de carnalita analisada foi recolhida na galeria da mina. Sendo a única amostra da classe H. Dificuldades no preparo do corpo de prova resultaram em um cilindro de 1 ½” de diâmetro de pequeno comprimento, não apropriado para ensaios de confinamento triaxial. No entanto as análises de microscopia eletrônica apresentaram resultados bem interessantes, figura 4.9. Como era esperado a análise de EDS identificou os elementos potássio (K), magnésio (Mg) e cloro (Cl) típicos do mineral carnalita, tabela 3.3. Foi observado com a exposição da amostra à umidade ambiente a formação de cristais cúbicos de silvita (KCl), formando uma capa de alteração, figura 4.10.

Esta observação corrobora a alteração da carnalita por lixiviação encontrada em minas de evaporitos pelo mundo, onde com a presença de solução aquosa rica em NaCl a carnalita se alteraria para silvita e halita, conforme a equação química esquemática abaixo:

Carnalita + Solução com NaCl = Silvita + Halita + Solução com $MgCl_2$



Como no ambiente de análise a umidade não estava saturada de NaCl apenas observamos a formação da silvita.

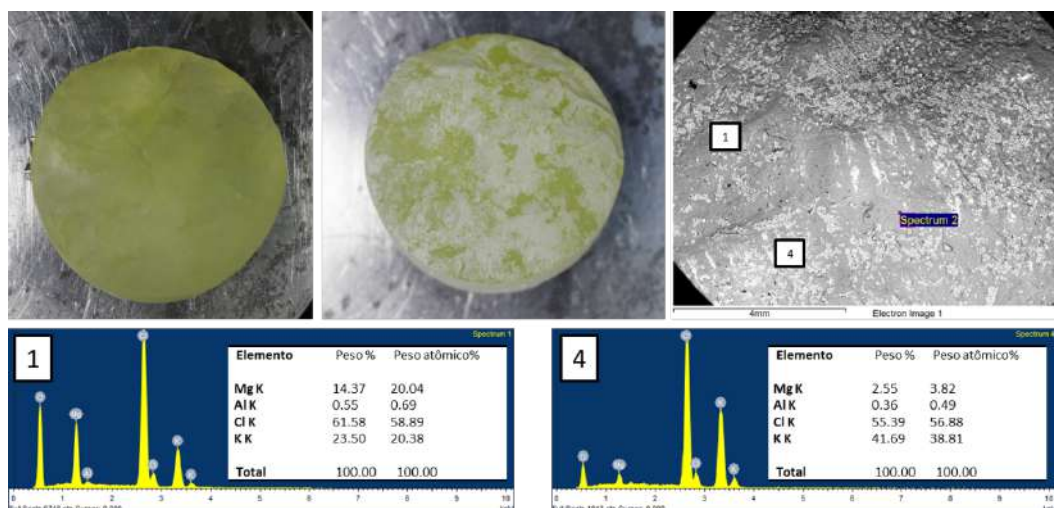


Figura 4.9 – Análise de MEV e EDS da amostra de carnalita PE-H-1. Os espectros da análise do EDS indicam a presença de carnalita (1) e silvita (4). É possível identificar os cristais de silvita precipitando sobre a carnalita, material de cor branca sobre a carnalita esverdeada da foto.

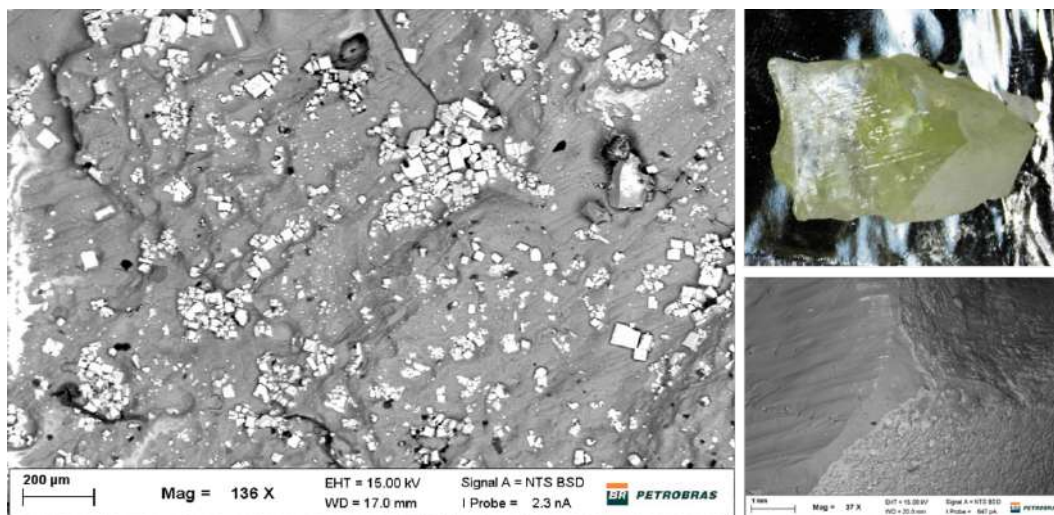


Figura 4.10 – Detalhe da análise de MEV e EDS da amostra de carnalita PE-H-1. É possível identificar a formação de cristais cúbicos de silvita sobre a matriz de carnalita, formando uma capa de alteração, devido a exposição da amostra à umidade do ambiente durante a análise.

Como comentado no capítulo 3, optamos por não realizar o preparo de lâmina delgada frente à dificuldade de construção das mesmas. Entretanto precisamos reconhecer a importante informação contida na petrografia microscópica, seja na caracterização mineral ou na observação de microestruturação do cristal durante ensaios de deformação, Schoenherr et al. (2007). Nesta dissertação julgamos que as informações advindas do MEV e EDS foram suficientes para o nível de caracterização que buscávamos, seja na caracterização química dos cristais ou na observação quanto à cristalinidade. Na figura 4.11 podemos comparar o tamanho médio dos cristais da amostra de silvinita PE-B-1, cerca de 20 vezes maior que os cristais da amostra de halita microcristalina PE-J-1, isto implica em mudanças em vários parâmetros como a translucidez, por exemplo, onde amostras de cristalinidade mais fina tendem a não ser translúcidas e sim opacas.

Na tabela 4.3 é apresentado um resumo sobre a classificação mineralógica das amostras segundo a sua classe. Amostras que eram descritas inicialmente como halita apresentam características como pureza, cristalinidade e estrutura tais que as fazem distintas umas das outras, mesmo que numa descrição qualitativa.

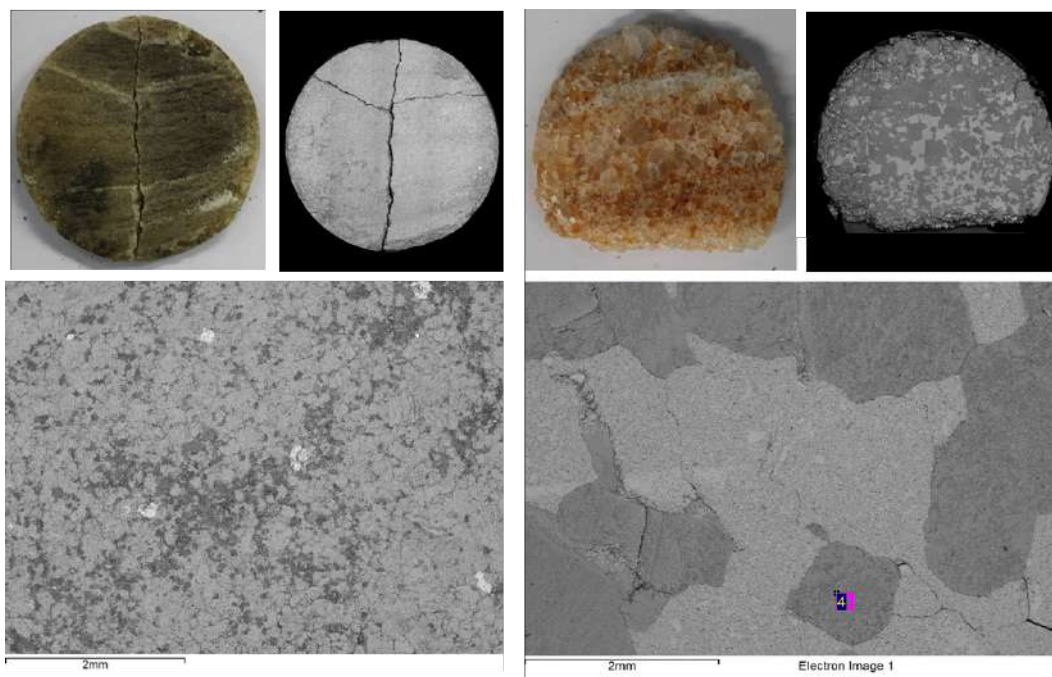


Figura 4.11 – Cristalinidade, ou tamanho do cristal, do mineral evaporítico. Comparação entre amostra de halita microcristalina com presença de argilossilicato (A) com cristais de tamanho médio inferiores à 0,1mm com amostra de silvinita (B) com cristais de halita e silvinita com tamanho médio próximo a 2 mm, cerca de 20 vezes maior. Mesma escala.

Classe	Descrição
A	Silvinita de coloração alaranjada e cristalinidade média.
B	Silvinita de coloração alaranjada e cristalinidade média.
C	Halita de coloração esverdeada e cristalinidade fina com camadas milimétricas de argila.
D	Halita de coloração alaranjada e cristalinidade média.
E	Halita de coloração alaranjada e cristalinidade média.
F	Halita translúcida com cristalinidade grossa apresentando fina camada de impureza.
G	Halita brechada de coloração verde escura com cristalinidade média e presença de silicatos, sulfetos de ferro e carbonatos magnesianos.
H	Carnalita esverdeada
I	Silvinita de coloração alaranjada e cristalinidade média.
J	Halita com cristalinidade muito fina e baixa translucidez com presença de argilominerais.
K	Halita translúcida com cristalinidade grossa.

Tabela 4.3 – Descrição mineralógica das classes de amostras analisadas.

4.2. Caracterização Volumétrica

Os valores de propriedades como densidade e velocidade de rochas e minerais evaporíticos disponíveis na literatura em geral são derivados de perfis elétricos de poço, tabela 4.4. Podemos verificar uma variação considerável nos valores propostos por diferentes autores. As variáveis DTc e DTs se referem a vagarosidade compressional e cisalhante (inverso da velocidade). Estudos em laboratório com amostras e parametrização controlada mostram-se mais escassos.

Valores de densidade, ou massa específica do mineral, da halita variando de 2,03 a 2,16 g/cm³ indicam claramente a mistura de minerais, onde os valores de 2,03 e 2,04 parecem estar mais relacionados a depósitos de silvinita (halita + silvita) do que ao mineral halita propriamente dito.

Nome	Formula	Densidade g/cm ³	DTc us/ft	DTs us/ft	
Halita	NaCl	2.04	67	120	1
		2.04	67	116	2
		2.03	67	-	3
		2.16	67	116	4
		2.16	68	118	4
Anidrita	CaSO ₄	2.98	50	-	1
		2.98	50	98	2
		2.98	50	-	3
		2.98	54	97	4
			51	90	4
Gipsita	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	2.35	52	-	1
		2.35	53	-	2
		2.35	52.5	-	3
		2.35	53	-	4
Taquidrita	CaCl ₂ (MgCl ₂) ₂ (H ₂ O) ₁₂	1.66	92	-	1
		1.66	92	-	2
Silvita	KCl	1.86	-	-	1
		1.87	74	140	2
		1.86	74	-	3
		1.99	79	140	4
Carnalita	KClMgCl ₂ (H ₂ O) ₆	1.57	-	-	1
		1.57	79	-	2
		1.57	78	-	3

Tabela 4.4 – Propriedades físicas de minerais típicos de rochas evaporíticas, caracterizados em perfis elétricos de poços. Os números na última coluna indicam a fonte de referencia: 1 – Blum (1997); 2 – Crain (2001); 3 – Mohriak *et al.* (2008) e 4 – Mavko *et al.* (2003). Modificado de Justen *et al.* (2013).

Quando se trabalha com os valores obtidos de perfis elétricos devemos fazer algumas considerações quanto à resolução vertical das ferramentas, figura 4.12. Apesar de hoje termos o intervalo típico de amostragem em profundidade de 1 pé

(30,48 cm), na prática os perfis elétricos não atingem esta resolução. Os valores das propriedades obtidas são relativos a um comportamento médio no intervalo da resolução vertical da ferramenta.

Na figura 4.13 estão representados os valores de densidade e vagarosidade compressional, DT, de 14 poços da bacia de Santos que perfilaram a seção evaporítica. Com base neste gráfico podemos inferir que, com exceção do mineral gipsita, todos os evaporitos listados na tabela 4.4 estão presentes na bacia. A grande dispersão dos pontos entre os valores dos minerais evaporíticos puros indica a presença de mistura entre os mesmos, seja na microestrutura ou devido à resolução vertical da ferramenta. Note que as propriedades dependem claramente da mistura de mineral. Desta maneira fica clara a necessidade de uma correta caracterização volumétrica dos corpos de prova a fim de permitir uma interpretação mais quantitativa dos resultados.

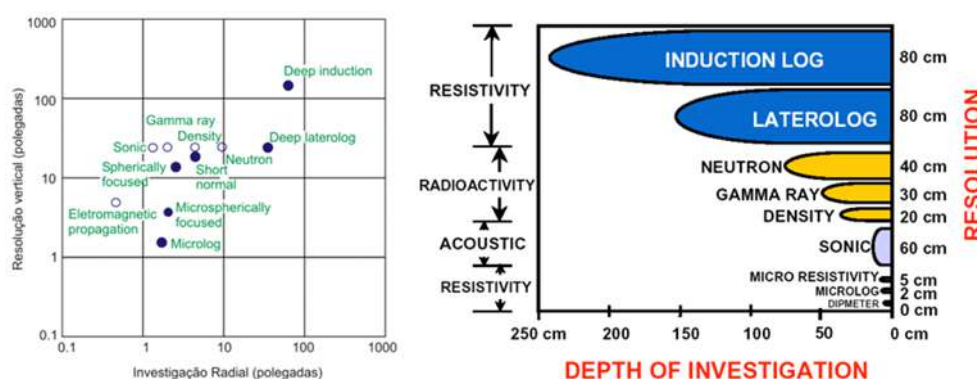


Figura 4.12 - Gráficos esquemáticos mostrando a relação entre a resolução vertical de ferramentas de perfilagem elétrica e sua profundidade de investigação, Crain (2001).

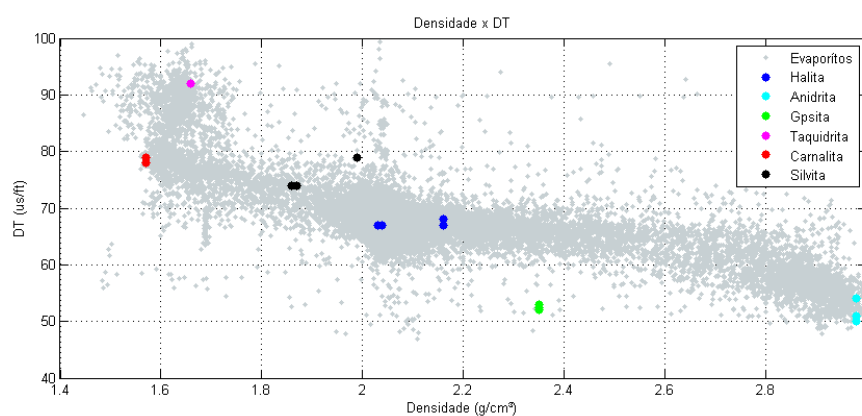


Figura 4.13 - Gráfico entre a densidade e a vagarosidade compressional. Os pontos cinzas representam os valores de perfis elétricos. Os pontos coloridos representam os diferentes valores da literatura, tabela 4.4. Justen *et al.* (2013).

A fim de caracterizar volumetricamente cada uma das fases minerais presentes nos corpos de prova utilizados nesta dissertação, foram realizadas análises de massa específica de grão e análises de microtomografia de raios X.

Através de um permo-porosímetro à hélio foram realizadas medidas do volume sólido de cada um dos corpos de prova. Sabendo a massa, calcula-se a densidade do sólido, ou massa específica do mineral (G), pela simples divisão da massa pelo volume. O valor obtido pode ser comparado aos valores de densidade da tabela 4.4 obtidos a partir de perfis de poço. Considerando o corpo de prova um cilindro perfeito, podemos calcular o volume total a partir dos valores de comprimento e diâmetro, tabela 3.2, e com a equação 3.4 obter um valor aproximado de porosidade. Dividindo a massa pelo volume total obtemos a massa específica aparente seca (G_a). A tabela 4.5 resume os resultados desta análise.

No gráfico de correlação entre a massa específica aparente seca e a massa específica do mineral, figura 4.14, se pode notar claramente o afastamento dos pontos da reta 1:1. Esta reta indica a porosidade nula. Valores acima da reta sugerem porosidade positiva. Quanto maior a distancia ortogonal, maior o valor da porosidade. Não se espera pontos abaixo da reta 1:1. No caso da amostra PE-F-1 o valor negativo obtido (-0,2%) está relacionado ao erro experimental. De maneira que a porosidade desta amostra deve estar próxima de zero. Podemos notar ainda a já esperada separação entre as amostras de silvinita e de halita, relacionada diretamente à massa específica do mineral. Neste gráfico não está representada a amostra de carnalita (PE-H-1).

A correlação entre a porosidade e a massa específica do mineral está apresentada na figura 4.15. As amostras de silvinita apresentam porosidades maiores que as de halita. Entretanto estes valores estão influenciados pela maior rugosidade superficial da amostra de silvinita, quando comparado às amostras de halita. É normal identificar o desprendimento de cristais na superfície do corpo de prova. Desta forma o volume total estimado tende a ser maior, como discutido na seção 3.3.2. As amostras da classe G (halitas brechadas), também apresentaram valores altos de porosidade, mas desta vez relacionados à presença de argila desidratada e carbonatos, com microporosidade associada. Durante os experimentos estas foram as amostras que necessitaram de maior tempo de estabilização de pressão no fluxo normal de análise, parâmetro que em geral indica a presença de microporosidade.

Classe	Código	Hélio		Geometria		
		Volume sólidos cm ³	G g/cm ³	Volume total cm ³	Porosidade %	Ga g/cm ³
A	PE – A – 1	86,551	2,106	91,061	5,0%	2,002
A	PE – A – 2	90,041	2,125	93,023	3,2%	2,056
A	PE – A – 3	33,757	2,115	36,067	6,4%	1,978
B	PE – B – 1	81,203	2,107	84,977	4,4%	2,013
B	PE – B – 2	88,966	2,118	93,249	4,6%	2,019
B	PE – B – 3	77,334	2,110	81,901	5,6%	1,988
C	PE – C – 1	94,707	2,184	94,957	0,3%	2,179
C	PE – C – 2	31,099	2,185	31,524	1,3%	2,146
C	PE – C – 3					
C	PE – C – 4	51,132	2,159	52,541	2,7%	2,098
C	PE – C – 5	83,437	2,174	84,682	1,5%	2,142
C	PE – C – 6	93,563	2,169	94,456	0,9%	2,148
C	PE – C – 7	68,504	2,175	69,204	1,0%	2,148
D	PE – D – 1	91,388	2,161	92,450	1,1%	2,134
D	PE – D – 2	87,215	2,161	88,440	1,4%	2,129
D	PE – D – 3	92,562	2,158	94,772	2,3%	2,106
E	PE – E – 1	89,582	2,159	90,959	1,5%	2,126
E	PE – E – 2	91,999	2,171	92,832	0,9%	2,151
E	PE – E – 3	91,738	2,158	93,704	2,1%	2,112
F	PE – F – 1	82,005	2,156	81,841	-0,2%	2,158
F	PE – F – 2	80,449	2,156	82,760	2,8%	2,096
F	PE – F – 3	86,615	2,160	87,615	1,1%	2,135
G	PE – G – 1	89,500	2,218	92,748	3,5%	2,141
G	PE – G – 2	91,289	2,179	93,499	2,4%	2,127
G	PE – G – 3	83,080	2,235	86,879	4,4%	2,137
G	PE – G – 4	87,298	2,242	91,373	4,5%	2,142
H	PE – H – 1	24,262	1,587	24,637	1,5%	1,587
I	PE – I – 1	61,561	2,082	62,205	1,0%	2,060
J	PE – J – 1	37,441	2,174	38,172	1,9%	2,133
J	PE – J – 2	63,128	2,177	63,865	1,2%	2,155
K	PE – K – 1					
K	PE – K – 2					
K	PE – K – 3	96,749	2,170	98,103	1,4%	2,139

Tabela 4.5 – Resultado da análise de massa específica dos grãos. Massa específica do mineral (G). Massa específica aparente seca (Ga). As amostras PE-C-3, PE-K-1 e PE-K-2 não foram analisadas.

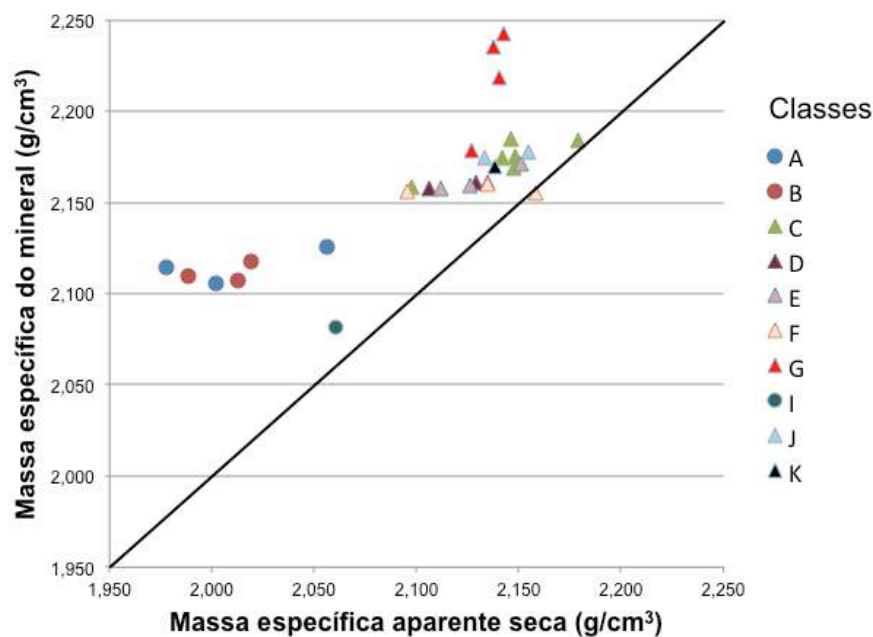


Figura 4.14 – Comparação entre os valores de massa específica do mineral (G) e de massa específica aparente seca (Ga). Neste gráfico não está representada a única amostra de carnalita analisada (PE-H-1).

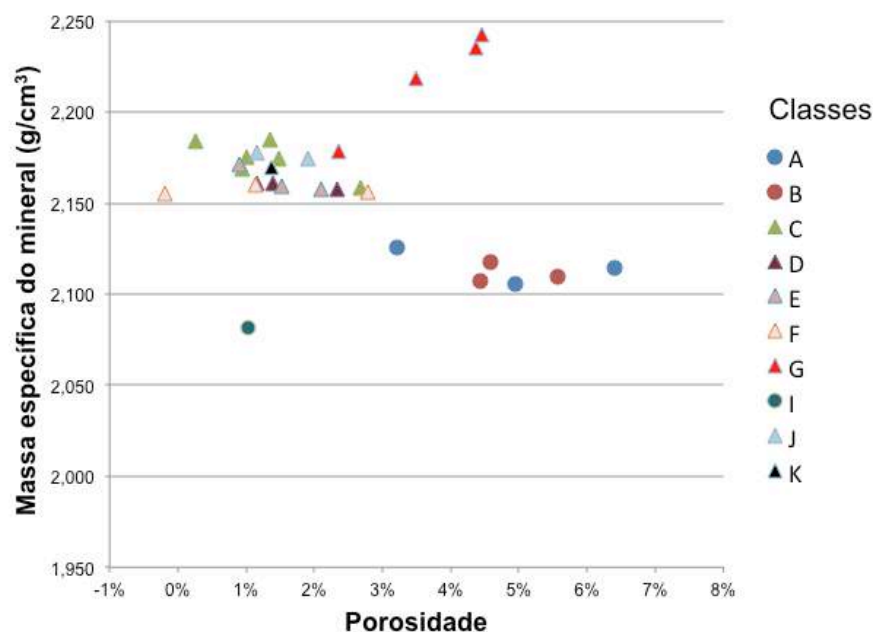


Figura 4.15 – relação entre a porosidade e a massa específica do mineral (G). As amostras de silvinita (classes A, B e I) são as que apresentam os maiores valores de porosidade seguidos pelas halitas brechadas (classe G). Neste gráfico não está representada a única amostra de carnalita analisada (PE-H-1).

Os resultados de massa específica do mineral da tabela 4.5 foram analisados e organizados quanto à mineralogia e a classe das amostras, obtendo valores médios e desvio padrão desta propriedade, tabela 4.6. O valor resultante para halita pura (classes D, E, F e K) é bem próximo dos valores da referência 4 da tabela 4.4. A classe C apresenta valor ligeiramente maior devido a presença de finas camadas de argila, que possuem massa específica do mineral maior do que a halita. O mesmo acontecendo com a classe G que ainda apresenta carbonatos, com massa específica acima de $2,70 \text{ g/cm}^3$, nos corpos de prova analisados. Estes resultados estão apresentados em gráficos de barra na figura 4.16, onde a barra de cor azul é o valor médio subtraído de um desvio padrão, a barra vermelha sobreposta é o valor médio e a barra verde o valor médio somado à um desvio padrão. O valor obtido para a amostra de carnalita, não apresentado na figura anterior, foi bem próximo aos valores da literatura, tabela 4.4.

As silvinitas (classes A, B e I) apresentam valores médios de massa específica do mineral de $2,109 \text{ g/cm}^3$. Neste caso a variação dos valores indica a mudança no teor de halita e silvita da amostra. Estes resultados nos permitem calcular o volume da cada uma das fases minerais da amostra de silvinita, considerando apenas que a massa específica do mineral na mistura segue uma relação de média aritmética como na equação 3.3, Mavko *et al.* (2003).

Massa específica do mineral (g/cm^3)			
	Amostras	Média	Desvio Padrão
Halita Total	22	2,176	0,025
Halita Pura	10	2,161	0,005
C	6	2,174	0,010
D	3	2,160	0,002
E	3	2,163	0,007
F	3	2,157	0,003
G	4	2,219	0,028
J	2	2,176	0,002
K	1	2,170	-
Silvinita	7	2,109	0,014
A	3	2,115	0,010
B	3	2,111	0,005
I	1	2,082	-
Carnalita	1	1,587	-

Tabela 4.6 - Resultado da análise de massa específica dos grãos.

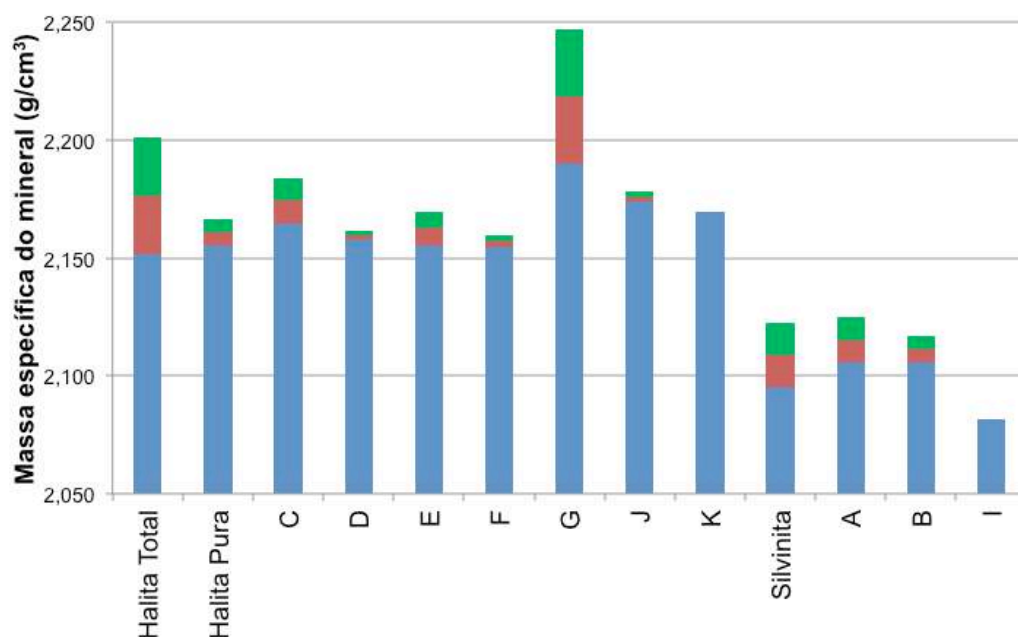


Figura 4.16 – Resultado da análise de massa específica dos grãos. Gráfico de barras esquemático indicando o valor médio e o desvio padrão. O valor médio está localizado no limite entre a barra vermelha e a verde. O desvio padrão positivo é a barra verde e o desvio padrão negativo é a barra vermelha. Neste gráfico não está representada a amostra de carnalita (PE-H-1).

Considerando os valores de massa específica mineral da halita e silvita apresentados pela referência 4 da tabela 4.4, 2.16 e 1.99 g/cm³ respectivamente, foram calculados o volume de halita e silvita para cada uma das sete amostras de silvinita analisadas nesta dissertação, tabela 4.7.

Amostra	G g/cm ³	Halita %	Silvita %
PE – A – 1	2,106	68,20	31,80
PE – A – 2	2,125	79,56	20,44
PE – A – 3	2,115	73,25	26,75
PE – B – 1	2,107	68,86	31,14
PE – B – 2	2,118	75,03	24,97
PE – B – 3	2,110	70,33	29,67
PE – I – 1	2,082	53,93	46,07

Tabela 4.7– Resultado da análise de massa específica dos grãos. Cálculo considerando que a amostra é constituída apenas por halita e silvita.

A fim de confirmar estes resultados, foi realizada a análise de microtomografia de raios x na amostra PE-I-1, figura 4.2. O princípio básico desta análise está relacionado à atenuação dos raios x durante a propagação na amostra, como descrito na seção 3.3.1. A figura 4.17 ilustra o resultado desta análise para diferentes planos ortogonais ao comprimento da amostra. A coloração cinza claro indica o mineral halita e a cinza escuro o mineral silvita. Na escala de densidade, materiais mais densos aparecem na tonalidade branca. Posteriormente foi feito o processo de binarização, segmentando a amostras em três componentes: halita, silvita e espaço poroso, figura 4.18. Neste figura é possível identificar uma pequena fratura aberta, provavelmente criada durante o processo de preparo da amostra. A resolução obtida nesta análise foi de 36,5 μm .

O volume de cada fase mineral foi calculada a partir da imagem segmentada, seção por seção, considerando apenas as fases halita e silvita, como mostrado na figura 4.19. A volumetria para toda amostra é obtida integrando os resultados das seções. O resultado final foi bem próximo do observado no ensaio de massa específica de grãos, indicando que os valores obtidos por esta metodologia podem ser perfeitamente utilizados para caracterizar volumetricamente as amostras de silvinita, tabela 4.8.

Metodologia	Halita (%)	Silvita (%)
	%	%
Massa específica dos grãos	53,93	46,07
Microtomografia de raios x	50,80	49,20

Tabela 4.8 – Comparação entre os resultados da amostra PE-I-1

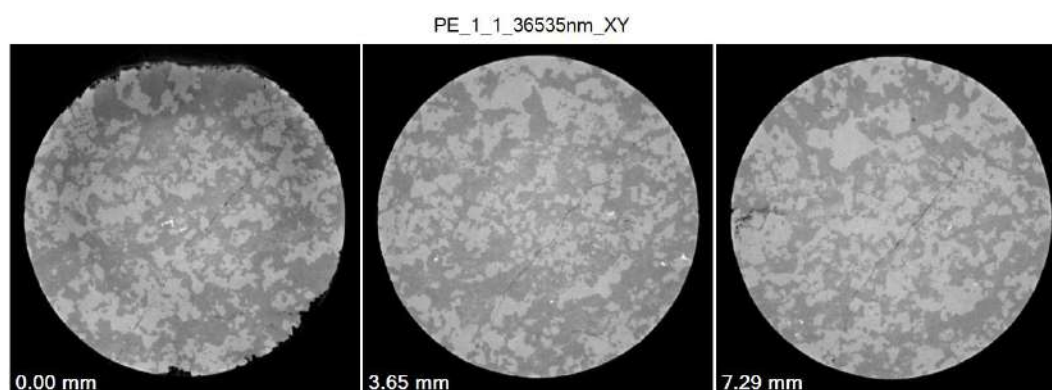


Figura 4.17 – imagem tomográfica ortogonal ao comprimento da amostra PE-I-1.

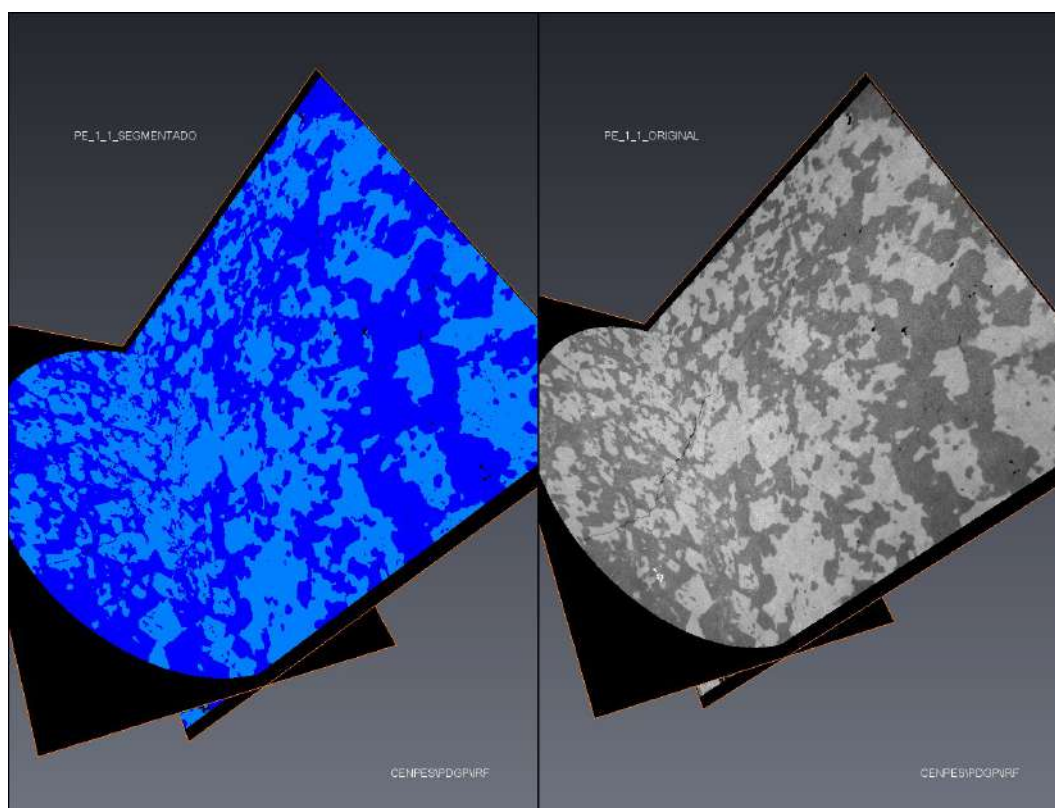


Figura 4.18 - Resultados da segmentação da amostra PE-I-1. Halita (azul claro), Silvita (azul escuro) e eventual espaço poroso vazio ou fratura (preto).

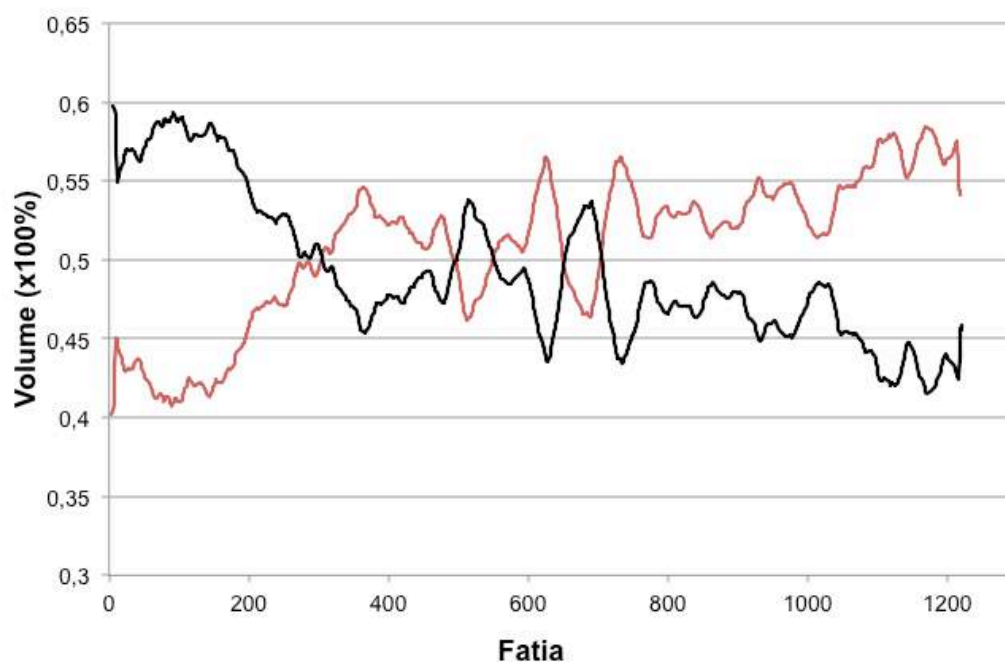


Figura 4.19 – Cálculo de volume para seção ortogonal ao comprimento da amostra. Intervalo entre as seções, fatias, é de 36.5 μm (resolução obtida nesta análise). Curva vermelha: halita. Curva preta: silvita.

O resultado obtido para as amostras de silvinita está diretamente relacionado à propriedade cristalina deste tipo de evaporito. Por ser praticamente uma distribuição binária de cristalinidade média, com propriedades de atenuação bem distintas, o método tem resolução suficiente para discriminar cada uma das duas fases minerais. Provavelmente para os caso da Classe C e G, onde três ou mais minerais estão presentes, além da cristalinidade mais fina, a metodologia não será capaz de gerar uma informação volumétrica quantitativa, seja por problemas de resolução ou por necessidade de informações *a priori*.

Ensaio de microtomografia de raios x tem se tornado rotineiros nos estudos de rochas, principalmente na indústria do petróleo. Por ser um ensaio não destrutivo, pode ser feito em várias etapas de um fluxograma de análises. Em geral é utilizado para identificar mudanças na estrutura interna dos corpos de prova, comparando as imagens antes e depois de determinados procedimentos.

Durante o ensaio de compressão triaxial a amostra PE-C-3 rompeu. Em um outro exemplo de aplicação do método e a fim de caracterizar o plano de fratura gerado, foi realizada a análise de microtomografia, figura 4.20. O plano de fraqueza se desenvolveu na região de contato entre a halita e as finas camadas de argila. O padrão de fratura também é facilmente observado nos microtomogramas.

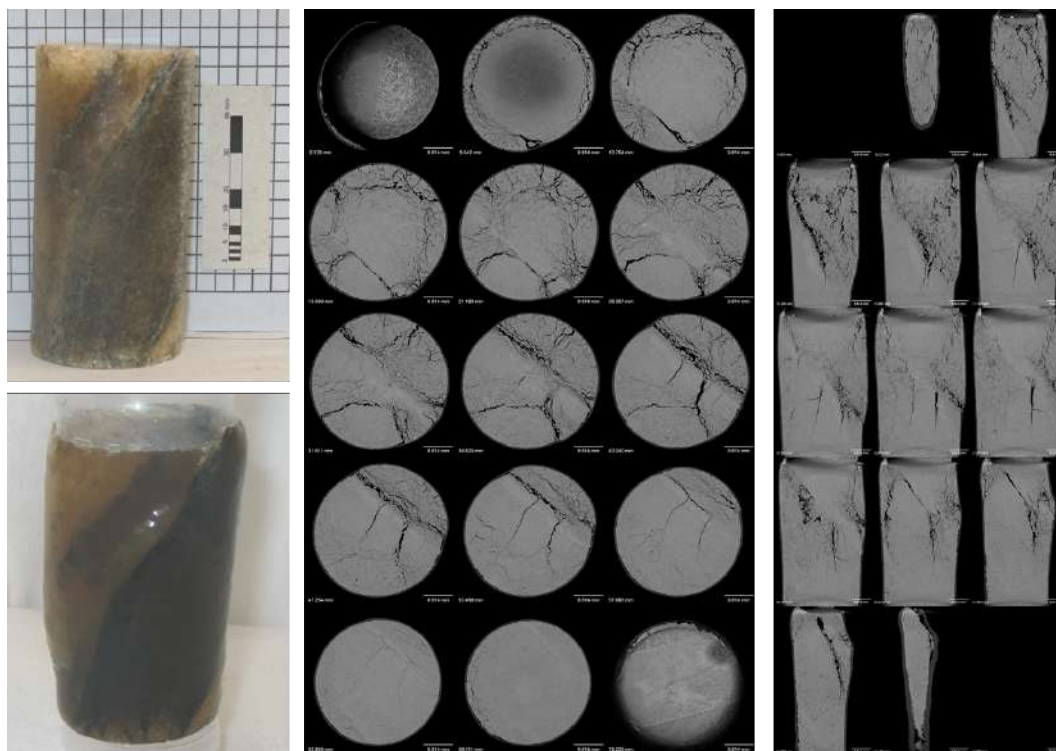


Figura 4.20 – Microtomogramas da amostra PE-C-3 após a ruptura em ensaio triaxial.

4.3. Caracterização Elástica

Os evaporitos são rochas que apresentam características elásticas e mecânicas bem diferentes das outras rochas da crosta terrestre. Em arenitos podemos observar valores de velocidade compressional (VP) variando entre 1000 e 4000 m/s apenas por mudança na porosidade, fluido, cimentação, idade ou pressão de soterramento. No entanto para as rochas evaporíticas a constância nas propriedades é notória. O valor de velocidade P de uma halita pura, encontrada na mina de Taquari-Vassouras ou no Golfo do México, vai ser sempre da ordem de 4500 m/s, ou seja, idades deposicionais e históricos tectônicos distintos e mesmo assim com propriedades elásticas bem semelhantes.

Como visto na figura 4.13 as propriedades elásticas das rochas evaporíticas podem apresentar dispersão relacionada com a resolução da ferramenta de perfilagem ou com a mistura de diferentes evaporitos. Por isso a necessidade de caracterizar este material quanto a mineralogia, volumetria e elástica. A caracterização elástica das amostras evaporíticas foi feita por duas metodologias:

- Método dinâmico – Propagação ou transmissão de pulso ultrassônico
- Método estático – Ensaio de compressão triaxial

Quase todas as amostras passaram pela caracterização através do método dinâmico, que independe da relação altura-base de 2:1, a exceção foram as amostras da classe G que apresentaram relação sinal ruído muito baixa. Para a caracterização estática optou-se por realizar os experimentos apenas em amostras de halita. No total foram dez amostras caracterizadas segundo as duas metodologias, permitindo a comparação dos módulos elásticos obtidos.

As amostras de silvinita apresentavam rugosidade excessiva na superfície do corpo de prova e com isso a membrana que separa a amostra do fluido de confinamento era rotineiramente rompida. A única amostra de carnalita recuperada não apresentava a relação de altura-base de 2:1. Fatos que corroboraram a escolha das amostras de halita.

4.3.1.

Método Dinâmico – Ensaio de Velocidades Elásticas

A técnica de medida de velocidade por propagação de pulso ultrassônico é muito utilizada na caracterização dos módulos elásticos em amostras de rocha. Este ensaio não destrutivo pode ser realizado simulando as condições de pressão e saturação da rocha em subsuperfície. Em geral são obtidos os valores de velocidade compressional (VP) e velocidade cisalhante, sendo esta última um par ortogonalmente orientado (VS1 e VS2). A partir dos valores de velocidade e da densidade (ρ), além dos conceitos da teoria da elasticidade e isotropia do material, os módulos elásticos podem ser calculados pelas equações abaixo:

Módulo volumétrico (K), inverso da compressibilidade.

$$K = \rho \left(VP^2 - \left(\frac{4}{3} \right) VS^2 \right) \quad (4.1)$$

Módulo de cisalhamento (μ)

$$\mu = \rho(VS^2) \quad (4.2)$$

Razão de Poisson (RP)

$$RP = \frac{1}{2} \left(\frac{VP^2 - 2VS^2}{VP^2 - VS^2} \right) \quad (4.3)$$

Módulo de Young (E)

$$E = 3K(1 - 2RP) \quad (4.4)$$

Na figura 4.21 está representada de maneira esquemática a análise de velocidades da amostra PE-D-3. Na parte superior da figura estão ilustrados os sinais registrados para cada uma das ondas analisadas, denominados forma de onda. Neste ensaio a amostra foi confinada hidrostáticamente de 500 psi a 5000 psi e posteriormente descarregada até 500 psi com passos de 500 psi. Para cada passo de pressão confinante foi adquirida uma forma de onda. Na parte inferior desta mesma figura estão ilustrados os resultados de velocidade para cada ponto de pressão confinante, onde os pontos de cor azul representam o comportamento durante o carregamento e os pontos da cor preta durante o descarregamento. A histerese observada em geral está relacionada ao acoplamento da amostra e fechamento de microfraturas durante o estágio de carregamento. Na tabela 4.9 estão listados os resultados da interpretação de velocidade da amostra PE-D-3.

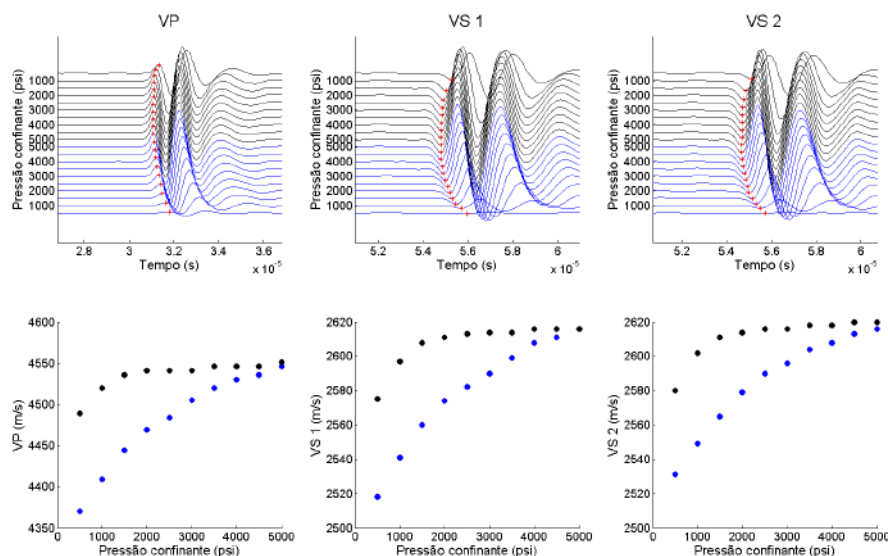


Figura 4.21 – Análise de velocidades ultrassônicas da amostra PE-D-3. Os três gráficos superiores mostram a identificação dos eventos nas formas de onda adquiridas para VP, VS1 e VS2. Os três gráficos inferiores mostram os resultados interpretados para cada velocidade. Carregamento em azul e descarregamento em preto.

Tensão Confinante <i>psi</i>	Carregamento			Descarregamento		
	VP	VS1	VS2	VP	VS1	VS2
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
500	4370	2518	2531	4489	2575	2580
1000	4409	2541	2549	4520	2597	2602
1500	4444	2560	2565	4536	2608	2611
2000	4469	2574	2579	4541	2611	2614
2500	4484	2582	2590	4541	2613	2616
3000	4505	2590	2596	4541	2614	2616
3500	4520	2599	2604	4546	2614	2618
4000	4530	2608	2608	4546	2616	2618
4500	4536	2611	2613	4546	2616	2620
5000	4546	2616	2616	4551	2616	2620

Tabela 4.9 – Resultado da interpretação da análise de velocidades ultrassônicas da amostra de halita PE-D-3.

Todas as amostras listadas na tabela 3.2 foram analisadas. Apenas as amostras da classe G (halita brechada) não exibiram resultados satisfatórios. A presença de argila desidratada e outros minerais acabou resultando em uma relação sinal ruído muito baixa quando comparada com as outras amostras, figura

4.22. Dificultando, principalmente na onda cisalhante, a identificação do evento de chegada da onda devido à alta atenuação do sinal. Desta maneira as amostras desta classe não serão consideradas na análise dinâmica.

Seguindo a metodologia descrita na seção 3.4.1 foram realizadas análises de velocidades em 29 amostras, tabela 4.10. Os módulos elásticos foram calculados utilizando as equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 considerando o material como sendo elástico e isotrópico. Frente à pequena deformação causada durante a propagação do pulso ultrassônico, pode-se assumir que o ensaio ocorre no domínio elástico. A questão da isotropia pode ser analisada observando o comportamento das duas ondas cisalhantes. Em material isotrópico elas tendem a apresentar o mesmo valor, ou uma variação muito pequena. O gráfico da esquerda na figura 4.23 indica que a maior parte das amostras analisadas possuem diferenças inferiores à 2%, que é o erro médio experimental para este tipo de análise. Apenas duas amostras de halita (PE-F-1 e PE-K-3) e a amostra de carnalita (PE-H-1) apresentaram valores superiores a 2%. Desta maneira podemos considerar que o material se comporta isotropicamente quanto à propagação dos pulsos ultrassônicos. As amostras da classe C (halita com argila) que visualmente aparentam ser anisotrópicas não mostraram esta característica durante a análise ultrassônica.

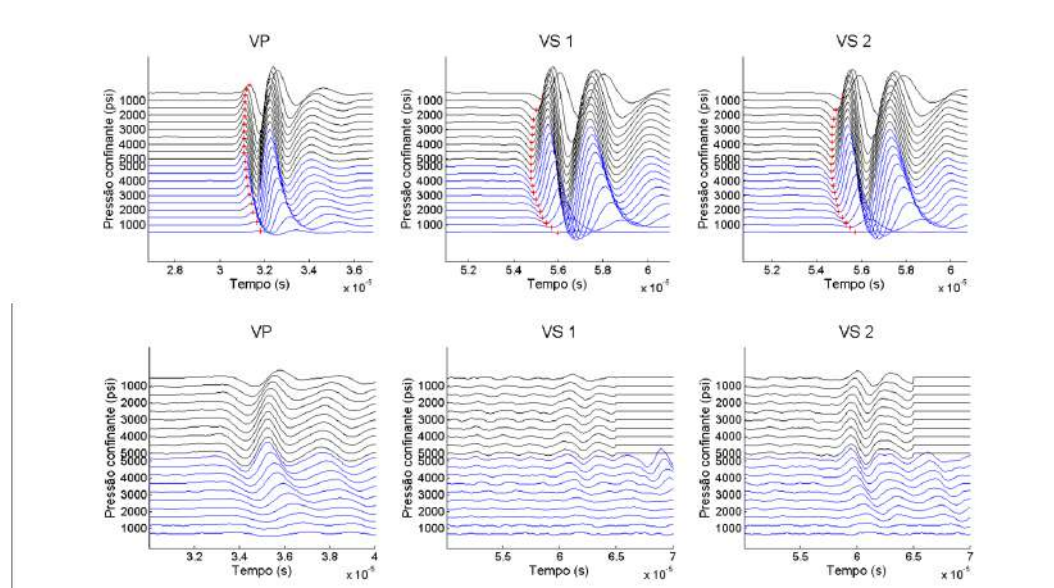


Figura 4.22 – Comparação entre as análises de velocidade das amostras PE-D-3 (gráficos superiores) e PE-G-2 (gráficos inferiores). Notar a baixa relação sinal-ruído na amostra PE-G-2 dificultando a identificação dos eventos.

Amostra	VP	VS1	VS2	K	μ	E	RP
	m/s	m/s	m/s	GPa	GPa	GPa	
PE-A-1*	4284	2474	2478	20,59	12,40	30,98	0,25
PE-A-2	4377	2484	2487	22,46	12,71	32,08	0,26
PE-A-3	4436	2534	2538	21,96	12,72	31,98	0,26
PE-B-1	4301	2466	2461	20,94	12,22	30,68	0,26
PE-B-2	4380	2506	2510	21,80	12,70	31,91	0,26
PE-B-3	4317	2477	2480	20,77	12,22	30,64	0,25
PE-C-1	4563	2617	2618	25,47	14,93	37,47	0,25
PE-C-2	4540	2599	2615	24,78	14,59	36,59	0,25
PE-C-3	4476	2570	2568	24,04	14,12	35,42	0,25
PE-C-4	4560	2631	2622	24,32	14,47	36,22	0,25
PE-C-5	4574	2618	2624	25,19	14,72	36,95	0,26
PE-C-6	4566	2619	2621	25,13	14,74	36,99	0,25
PE-C-7	4565	2617	2622	25,11	14,74	36,98	0,25
PE-D-1	4560	2617	2624	24,83	14,66	36,74	0,25
PE-D-2	4558	2628	2617	24,71	14,64	36,68	0,25
PE-D-3	4551	2616	2620	24,38	14,43	36,16	0,25
PE-E-1	4545	2621	2612	24,52	14,56	36,45	0,25
PE-E-2	4588	2625	2625	25,52	14,82	37,25	0,26
PE-E-3	4565	2626	2620	24,64	14,53	36,43	0,25
PE-F-1	4516	2622	2695	23,68	15,26	37,68	0,23
PE-F-2	4609	2550	2546	26,38	13,61	34,84	0,28
PE-F-3	4581	2695	2682	24,21	15,43	38,17	0,24
PE-H-1	4056	2149	1999	17,00	6,82	18,06	0,32
PE-I-1	4282	2425	2400	21,78	11,99	30,40	0,27
PE-J-1	4545	2611	2611	24,68	14,54	36,46	0,25
PE-J-2	4524	2583	2583	24,92	14,38	36,18	0,26
PE-K-1	4542	2601	2577	24,82	14,23	35,85	0,26
PE-K-2	4578	2607	2622	25,26	14,58	36,68	0,26
PE-K-3	4583	2678	2608	25,00	14,94	37,37	0,25

Tabela 4.10 – Resumo dos resultados da interpretação da análise de velocidade para as amostras de evaporitos utilizadas nesta dissertação. A amostra PE-A-1 rompeu durante o ensaio. Valores para tensão de confinamento igual a 5000 psi. Para o cálculo dos módulos elásticos foi considerado o valor médio das duas ondas cisalhantes.

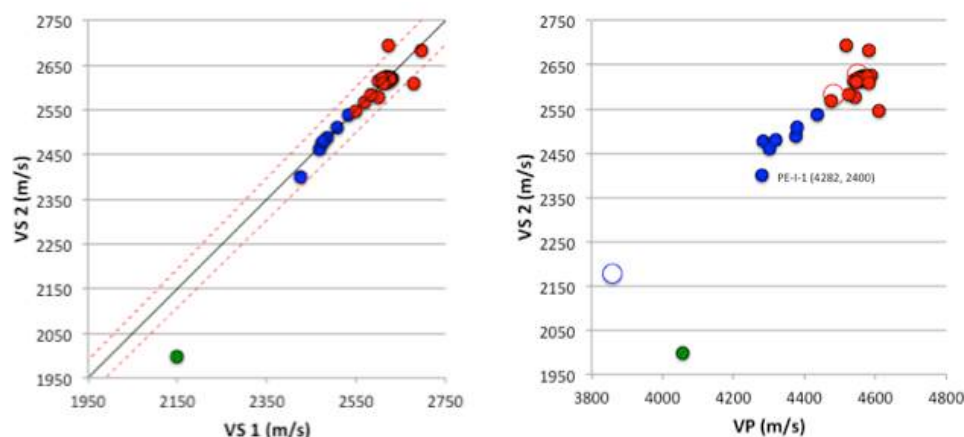


Figura 4.23 – Gráficos de correlação entre as velocidades cisalhantes com polarizações ortogonais (VS1 e VS2) e entre a velocidade compressional e cisalhante para tensão de confinamento de 5000 psi. No gráfico da esquerda a reta preta indica valores idênticos (1:1), enquanto que as retas tracejadas indicam a variação de 2% positivo e negativo. As amostras de halita estão representadas por círculos vermelhos preenchidos, as amostras de silvinita por círculos azuis preenchidos e a amostra de carnalita pelo círculo verde preenchido. Os círculos sem preenchimento são os valores da referência 4 da tabela 4.4, mostrando uma excelente concordância com a literatura.

Na figura 4.23, gráfico da direita, está representada a relação entre VP e VS para todas as amostras analisadas. Para este gráfico escolheu-se o valor de VS2 como onda cisalhante. Os valores de velocidades da referência 4, tabela 4.4, da halita e silvita, também estão representados no gráfico. Podemos observar uma boa coerência entre os valores medidos e os valores da referência no caso da halita. As amostras de silvinita parecem se situar entre os valores do mineral halita e do mineral silvita. A amostra de carnalita parece destoar da tendência das amostras de halita e silvita. Infelizmente não dispomos de valor de velocidade de referência para a carnalita.

Os valores de velocidades e módulos elásticos da tabela 4.10 foram analisados e organizados quanto à mineralogia e classe das amostras de maneira semelhante ao que foi feito na análise de massa específica dos grãos. Os resultados estão apresentados nas tabelas 4.11 e 4.12. Os valores dos módulos elásticos apresentam pequena variação dentro de uma mesma litologia. Posteriormente estes valores serão comparados com os módulos elásticos obtidos em ensaios de compressão triaxial (ensaios estáticos).

		Amostras		VP (m/s)		VS1 (m/s)		VS2 (m/s)	
				Média	DP	Média	DP	Média	DP
Halita Total	21			4557	28	2617	31	2616	32
Halita Pura	12			4565	25	2624	36	2621	39
C	7			4549	34	2610	20	2613	20
D	3			4556	4	2620	7	2620	4
E	3			4566	22	2624	3	2619	7
F	3			4569	48	2622	73	2641	83
J	2			4534	15	2597	20	2597	20
K	3			4567	22	2629	43	2602	23
Silvinita	7			4339	59	2481	34	2479	43
A	3			4366	77	2497	32	2501	32
B	3			4333	42	2483	21	2484	24
I	1			4282	-	2425	-	2400	-
Carnalita	1			4056	-	2149	-	1999	-

Tabela 4.11 – Resultado da análise de velocidade. Valores médios e desvio padrão.

		Amostras		K (GPa)		μ (GPa)		E (GPa)		RP	
				Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Halita Total	21			24,84	0,58	14,61	0,38	36,65	0,76	0,25	0,01
Halita Pura	12			24,83	0,69	14,64	0,47	36,69	0,88	0,25	0,01
C	7			24,86	0,51	14,61	0,26	36,66	0,67	0,25	0,00
D	3			24,64	0,24	14,58	0,13	36,53	0,32	0,25	0,00
E	3			24,89	0,55	14,64	0,16	36,71	0,47	0,25	0,00
F	3			24,76	1,43	14,76	1,00	36,90	1,80	0,25	0,03
J	2			24,80	0,18	14,46	0,11	36,32	0,20	0,26	0,00
K	3			25,02	0,22	14,58	0,35	36,63	0,76	0,26	0,00
Silvinita	7			21,47	0,70	12,42	0,29	31,24	0,72	0,26	0,01
A	3			21,67	0,96	12,61	0,18	31,68	0,61	0,26	0,01
B	3			21,17	0,55	12,38	0,28	31,08	0,72	0,26	0,00
I	1			21,78	0,00	11,99	-	30,40	-	0,27	-
Carnalita	1			17,00	0,00	6,82	-	18,06	-	0,32	-

Tabela 4.12 – Resultado da análise de velocidade para os módulos elásticos. Valores médios e desvio padrão.

As amostras de silvinita aparentam mostrar uma bem definida relação entre a velocidade e o teor de halita calculado na tabela 4.7, assim como na massa específica do mineral. Os gráficos da figura 4.24 indicam o aumento na velocidade com o aumento do teor de halita na amostra de silvinita.

Popp e Kern (1998) realizaram análises de velocidades ultrassônicas em amostras de halita do sal Gorleben na região dos evaporitos de Zechstein na Alemanha, figura 4.25. Os valores de velocidade foram ligeiramente inferiores às das halitas da tabela 4.10.

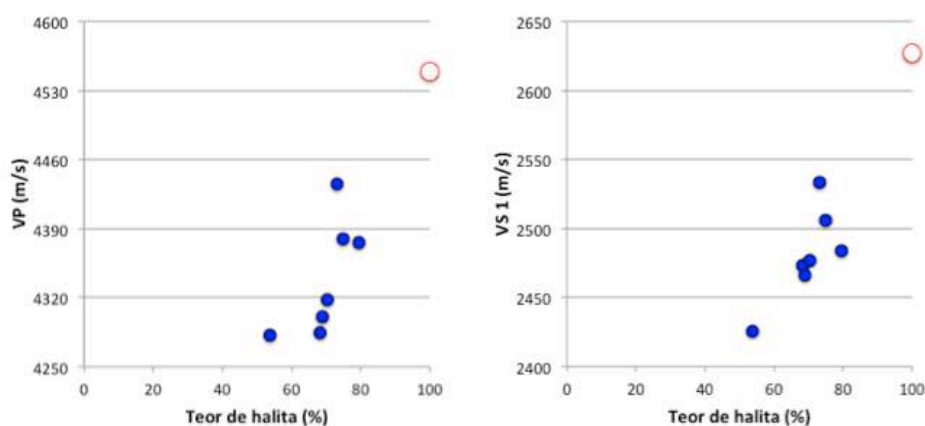


Figura 4.24 – Comparação entre as análises de velocidade das amostras de silvinita e o volume da fase halita definido na tabela 4.7. As amostras de silvinita estão representadas por círculos azuis preenchidos e o valor de halita da referencia 4 da tabela 4.4 por círculo vermelho sem preenchimento.

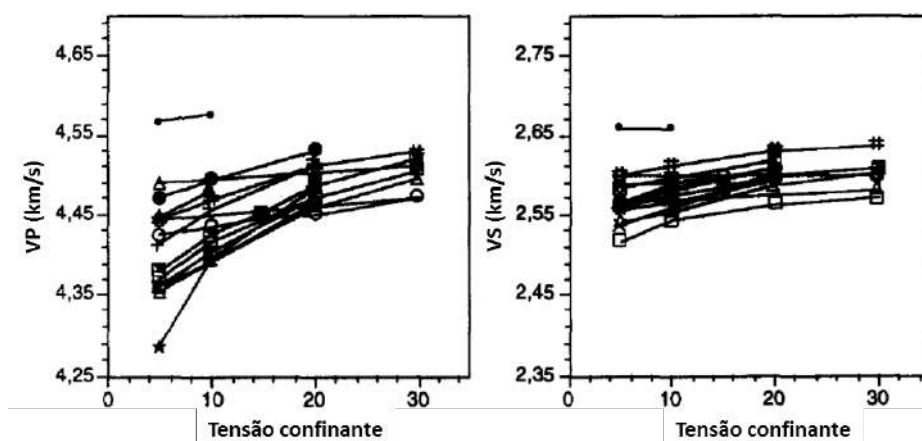


Figura 4.25 – Velocidade compressional (VP) e cisalhante (VS) em função da tensão confinante ou pressão confinante, Popp e Kern (1998).

4.3.1.1.

Modelagem Ultrassônica Via Método das Diferenças Finitas

A microtomografia realizada na amostra PE-I-1 caracterizou muito bem a distribuição das duas fases minerais que constituem a amostra. A análise de massa específica dos grãos caracterizou quantitativamente o teor de halita nas amostras de silvinita, variando entre 50% a 80%, tabela 4.7. A fim de aumentar o intervalo de distribuição de halita, e assim caracterizar o comportamento elástico em amostras com teor de halita não representados nas amostras analisadas, é proposto a utilização de modelagem numérica.

O método consiste em resolver a equação da onda através de métodos numéricos para um modelo matemático criado a partir dos microtomogramas gerados na análise de microtomografia.

No exemplo desenvolvido nesta dissertação utilizaremos a solução acústica em 2D via diferenças finitas. Foi selecionado um microtomograma da região central da amostra PE-I-1 que posteriormente foi segmentado em duas fases, halita e silvita, figura 4.26. Por ser uma modelagem acústica, apenas a propriedade de velocidade compressional é necessária, foram utilizados os valores da referência 4 na tabela 4.4. A imagem tem dimensão de 1222x701 pixels. A resolução é de 36,5 μm , mas para efeito de simplificação será considerado 40 μm a distância entre os pixels. Com isso a seção mede em escala 48,88mm x 28,04mm.

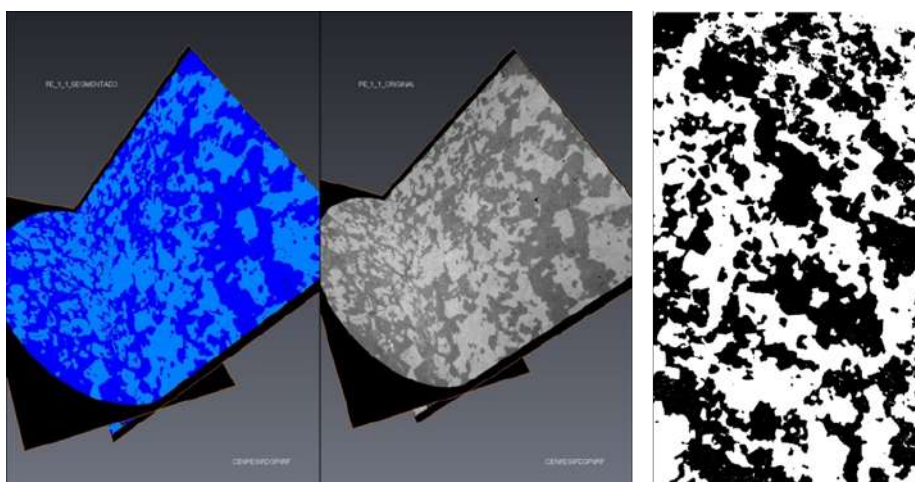


Figura 4.26 – Microtomografia da amostra PE-I-1. A imagem da direita ilustra o microtomograma utilizado na modelagem numérica. Em preto a fase silvita e em branco a fase halita. A imagem tem dimensão de 1222x701 pixels.

A equação diferencial parcial a ser resolvida é a equação hiperbólica acústica da onda em duas dimensões (2D), equação 4.5, onde P é o campo de pressão, x e z são coordenadas cartesianas, t é o tempo e c é a velocidade compressional da onda acústica.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2(x, z) \left[\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right] \quad (4.5)$$

Fernandes et al. (2009) apresentam solução para esta equação utilizando a aproximação de segunda ordem para a segunda derivada via diferenças finitas dada pela equação 4.6

$$P_{(i,j)}^{n+1} = 2P_{(i,j)}^n - P_{(i,j)}^{n-1} + A[P_{(i-1,j)}^n - 4P_{(i,j)}^n + P_{(i+1,j)}^n + P_{(i,j-1)}^n + P_{(i,j+1)}^n] \quad (4.6)$$

Onde os operadores da equação 4.6 são $[1 \ -2 \ 1]$ e $A = \left(\frac{c\Delta t}{\Delta x}\right)^2$

Com a equação 4.6, é calculado o valor do campo de pressão para um tempo futuro $t=(n+1)\Delta t$, conhecendo os campos no tempo presente de $n\Delta t$ e passado de $(n-1)\Delta t$

Para um melhor resultado utiliza-se o operador de quarta ordem na equação 4.5, para a segunda derivada, equação 4.7.

$$\begin{aligned} P_{(i,j)}^{n+2} = & -P_{(i,j)}^{n-2} + 16P_{(i,j)}^{n-1} + 30P_{(i,j)}^n + 16P_{(i,j)}^{n+1} \\ & + A[-P_{(i-2,j)}^n + 16P_{(i-1,j)}^n + 60P_{(i,j)}^n + 16P_{(i+1,j)}^n - P_{(i+2,j)}^n \\ & - P_{(i,j-2)}^n + 16P_{(i,j-1)}^n + 16P_{(i,j+1)}^n - P_{(i,j+2)}^n] \end{aligned} \quad (4.7)$$

Onde os operadores da equação 4.7 são $[-1 \ 16 \ 30 \ 16 \ -1]$.

Desta forma é determinado o campo de pressão em $t=(n+2)\Delta t$ conhecendo os campos em $(n+1)\Delta t$, $n\Delta t$, $(n-1)\Delta t$ e em $(n-2)\Delta t$. Questões sobre dispersão numérica podem ser acompanhadas em Fernandes *et al.* (2009).

A partir desta solução via diferenças finitas foi escrito um código em Matlab para resolver a equação da onda acústica em duas dimensões. O dado de entrada é uma seção 2D, obtida de um microtomograma na região central da amostra PE-I-1, com os valores de velocidade compressional definidos em cada ponto. O código simula o pulso sísmico com uma função do tipo Ricker. Inicialmente programado

para modelagem na escala sísmica este código foi adaptado para simular a propagação de ondas acústicas em amostras centimétricas, a fim de se comparar os resultados com a análise de propagação de pulsos ultrassônicos. Desta maneira a fonte sísmica do tipo *ricker* selecionada possui frequência central de 700 kHz.

Nesta modelagem é definida a posição da fonte e do receptor nos pontos 200 e 1200 na direção y da seção 2D. Simulando os cristais piezelétricos do método ultrassônico. Para simular uma onda plana foi definido em 200 pontos o comprimento da fonte e do receptor, centralizados no ponto 350 na direção x da seção 2D. Na figura 4.27 estão apresentados os resultados desta simulação para diferentes tempos após a emissão do sinal (*snapshots*). Como não foi feita nenhuma operação de suavização de borda, os eventos refletem nas laterais da imagem. Por estarmos interessados no tempo de chegada da onda primária, figura 4.28, além de ser uma simulação acústica, estes efeitos não são relevantes.

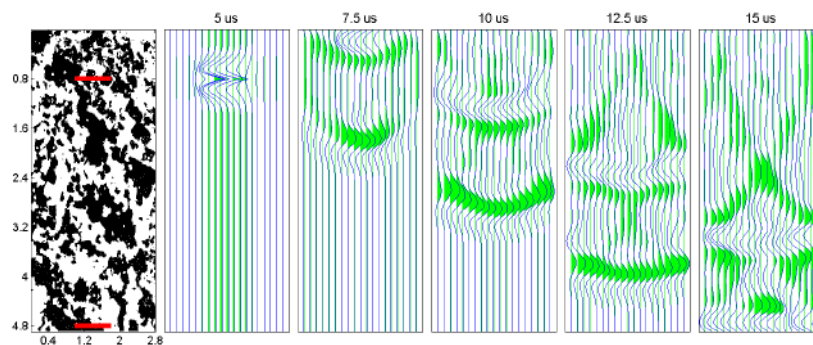


Figura 4.27 – Resultado da simulação por diferenças finitas. São mostrados vários *snapshots* a partir da emissão do sinal. As linhas vermelhas indicam a posição do emissor (superior) e do receptor (inferior).

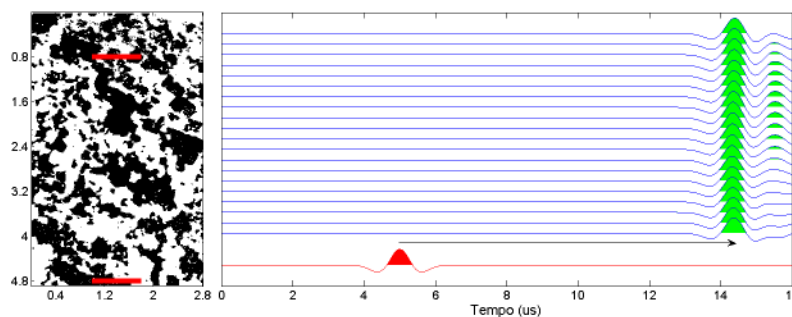


Figura 4.28 – Figura esquemática mostrando o cálculo da velocidade. Relação simples entre a distância do emissor ao receptor e o tempo gasto durante a propagação do pulso na amostra (seta preta). Em vermelho o sinal da fonte (*ricker*) e em verde os receptores.

Por ser uma simulação acústica não é esperado que ocorra atenuação do sinal durante a propagação do pulso, de maneira que toda mudança de amplitude está relacionada à divergência esférica. Desta maneira para calcular o tempo gasto durante a propagação do sinal na amostra basta identificar a posição no tempo de um mesmo evento na fonte e no receptor, figura 4.28. A velocidade compressional é calculada dividindo a distância entre o emissor e o receptor pelo tempo.

A utilização de modelagem de propagação de ondas através do método de diferenças finitas na indústria do petróleo é muito comum. As informações obtidas com estas análises auxiliam no desenvolvimento da campanha de aquisição sísmica e no processamento sísmico. Em geral a equação da onda é resolvida em 3D considerando o caso elástico ou poroelástico. Na figura 4.29 comparamos os resultados do código implementado em Matlab com o código utilizado na Petrobras, incluindo procedimento de atenuação das bordas, desenvolvido pela gerência de Geofísica do seu centro de pesquisas. Apenas como informação, a mesma simulação que necessita de pouco mais de 10 minutos quando executado na plataforma Matlab demora menos de 10 segundos na solução otimizada para processamento em GPU.

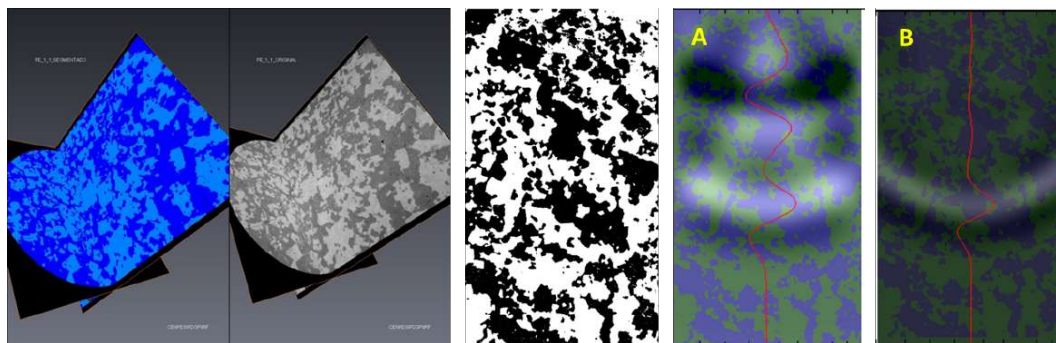


Figura 4.29 – Resultado da simulação por diferenças finitas. Em A o modelo implementado em Matlab. Em B o modelo utilizado na Petrobras. Note que o modelo B não apresenta o efeito de reflexão nas bordas do modelo.

A fim de se estudar o efeito do teor de halita na propriedade de velocidade P em silvinitas foram feitas simulações aumentando e diminuindo o teor de halita na seção 2D definida na figura 4.26. Com um algoritmo simples, que a cada passo acrescenta ou diminui um pixel no contato entre a halita e a silvita, foram criados 20 modelos a partir de perturbação do modelo inicial, figura 4.30.

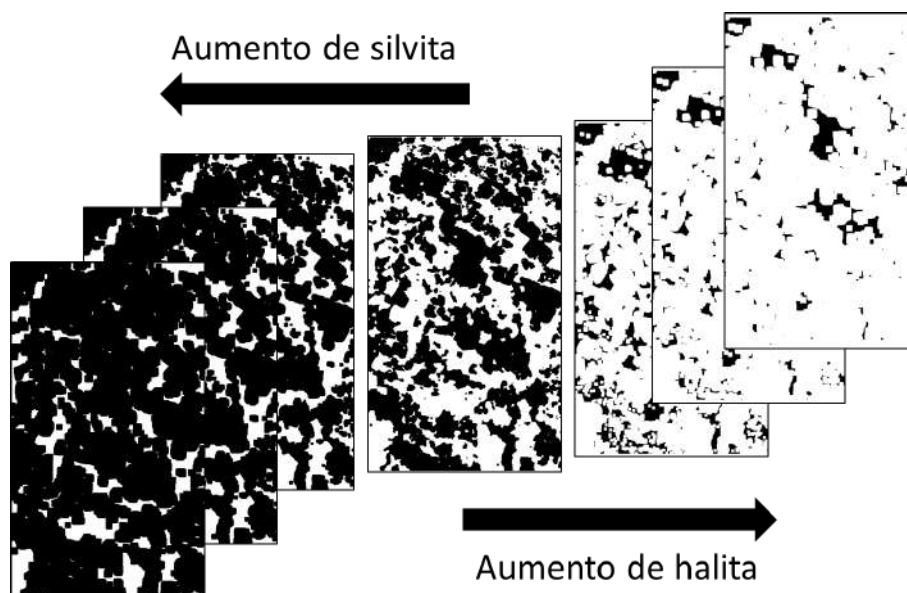


Figura 4.30 – Figura esquemática mostrando as simulações de mudança do teor de halita em amostra de silvinita.

Na figura 4.31 estão apresentados os resultados para esta modelagem. As curvas vermelha e preta do gráfico da direita são os limites teóricos de Voigt (média aritmética) e Reuss (média harmônica) para os módulos da mistura de minerais. Para que o resultado seja confiável, os valores calculados deve estar entre estes dois limites. As amostras de silvinita, círculos verdes, apresentam valores sistematicamente inferiores de velocidade para um mesmo teor de halita. Isto deve ao fato de que a modelagem de diferenças finitas foi realizada sem considerar a porosidade, mesmo que pequena, presente nas amostras de silvinita. Para corrigir este efeito é necessário fazer o uso do modelo de porosidade crítica (Mavko *et al.*, 2003), equação 4.8.

$$K_{dry} = K_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_c} \right) \quad (4.8)$$

O valor de ϕ_c definido para rochas salinas é de 40% (Mavko *et al.*, 2003). Feitas as correções, as amostras de silvinita medidas no laboratório apresentaram um ajuste melhor, considerando a presença de 1% a 2% de porosidade. Os valores de velocidade estão entre os limites teóricos. A amostra PE-A-3 aparenta estar com o teor de halita subestimado.

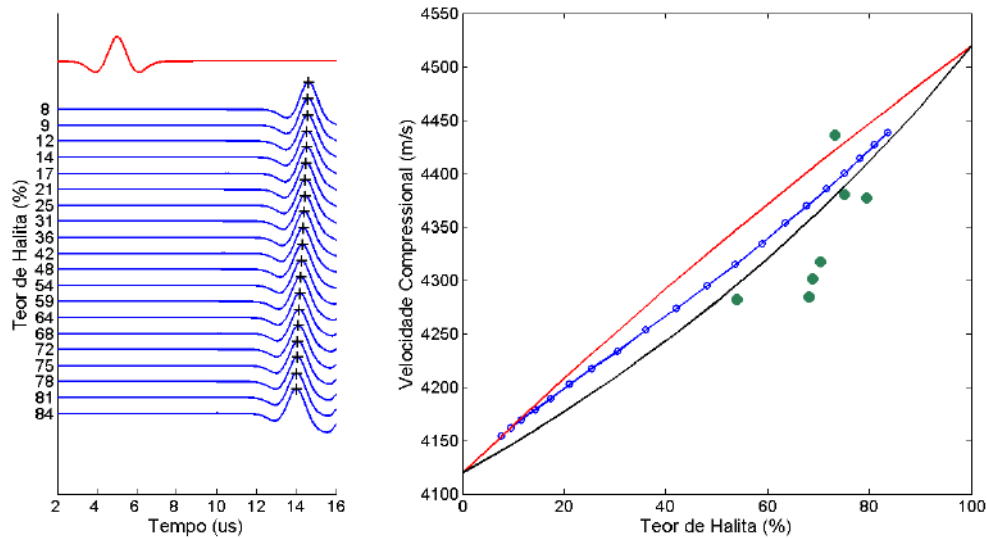


Figura 4.31 – Resultado da simulação por diferenças finitas. Gráfico da esquerda mostrando as formas de onda para cada um dos cenários simulados. Gráfico da direita mostrando o valor de velocidade obtido, linha azul. Em vermelho e preto os limites teóricos de Voigt e Reuss. Em verde estão plotadas as velocidades P das amostras de silvinita, figura 4.24.

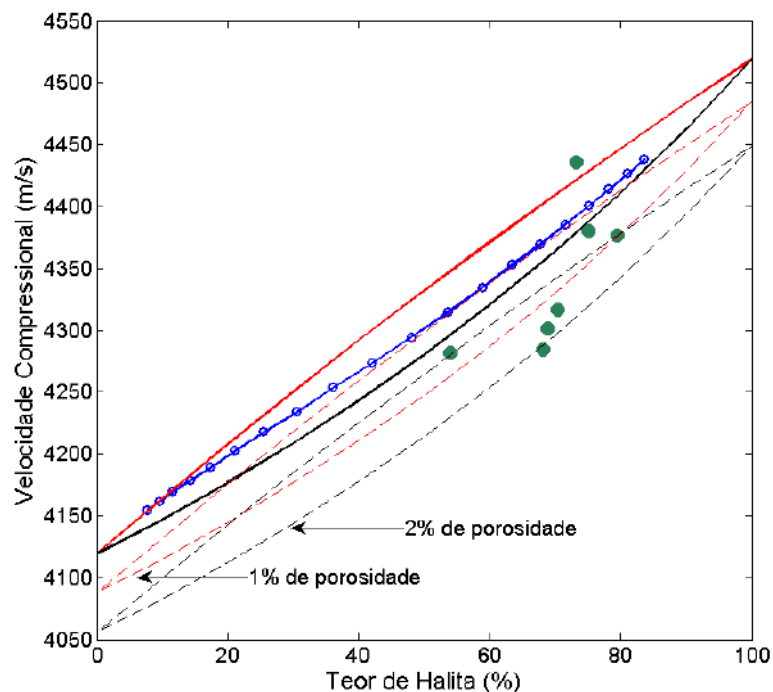


Figura 4.32 – Correlação entre o teor de halita e a velocidade. Modelo considerando 1% e 2% de porosidade. A amostra PE-A-3 que apresenta o maior valor de velocidade aparenta estar com o teor de halita subestimado.

4.3.2. Método Estático – Ensaio Triaxial

Por ser um ensaio destrutivo, o ensaio de compressão triaxial foi o último a ser realizado na sequência de análise definida para a caracterização mineralógica, volumétrica e elástica das amostras de evaporitos. Foram realizados ao todo dez experimentos em amostras distintas. Quatro com controle de taxa de tensão e seis com controle de taxa de deformação, estes últimos motivados pela observação dos resultados iniciais. Optamos por realizar estes ensaios apenas em amostras de halita. Apenas o ensaio realizado na amostra PE-C-3, figura 4.20, não pôde ser aproveitado, pois ocorreu um erro no equipamento da GCTS durante a etapa de gravação do arquivo.

Os experimentos foram definidos basicamente da seguinte forma: estágio inicial de carregamento e descarregamento hidrostático, para obtenção do módulo de compressão volumétrica (K), seguido pelo estágio de compressão triaxial com tensão desviadora variando com o tempo em até três ciclos de carregamento e descarregamento, para obtenção do módulo de Young e a razão de Poisson. A pressão confinante no estágio final foi mantida constante em 35 MPa para nove dos experimentos, apenas para a amostra PE-E-3 ela foi de 20 MPa, afim de verificar o efeito da pressão confinante nos resultados. A tabela 4.13 resume a parametrização dos ensaios para cada uma das amostras.

Amostra	Controle	Ciclo Hidrostático MPa	Tensão Desviadora Variável		
			Ciclo triaxial 1 MPa	Ciclo triaxial 2 MPa	Ciclo triaxial 3 MPa
PE-C-1	Tensão	0-80-5-35	20-10-20	40-30-40	-
PE-C-3			Erro no arquivo		
PE-K-2	Tensão	0-35-5-35	20-10-20	40-20-40	-
PE-K-3	Tensão	0-35-5-35	20-10-20	40-20-40	50-5
PE-D-1	Deformação	0-35-5-35	10-5-10	20-5-20	30-5-30
PE-D-2	Deformação	0-35-5-35	10-5-10	20-5-20	30-5-30
PE-D-3	Deformação	0-35-5-35	10-5-10	20-5-20	30-5-30
PE-E-1	Deformação	0-35-5-35	20--10-20	-	-
PE-E-2	Deformação	0-35-5-35	10-5-10	20-5-20	30-5-30
PE-E-3	Deformação	0-35-5-25	10-5-10	20-5-20	-

Tabela 4.13 – Parametrização dos ensaios de compressão triaxial.

Os primeiros ensaios foram realizados com controle de tensão, figura 4.33, com taxa de 0,1 MPa/s. Por ser um material que apresenta fluência optamos por uma taxa de tensão desviadora maior que o habitual em ensaios de rochas, a fim de evitar o efeito da fluência nas curvas de tensão e deformação. Entretanto os módulos elásticos obtidos nos ciclos triaxiais, principalmente a razão de Poisson sistematicamente próxima ou acima do valor teórico de 0,50, aparentemente sofreram influência deste efeito, tabela 4.14.

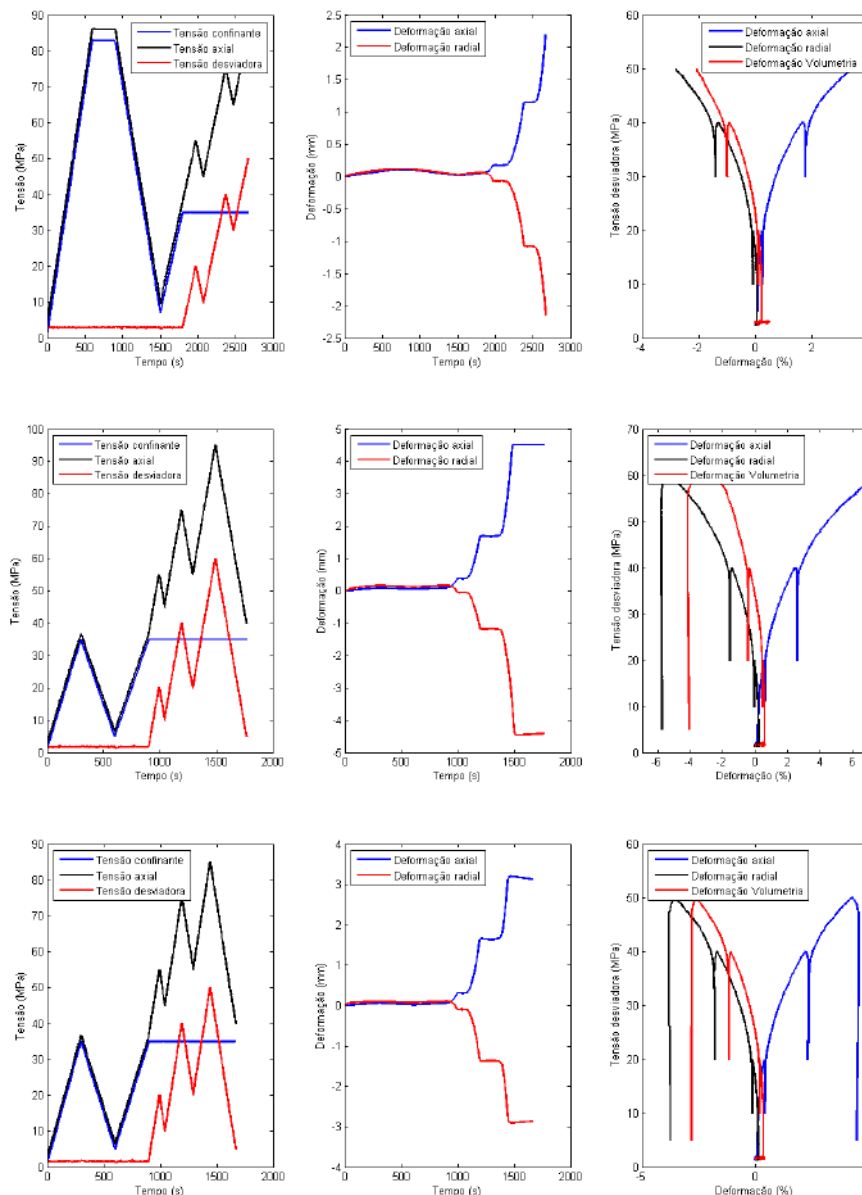


Figura 4.33 – Primeiros ensaios de compressão triaxial. A primeira coluna de gráficos ilustra a trajetória de tensão ao qual a amostra foi submetida. A segunda coluna mostra a deformação axial e radial com tempo. A terceira coluna mostra a curva típica de tensão e deformação para este tipo de ensaio triaxial. Os gráficos superiores se referem a amostra PE-C-1, os médios à amostra PE-K-2 e os inferiores à amostra PE-K-3.

Amostra	Ciclo Hidrostático K (GPa)	Ciclo Triaxial					
		Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
		E (GPa)	RP	E (GPa)	RP	E (GPa)	RP
PE-C-1	20,06	40,47	0,56	26,77	0,61	-	-
PE-K-2	13,80	34,40	0,43	34,49	0,45	-	-
PE-K-3	17,61	37,04	0,50	37,51	0,51	37,14	0,55

Tabela 4.14 – Resultado das análises iniciais de compressão triaxial. Em vermelho os valores razão de Poisson acima do valor teórico máximo para materiais elásticos e isotrópicos.

A princípio no ciclo hidrostático o efeito de fluência não deve ser observado, já que a pressão confinante aplicada deve ser suficiente para inibir a deformação por este efeito. Na figura 4.34 está ilustrado o exemplo da obtenção deste módulo para a amostra de halita com argila PE-C-1.

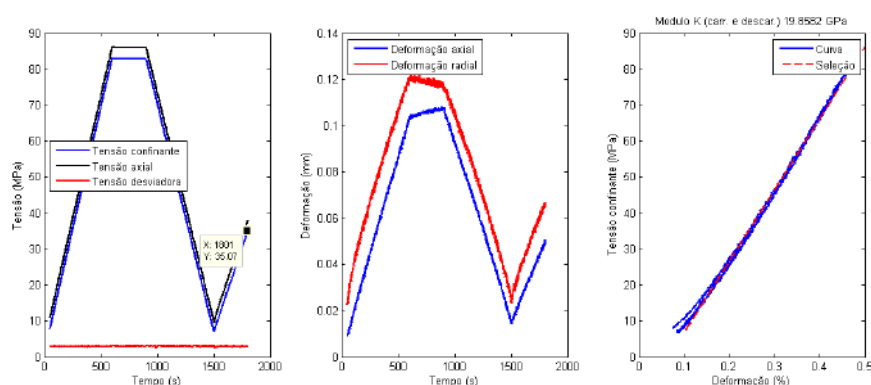


Figura 4.34 – Ciclo de descarregamento e carregamento hidrostático para a amostra PE-C-3. O ajuste linear para obtenção do módulo de compressão volumétrica (K) foi feito na parte do ciclo de tensão confinante (MPa) 80-5-35.

Ao analisarmos as taxas de tensão e de deformação ao longo do experimento foi possível notar que durante os ciclos de descarregamento e carregamento triaxiais a taxa de deformação era muito lenta, da ordem de 3×10^{-6} /s ou 0.0003 %/s, de maneira que o efeito de fluência do material se tornava relevante para o tempo do experimento, figura 4.35. De fato alguns autores como Liang *et al.* (2011), Liang *et al.* (2007) e Hatzor *et al.* (1997) sugerem taxas de deformação acima de 1×10^{-5} , a fim de evitar este efeito no experimento.

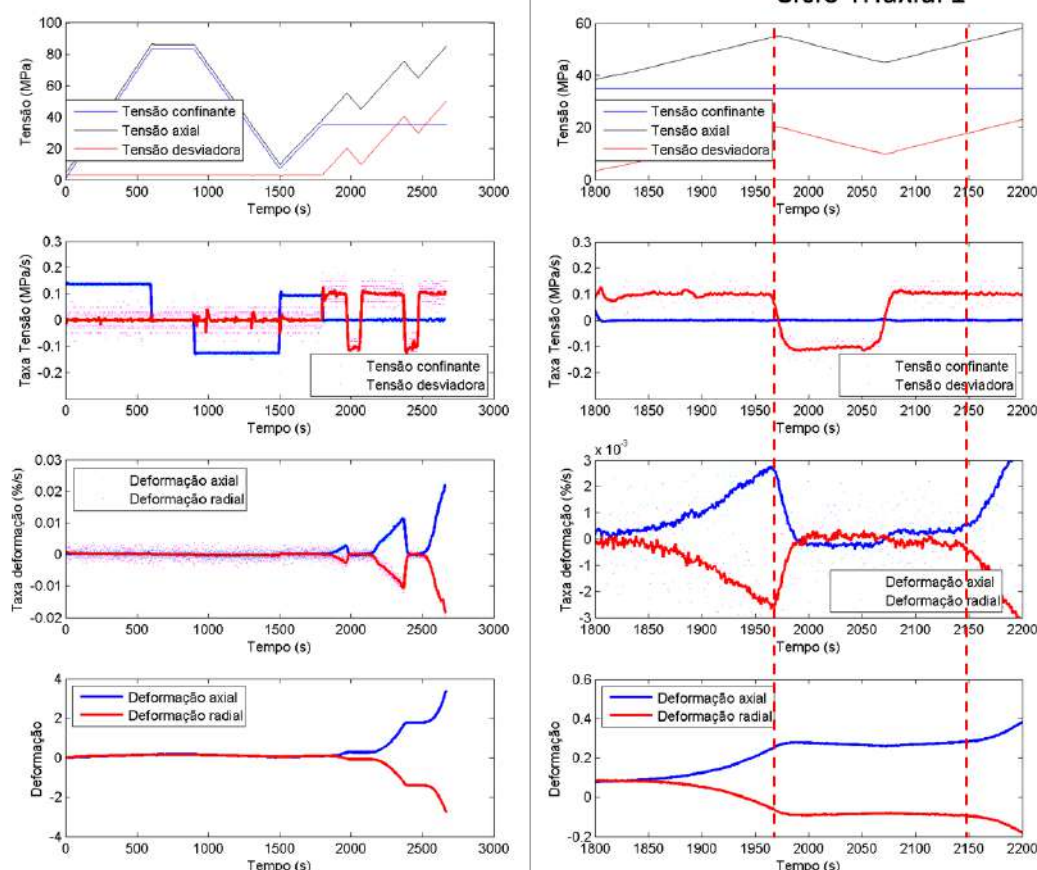


Figura 4.35 – Gráfico com as taxas de deformação e de tensão ao longo do experimento. Gráficos da segunda coluna se referem ao detalhe do primeiro ciclo triaxial da amostra PE-C-3.

A partir destas observações uma nova sequência de análises foi realizada. Desta vez mantendo o controle do experimento através da taxa de deformação constante durante o ciclo triaxial igual a 1×10^{-5} /s ou 0.001%/s. Inicialmente foram realizados três experimentos nas amostras da classe E, tabela 4.15 e figura 4.36.

Amostra	Ciclo Hidrostático K (GPa)	Ciclo Triaxial					
		Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
		E (GPa)	RP	E (GPa)	RP	E (GPa)	RP
PE-E-1	22,53	29,76	0,46	-	-	-	-
PE-E-2	22,23	37,46	0,13	34,6	0,26	34,7	0,27
PE-E-3	22,98	34,26	0,26	25,37	0,34	23,46	0,13

Tabela 4.15 – Resultado das análises iniciais de compressão triaxial. Amostras de halita da classe E.

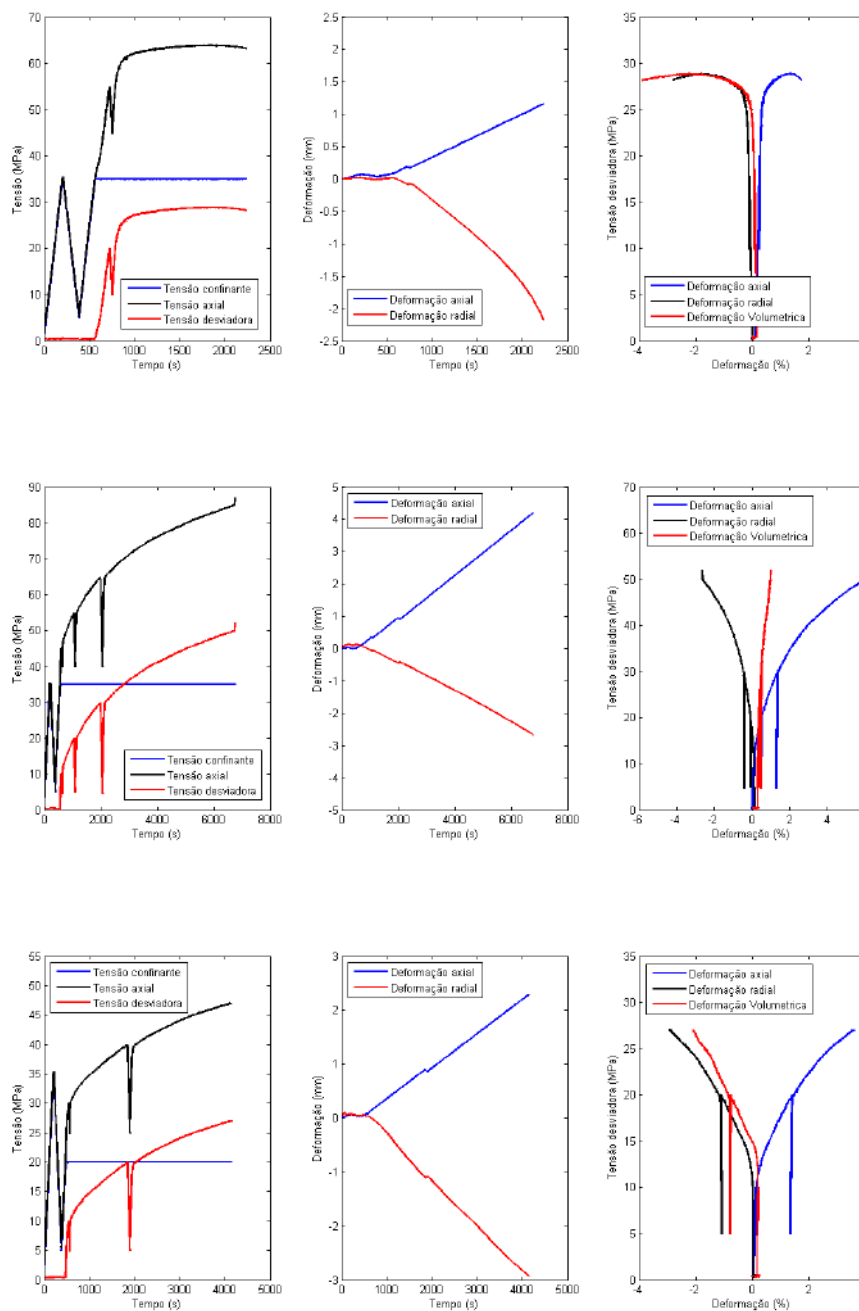


Figura 4.36 – Ensaio de compressão triaxial para as amostras da classe E. A primeira coluna de gráficos ilustra a trajetória de tensão ao qual a amostra foi submetida. A segunda coluna mostra a deformação axial e radial com tempo. A terceira coluna mostra a curva típica de tensão e deformação para este tipo de ensaio triaxial. Os gráficos superiores se referem a amostra PE-E-1, os médios à amostra PE-E-2 e os inferiores à amostra PE-E-3.

Os resultados se mostraram bem mais consistentes do que os anteriores. Os valores do módulo de compressibilidade volumétrica obtidos para as três amostras da mesma classe foram muito próximos, o que era de se esperar dada a

homogeneidade das amostras. Os valores de razão de Poisson foram inferiores ao limite teórico de 0.50 e no caso das amostras PE-E-2 e PE-E-3 se aproximaram do valor obtido nos ensaios dinâmicos de caracterização elástica (0.25). Utilizando a teoria da elasticidade, junto com a sua premissa de isotropia, é possível calcular qualquer um dos parâmetros elásticos a partir de dois outros quaisquer. Esta é uma maneira fácil de identificar se os experimentos realizados ocorreram no domínio elástico, para tal se comparou a razão de Poisson obtida durante os ciclos de carregamento e descarregamento como o valor esperado pela teoria, tabela 4.16. A razão de Poisson, para meios elásticos e isotrópicos, pode ser obtida através da relação entre os módulos K e E, segundo a equação abaixo:

$$RP = \frac{3K-E}{6K} \quad (4.5)$$

Amostra	Ciclo	K (GPa)	E (GPa)	RP	RP elast
PE-E-1	Ciclo 1	22,53	29,76	0,46	0,28
PE-E-2	Ciclo 1	22,23	37,46	0,13	0,22
PE-E-2	Ciclo 2	22,23	34,6	0,26	0,24
PE-E-2	Ciclo 3	22,23	34,7	0,27	0,24
PE-E-3	Ciclo 1	22,98	34,26	0,26	0,25
PE-E-3	Ciclo 2	22,98	25,37	0,34	0,32
PE-E-3	Ciclo 3	22,98	23,46	0,13	0,33

Tabela 4.16 – Comparação entre os valores de razão de Poisson obtidos na análise de compressão triaxial (RP) e o valor teórico (RP elast).

A mesma análise quanto às taxas de tensão e de deformação ao longo do experimento foi realizada para estas amostras, figura 4.37. Os ciclos de descarregamento e carregamento triaxiais apresentam a taxa de deformação axial de $1 \times 10^{-5}/s$ ou 0.001 %/s definida como parâmetro do ensaio. Comparado aos ensaios iniciais a taxa de tensão axial é bem pequena, modificando seu módulo apenas nos ciclos de carregamento e descarregamento, onde chega a valores da ordem de 0.5 MPa/s. Nos ensaios iniciais as taxas de tensão axial eram da ordem de 1 MPa/s, figura 4.35.

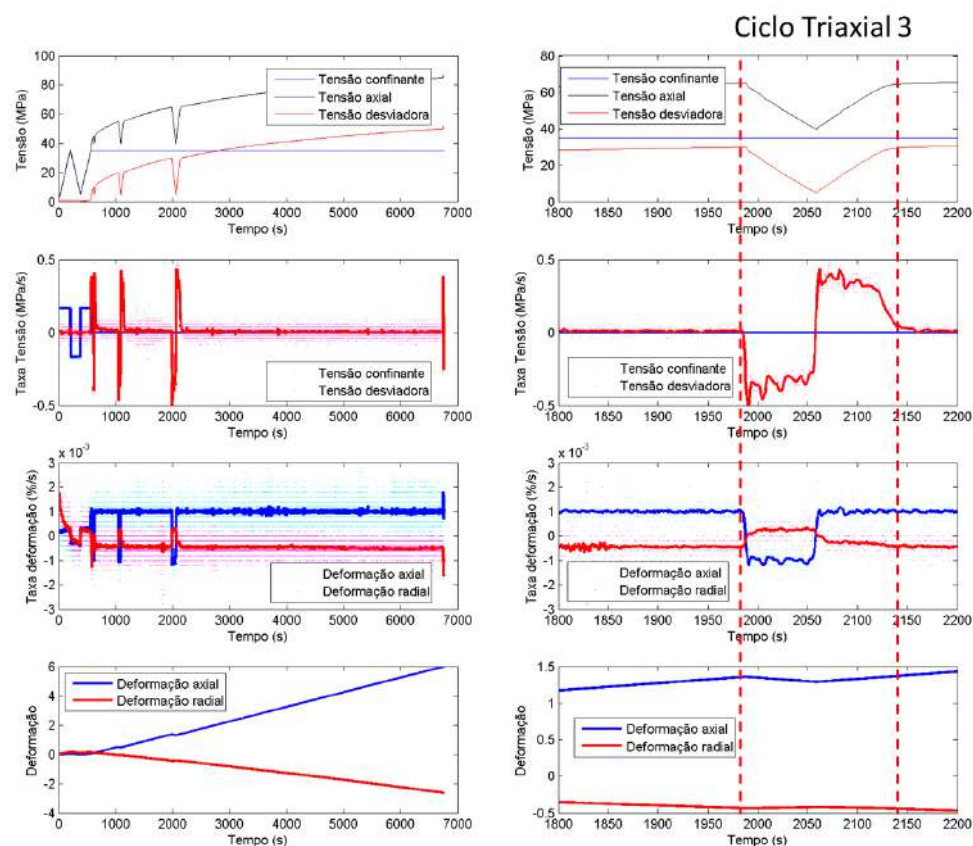


Figura 4.37 – Gráfico com as taxas de deformação e de tensão. Gráficos da segunda coluna se referem ao detalhe do terceiro ciclo triaxial da amostra PE-E-2.

Utilizando a taxa de deformação axial de $1 \times 10^{-5}/s$ ou $0.001\%/s$ foram analisadas as amostras da classe D, tabela 4.17 e figura 4.38. Apesar dos valores de módulo volumétrico próximos, apenas a amostra PE-D-1 apresentou valores de módulos elásticos coerentes com o estado de tensão aplicado. Os valores de razão de Poisson das amostras PE-D-2 e PE-D-3 não foram altos ou além do limite teórico como nas análises iniciais, mas também não resguardou a relação com a teoria da elasticidade, tabela 4.18, calculados a partir de K e E.

Amostra	Ciclo Hidrostático K (GPa)	Ciclo Triaxial					
		Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
		E (GPa)	RP	E (GPa)	RP	E (GPa)	RP
PE-D-1	22,97	36,50	0,26	33,94	0,29	34,89	0,29
PE-D-2	23,30	36,81	0,14	32,32	0,05	28,74	0,07
PE-D-3	24,71	23,04	0,08	27,45	0,06	32,36	0,20

Tabela 4.17 – Resultado das análises iniciais de compressão triaxial. Amostras de halita da classe D.

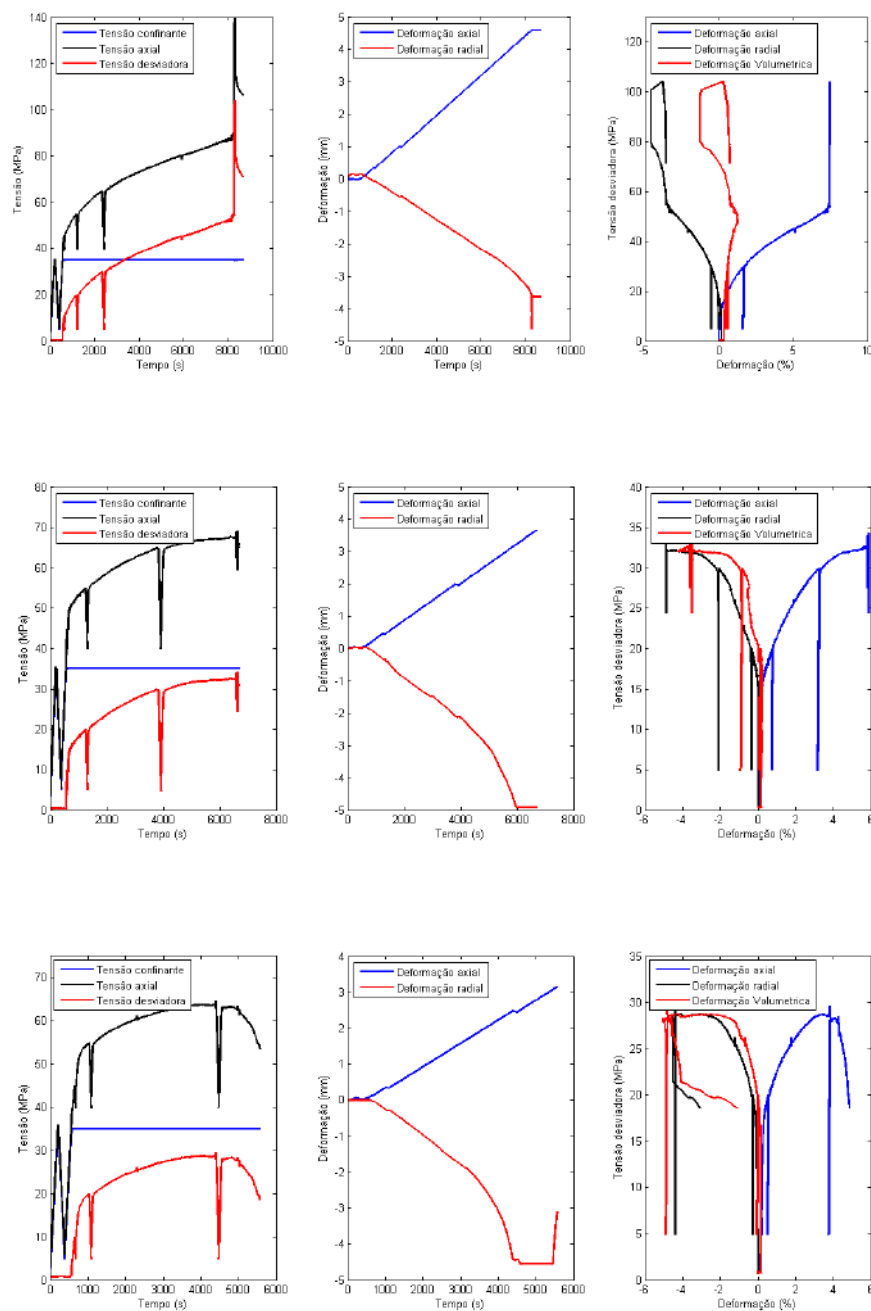


Figura 4.38 – Ensaio de compressão triaxial para as amostras da classe D. A primeira coluna de gráficos ilustra o padrão de tensão ao qual a amostra foi submetida. A segunda coluna mostra a deformação axial e radial com tempo. A terceira coluna mostra a curva típica de tensão e deformação para este tipo de ensaio triaxial. Os gráficos superiores se referem a amostra PE-D-1, os médios à amostra PE-D-2 e os inferiores à amostra PE-D-3.

Amostra	Ciclo	K (GPa)	E (GPa)	RP	RP elast
PE-D-1	Ciclo 1	22,97	36,5	0,26	0,24
PE-D-1	Ciclo 2	22,97	33,94	0,29	0,25
PE-D-1	Ciclo 3	22,97	34,89	0,29	0,25
PE-D-2	Ciclo 1	23,30	36,81	0,14	0,24
PE-D-2	Ciclo 2	23,30	32,32	0,05	0,27
PE-D-2	Ciclo 3	23,30	28,74	0,07	0,29
PE-D-3	Ciclo 1	24,71	23,04	0,08	0,34
PE-D-3	Ciclo 2	24,71	27,45	0,06	0,31
PE-D-3	Ciclo 3	24,71	32,36	0,20	0,28

Tabela 4.18 – Comparação entre os valores de razão de Poisson obtidos na análise de compressão triaxial (RP) e o valor teórico (RP elast) calculado a partir de K e E.

4.3.3.

Comparação Entre os Resultados Dinâmicos e Estáticos

Grande parte dos estudos mecânicos realizados atualmente em rochas evaporíticas está focada no comportamento de fluência do material como, por exemplo, em Costa *et al.* (2010), Schoenherr et al. (2007), Poiate Jr *et al.* (2006). Uma curva típica de fluência de material evaporítico apresenta três estágios, figura 4.39. A partir da imposição de tensão desviadora constante o material se deforma com uma taxa muito alta que vai decrescendo até atingir uma taxa constante, fluência primária e secundária. No estágio final, fluência terciária, a taxa de deformação volta a acelerar resultando na ruptura do material. A deformação destes três estágios ocorre após a deformação elástica instantânea do material e apresenta valores muito superiores de deformação.

Os estudos desta dissertação estão relacionados à região de deformação elástica do material, onde podemos obter os chamados módulos elásticos. A comparação dos módulos elásticos obtidos pelo método estático e pelo método dinâmico é apresentada a seguir.

Na tabela 4.19 estão reunidos os resultados de caracterização elástica pelos métodos dinâmico e estático. No método dinâmico os módulos elásticos são calculados a partir das informações de velocidade e densidade e apresentam um único valor para cada amostra. O método estático apresenta um único valor de módulo de compressão volumétrica e até três conjuntos de módulo de Young e razão de Poisson em função dos ciclos de carregamento e descarregamento.

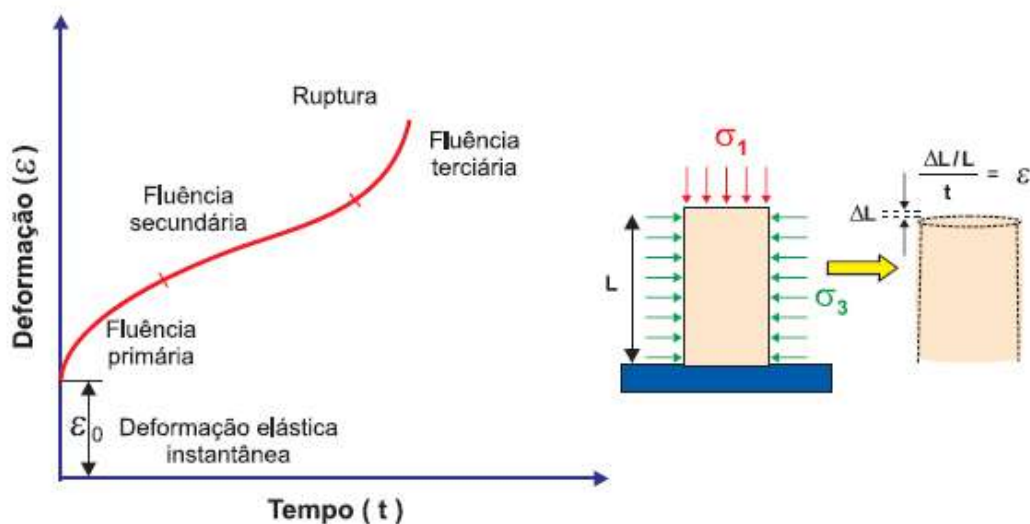


Figura 4.39 – Curva típica de Fluência do sal. Falcão *et al.* (2007).

Na figura 4.40 está ilustrada a comparação entre os módulos de compressão volumétrica estático e dinâmico para as nove amostras analisadas. A reta definida no gráfico corresponde a reta 1:1, de maneira que quanto mais próximo desta reta estiver o ponto, menor é a diferença entre os módulos estáticos e dinâmicos. As amostras da classe E e D apresentaram valores estáticos ligeiramente mais baixos que os dinâmicos, enquanto que as amostras PE-C-1, PE-K-2 e PE-K-3 os valores foram ainda menores.

A comparação entre os valores do módulo de Young está definida na figura 4.41. Semelhante ao caso do módulo de compressão volumétrica, quanto mais próximo a reta 1:1 menor é a diferença entre os valores estáticos e dinâmicos. Neste ponto podemos notar que nem todos os ciclos de carregamento e descarregamento efetuados numa amostra apresentam os mesmos valores, até porque o estado de tensão é diferente, entretanto muitas vezes eles também não guardam o caráter elástico. As amostras que apresentaram valores de razão de Poisson próximo a 0,25 apresentaram módulo de Young estático ligeiramente inferior ao dinâmico.

Na figura 4.42 está plotada a correlação entre os módulos de Young e o módulo de compressão volumétrico. Os valores dinâmicos da tabela 4.19 estão plotados na forma de cruz de cor azul enquanto que os resultados estáticos estão plotados como a escala da figura.

Amostra	Estático				Dinâmico		
	Ciclo	K (GPa)	E (GPa)	RP	K (GPa)	E (GPa)	RP (GPa)
PE-C-1	Ciclo 1	20,06	40,47	0,56	25,47	37,47	0,25
	Ciclo 2	20,06	26,77	0,61			
PE-K-2	Ciclo 1	13,8	34,40	0,43	25,26	36,68	0,26
	Ciclo 2	13,8	34,49	0,45			
PE-K-3	Ciclo 1	17,61	37,04	0,50	25,00	37,37	0,25
	Ciclo 2	17,61	37,51	0,51			
	Ciclo 3	17,61	37,14	0,55			
PE-D-1	Ciclo 1	22,97	36,50	0,26	24,83	36,74	0,25
	Ciclo 2	22,97	33,94	0,29			
	Ciclo 3	22,97	34,89	0,29			
PE-D-2	Ciclo 1	23,3	36,81	0,14	24,71	36,68	0,25
	Ciclo 2	23,3	32,32	0,05			
	Ciclo 3	23,3	28,74	0,07			
PE-D-3	Ciclo 1	24,71	23,04	0,08	24,38	36,16	0,25
	Ciclo 2	24,71	27,45	0,06			
	Ciclo 3	24,71	32,36	0,20			
PE-E-1	Ciclo 1	22,53	29,76	0,46	24,52	36,45	0,25
PE-E-2	Ciclo 1	22,23	37,46	0,13	25,52	37,25	0,26
	Ciclo 2	22,23	34,60	0,26			
	Ciclo 3	22,23	34,70	0,27			
PE-E-3	Ciclo 1	22,98	34,26	0,26	24,64	36,43	0,25
	Ciclo 2	22,98	25,37	0,34			
	Ciclo 3	22,98	23,46	0,13			

Tabela 4.19 – Comparação entre os módulos elásticos obtidos em ensaios estáticos e dinâmicos.

A importância em comparar e validar os módulos elásticos obtidos pelos dois métodos está diretamente relacionada com a facilidade de se obter esta informação via método dinâmico. Em operações de perfuração, em poços de petróleo que perfuraram a seção evaporítica, normalmente são adquiridas informações de velocidade compressional, cisalhante e densidade do sal. Considerando as equações da elasticidade o módulo de Young, tão importante para cálculos de estabilidade de poços, pode ser calculado. Em amostras porosas, como arenitos e carbonatos a relação entre os módulos dinâmicos e estáticos não é tão facilmente obtida, mas se observa que quanto menor a porosidade mais os módulos dos obtidos pelos distintos métodos se aproximam.

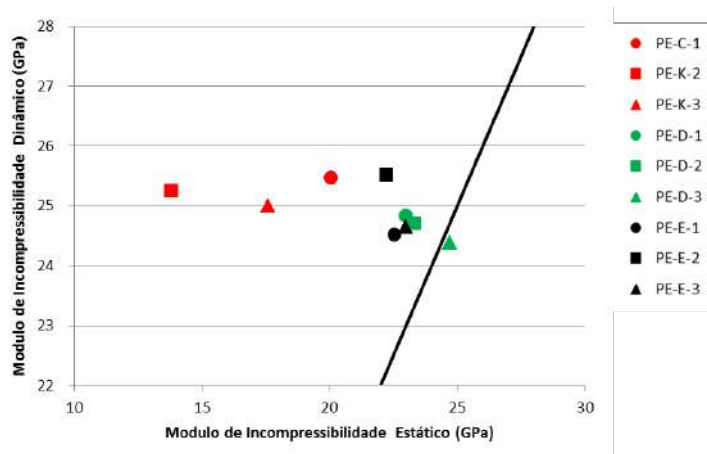


Figura 4.40 – Comparação entre o módulo de compressão volumétrica estático e dinâmico. A reta na cor preta é a relação 1:1.

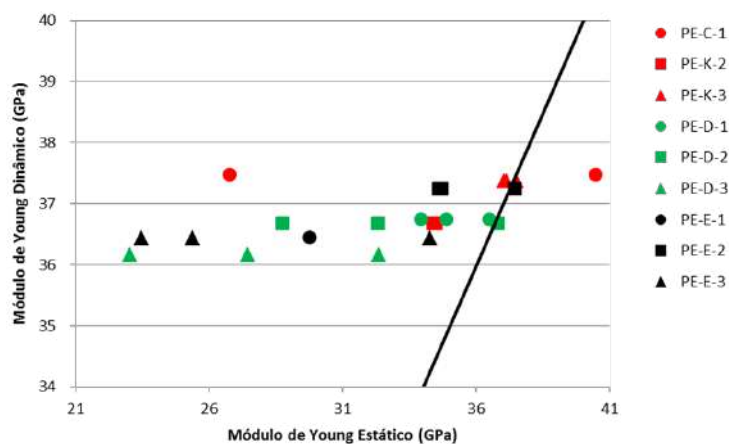


Figura 4.41 – Comparação entre o módulo de Young estático e dinâmico. A reta na cor preta é a relação 1:1.

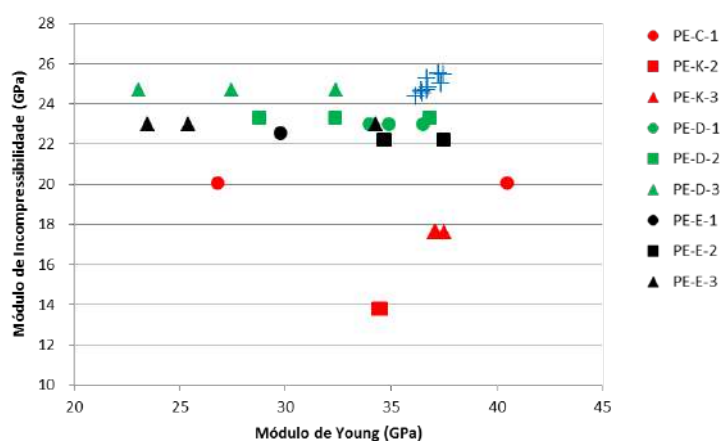


Figura 4.42 – Gráfico de correlação entre o módulo de Young e o módulo de compressão volumétrica. Os valores obtidos pelo método dinâmico estão plotados como cruz de cor azul. Os outros pontos são os resultados do ensaio estático.

5 Conclusões

Nesta dissertação foram estudadas as propriedades elásticas de rochas evaporíticas através de etapas de caracterização mineralógica, volumétrica e elástica. O evaporito, que apresenta comportamento tão particular frente às demais rochas sedimentares, é de grande interesse na indústria de mineração e exploração de petróleo, seja pelo minério ou pelas características mecânicas e problemas de engenharia associados.

Os corpos de prova utilizados, obtidos na mina de Taquari-Vassouras, foram caracterizados quanto a sua composição mineralógica através de descrições macroscópicas e microscópicas. Estas análises permitiram classificar as amostras em três tipos de rochas evaporíticas: halita, silvinita e carnalita. Dos tipos de evaporitos que ocorrem nas bacias brasileiras apenas a anidrita e taquidrita não foram analisadas. A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada à análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) mostrou-se eficiente na caracterização da composição química dos minerais presentes na rocha, auxiliando na identificação de lâminas de argilominerais em algumas amostras de halita.

A análise de radioatividade natural, normalmente realizadas em testemunhos de sondagem, confirmou a presença de minerais ricos em potássio nas amostras das classes A, B e I.

As amostras de silvinita, formadas por diferentes proporções dos minerais halita e silvita, foram caracterizadas volumetricamente através de relação entre a massa específica das amostras e a massa específica dos minerais componentes. Posteriormente, análise de microtomografia realizada na amostra PE-I-1 mostrou uma boa correlação entre os resultados, corroborando a aplicação desta metodologia. Os teores de halita variaram entre 50 e 80% nas sete amostras de silvinita analisadas. Esta mesma análise indicou baixa porosidade, já esperada, para as amostras de sal, em geral associadas à microfraturas geradas no processo de preparo do corpo de prova.

Os módulos elásticos obtidos na análise de propagação de pulso ultrassônico, ensaio dinâmico, se mostraram bem consistentes. Valores médios de módulo de Young de 36.69 GPa e razão de Poisson de 0.25 se aproximam dos valores de referência obtidos através de ferramentas de perfilagem, indicando não existir problemas de escala entre o experimento ultrassônico, com frequência de 700 kHz, e os perfis de poços, com frequência da ordem de 10 kHz.

As amostras de silvinita apresentaram valores médios de módulo de Young de 31.24 GPa e Razão de Poisson de 0.26. A única amostra de carnalita analisada apresentou valor de 18.06 GPa para o módulo de Young e razão de Poisson de 0.32, com velocidade compressional bem próxima dos valores de referência.

A modelagem numérica pelo método de diferenças finitas, aplicada na amostra de silvinita, apresentou resultado interessante quanto à caracterização do efeito do teor de halita na velocidade compressional. Principalmente pela característica do material analisado. A propriedade de atenuação de raios x distinta para a halita e para a silvita permitiu a definição geométrica de cada uma das fases minerais. Softwares de análise de elementos finitos, como o Abaqus e o Consol, podem ser utilizados para realizar simulações elásticas e mecânicas em três dimensões, resultando em valores mais próximos dos experimentos.

Nos ensaios de compressão triaxial o parâmetro de controle de taxa desempenha importante papel para a definição do regime em que o ensaio ocorre. Em ensaios com controle na taxa de tensão os resultados não foram comparáveis aos métodos dinâmicos, indicando provavelmente o efeito da fluência do material durante o ensaio, devido às taxas de deformação muito pequenas.

Foram nos ensaios de compressão triaxial com controle de taxa de deformação que os resultados obtidos mais se aproximaram ao comportamento elástico observado no método dinâmico. Os módulos de compressão volumétrica e de Young apresentaram valores ligeiramente menores, mas resguardaram as relações de elasticidade com a razão de Poisson resultante, indicando que nas trajetórias de tensão definidas durante os ciclos de carregamento e descarregamento o material se comportou de maneira elástica.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como continuidade da pesquisa sugere-se a realização da mesma metodologia em amostras de evaporitos que não foram analisadas nesta dissertação, como a anidrita, gipsita e taquidrita, além da realização de novas análises em amostras de carnalita, a fim de caracterizar as propriedades elásticas dos principais evaporitos presentes nas bacias brasileiras.

Nos ensaios de compressão axial ainda pode ser estudado o efeito da taxa de deformação nos módulos elásticos resultantes. Liang *et al.* (2011), Liang *et al.* (2007) e Hatzor *et al.* (1997) sugerem taxas de deformação até quatro vezes maiores que a utilizada nos estudos desta dissertação.

Sugere-se ainda a realização de ensaios simultâneos, onde durante a compressão triaxial a análise de propagação de pulso ultrassônica é efetuada, permitindo caracterizar melhor o comportamento elástico do material

6

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2845-08**. 2008. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. United States, West Conshohocken, Pennsylvania.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4543-08**. 2008. Standard Practices Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances. United States, West Conshohocken, Pennsylvania.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D7012-13**. 2013. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. United States, West Conshohocken, Pennsylvania.

BLUM, P., 1997. Physical properties handbook: a guide to the shipboard measurement of physical properties of deep-sea cores. **ODP Tech. Note**, 26.

CRAIN, E.R., 2001. Crain's Petrophysical Handbook. (<http://www.spec2000.net>)

COSTA, A.M.; Poiate JR, E.; Amaral, C.S.; Gonçalves, C.J.C. e Falcão, J.L. 2010. Geomechanics applied to the well design through salt layers in Brazil: A history of success. **44th US Rock Mechanics Symposium**, Salt Lake City.

FALCÃO, J.L.; Poiate Jr., E.; Costa, A.M.; Alves, I.A.S. e Eston, S.M. 2007. Perfuração em formações Salinas. **Boletim técnico da produção de Petróleo**. V. 2 (2), p. 261-286.

FERNANDES, C.P; Moreira, A.C; Mantovani, I.F.; Appoloni, C.R.; Fernandes, J.S.; de Souza, M.K. e dos Santos, V.S.S. 2011. Caracterização do sistema poroso de rochas-reservatório com microtomografia computadorizada de raios x. **B. Geoci. Petrobras**, V. 20, p. 129-144.

FERNANDES, L.L.; Cruz, J.C.R.; Blanco, C.J.C. e Barp, A.R.B. 2009. Modelagem sísmica via métodos das diferenças finitas – caso da bacia do Amazonas. **Acta Amazonica**. V. 39 (1). p. 155-164.

FONSECA, J.C. 1973. Evaporitos de Segipe. **27º Congresso Brasileiro de Geologia**, Aracaju, V. 2, p 185-226.

HATZOR, Y.H. e Heyman, E.P. 1997. Dilation of anisotropic rock salt: Evidence from Mount Sedom Diapir. **Journal of Geophysical Research**. V 102 (b7), p. 14853-14868.

HSU, K.J., 1972. Origin of saline giants: a critical review after discovery of the Mediterranean evaporites. **Earth Science Reviews**, V. 8, p. 371-396.

JUSTEN, J.C.R.; Vargas Jr., E.A.; Alves, I. e de Souza, A.L.S. 2013. Análise das propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos. **13th International congresso of the Brazillian Geophysical Society**, Rio de Janeiro.

LIANG, W.G.; Zhao, Y.S.; Xu, S.G. e Dusseault, M.B. 2011. Effect of strain rate on the mechanical properties of salt rock. **Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, V. 48, p. 161-167.

LIANG, W.G.; Yang, C.; Zhao, Y.S., Dusseault, M.B. e Liu, J. 2007. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. **Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, V. 44, p. 400-411

MAVKO, G.; Mukerji, T. e Dvorkin, J. 2003. The Rock Physics Handbook: tools for seismic analysis of porous media. **Cambridge University Press**. 522p.

MILANI, E.J.; Brandão, J.A.S.L.; Zalán, P.V. e Gamboa, A.P. 2000. Petróleo na margem continental brasileira: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Brazilian Journal of Geophysics**, V. 18 (3), p. 351-396.

MOHRIAK, W.; Szatmari, P. E Anjos, S.M.C. 2008. Sal Geologia e Tectônica. Exemplos de bacias Brasileiras. **Beca Edições**. 448p.

MORSCHBACHER, M.J.; Vasquez, G.F. e Justen, J.C.R. 2010. Metodologias de estimativa das velocidades sísmicas em ensaios de laboratório. **4º Simpósio Brasileiro da Sociedade Brasileira de Geofísica**, Brasília

POIATE Jr., E.; Costa, A.M. e Falcão, J.L. 2006. Well design for drilling through thick evaporite layers in Santos Basin – Brazil. **IADC/SPE Drilling Conference**, Miami.

POPP, T. e Kern, H. 1998. Ultrasonic wave velocities, gas permeability and porosity in natural and granular rock salt. **Phys. Chem. Earth**. V. 23 (3), p. 373-378.

SCHOENHERR, J.; Schlöder, Z.; Urai, J.L.; Fokker, P.A. e Schulze, O. 2007. Deformation mechanisms and rheology of Pre-cambrian rocksalt from South Oman Salt Basin. **Taylor & Francis**, London, p. 167-173.

SONNENFELD, P. 1984. Brines and Evaporites. **Academic Press**. 613p.

SONNENFELD, P. e Perthuisot, J.P. 1989. Genesis of evaporites, in: Brines and Evaporites. **American Geophysical Union**, Washington D.C., p. 1-64.

SZATMARI, P.; Carvalho, R.S.; Simões, I.A.; Tibana, P. e Leite, D.C. 1974. Evaporitos de Sergipe, Aracaju. **Relatório interno Petrobras**. RPNE. 159p.

URAI, J.L.; Spiers, C.J.; Peach, C.; Franssen, R.C.M.W. e Liezenberg, J.L. 1987. Deformation mechanisms operating in naturally deformed halite rocks as deduced from microstructural investigations. **Geol Mijnb**. V. 66. p. 165-176.

VASQUEZ, G.F. et al. 2010. Confecção e calibração de câmaras de medidas acústicas de fluido. **Relatório interno Petrobras**. Programa Tecnológico Desenvolvimento Reservatórios Pré-Sal.

WARREN, J.K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. **Earth Science Reviews**. V. 98. p. 217-268.

WARREN, J.K. 2006. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. **Springer**. 1035p.

ZINSZNER, B. e Pellerin, F.M. 2007. A Geoscientists Guide to Petrophysics. IFP Publications. **Editions Technip**. 384p.

APÊNDICE

Resultado da Análise de Velocidade de Propagação Ultrasônica

PE-A-1* Silvinita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	182,27	76,15	39,02	86,55	2,106	5,0	91,72

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4284	2474	2478	20,59	12,40	30,98	0,25
4500	4284	2474	2478	20,59	12,40	30,98	0,25
4000	4284	2472	2476	20,62	12,38	30,94	0,25
3500	4278	2472	2474	20,53	12,37	30,90	0,25
3000	4278	2467	2474	20,56	12,35	30,86	0,25
2500	4272	2467	2472	20,46	12,34	30,82	0,25
2000	4266	2463	2465	20,42	12,28	30,70	0,25
1500	4253	2455	2459	20,31	12,21	30,52	0,25
1000	4235	2445	2445	20,16	12,09	30,23	0,25
500	4175	2415	2413	19,54	11,79	29,44	0,25

PE-A-2 Silvinita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	191,30	77,91	38,99	90,04	2,13	3,18	93,02

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4377	2484	2487	22,45	12,71	32,07	0,26
4500	4377	2484	2487	22,45	12,71	32,07	0,26
4000	4377	2483	2487	22,46	12,70	32,06	0,26
3500	4372	2483	2486	22,38	12,69	32,02	0,26
3000	4372	2481	2486	22,39	12,68	32,01	0,26
2500	4367	2481	2484	22,32	12,68	31,97	0,26
2000	4362	2478	2483	22,26	12,65	31,91	0,26
1500	4347	2473	2478	22,06	12,60	31,76	0,26
1000	4333	2467	2469	21,91	12,52	31,56	0,26
500	4314	2462	2462	21,64	12,47	31,38	0,26

PE-A-3 Silvinita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	71,34	29,90	39,19	33,76	2,11	6,40	36,07

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4436	2534	2538	21,96	12,72	31,98	0,26
4500	4436	2534	2542	21,93	12,74	32,02	0,26
4000	4436	2534	2538	21,96	12,72	31,98	0,26
3500	4436	2534	2538	21,96	12,72	31,98	0,26
3000	4436	2534	2538	21,96	12,72	31,98	0,26
2500	4436	2534	2542	21,93	12,74	32,02	0,26
2000	4423	2534	2538	21,73	12,72	31,93	0,26
1500	4423	2534	2538	21,73	12,72	31,93	0,26
1000	4423	2529	2534	21,79	12,68	31,85	0,26
500	4410	2517	2525	21,70	12,57	31,61	0,26

PE-B-1 Silvinita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	171,02	70,88	39,07	81,20	2,11	4,40	84,98

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4301	2466	2461	20,94	12,22	30,68	0,26
4500	4301	2468	2461	20,93	12,22	30,70	0,26
4000	4301	2465	2461	20,95	12,21	30,67	0,26
3500	4296	2465	2459	20,87	12,20	30,63	0,26
3000	4296	2463	2458	20,90	12,18	30,60	0,26
2500	4291	2458	2456	20,85	12,15	30,52	0,26
2000	4280	2453	2451	20,74	12,10	30,38	0,26
1500	4270	2444	2446	20,65	12,03	30,22	0,26
1000	4255	2431	2434	20,55	11,91	29,94	0,26
500	4214	2408	2414	20,14	11,70	29,40	0,26

PE-B-2 Silvinita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	188,25	77,70	39,09	88,97	2,12	4,60	93,25

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4380	2506	2510	21,79	12,70	31,90	0,26
4500	4380	2506	2510	21,79	12,70	31,90	0,26
4000	4375	2505	2510	21,72	12,69	31,86	0,26
3500	4375	2505	2508	21,73	12,68	31,85	0,26
3000	4375	2503	2506	21,75	12,67	31,82	0,26
2500	4365	2501	2505	21,60	12,65	31,75	0,26
2000	4365	2498	2503	21,63	12,62	31,71	0,26
1500	4360	2495	2498	21,60	12,58	31,61	0,26
1000	4345	2489	2492	21,43	12,52	31,44	0,26
500	4326	2474	2478	21,28	12,38	31,10	0,26

PE-B-3 Silvinita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	162,84	68,56	39,00	77,33	2,11	5,60	81,90

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4317	2477	2480	20,77	12,22	30,64	0,25
4500	4317	2477	2480	20,77	12,22	30,64	0,25
4000	4312	2475	2479	20,70	12,20	30,59	0,25
3500	4312	2475	2477	20,72	12,19	30,57	0,25
3000	4307	2473	2477	20,63	12,18	30,53	0,25
2500	4307	2472	2475	20,66	12,16	30,50	0,25
2000	4296	2468	2472	20,52	12,13	30,39	0,25
1500	4285	2463	2464	20,42	12,07	30,24	0,25
1000	4269	2450	2452	20,31	11,95	29,96	0,25
500	4237	2426	2428	20,08	11,71	29,41	0,26

PE-C-1 Halita com argila	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	206,91	78,40	39,27	94,71	2,18	0,30	94,96

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4563	2617	2618	25,47	14,93	37,47	0,25
4500	4558	2617	2618	25,36	14,93	37,44	0,25
4000	4558	2617	2617	25,37	14,92	37,42	0,25
3500	4558	2617	2617	25,37	14,92	37,42	0,25
3000	4553	2615	2617	25,28	14,91	37,38	0,25
2500	4553	2613	2615	25,31	14,89	37,35	0,25
2000	4547	2611	2613	25,23	14,87	37,29	0,25
1500	4547	2610	2611	25,26	14,85	37,25	0,25
1000	4542	2610	2613	25,14	14,86	37,24	0,25
500	4537	2606	2608	25,10	14,81	37,13	0,25

PE-C-2 Halita com argila	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	67,66	25,79	39,45	31,10	2,18	1,30	31,52

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4540	2599	2615	24,78	14,59	36,59	0,25
4500	4524	2599	2615	24,47	14,59	36,52	0,25
4000	4524	2599	2615	24,47	14,59	36,52	0,25
3500	4524	2599	2615	24,47	14,59	36,52	0,25
3000	4524	2599	2615	24,47	14,59	36,52	0,25
2500	4524	2594	2615	24,51	14,56	36,46	0,25
2000	4524	2594	2615	24,51	14,56	36,46	0,25
1500	4508	2594	2610	24,24	14,53	36,34	0,25
1000	4508	2589	2610	24,28	14,50	36,28	0,25
500	4492	2589	2605	24,02	14,47	36,16	0,25

PE-C-3 Halita com argila	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	200,10	76,63	39,42	-	-		93,52

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4476	2570	2568	24,04	14,12	35,42	0,25
4500	4476	2570	2570	24,03	14,13	35,44	0,25
4000	4476	2570	2568	24,04	14,12	35,42	0,25
3500	4476	2568	2566	24,06	14,10	35,39	0,25
3000	4471	2568	2564	23,98	14,09	35,35	0,25
2500	4471	2564	2563	24,01	14,06	35,29	0,26
2000	4465	2564	2561	23,93	14,05	35,25	0,25
1500	4465	2561	2559	23,96	14,02	35,20	0,26
1000	4460	2558	2556	23,91	13,99	35,11	0,26
500	4455	2551	2549	23,91	13,91	34,96	0,26

PE-C-4 Halita com argila	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	110,21	43,05	39,42	51,13	2,16	2,70	52,54

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4560	2631	2622	24,33	14,47	36,23	0,25
4500	4560	2631	2622	24,33	14,47	36,23	0,25
4000	4560	2628	2622	24,35	14,45	36,20	0,25
3500	4560	2628	2622	24,35	14,45	36,20	0,25
3000	4560	2628	2622	24,35	14,45	36,20	0,25
2500	4560	2628	2622	24,35	14,45	36,20	0,25
2000	4551	2625	2619	24,21	14,42	36,09	0,25
1500	4541	2619	2612	24,13	14,35	35,92	0,25
1000	4532	2612	2606	24,04	14,28	35,76	0,25
500	4494	2593	2584	23,62	14,06	35,19	0,25

PE-C-5 Halita com argila	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	181,39	69,07	39,51	83,44	2,17	1,50	84,68

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4574	2618	2624	25,20	14,72	36,96	0,26
4500	4574	2618	2624	25,20	14,72	36,96	0,26
4000	4574	2618	2624	25,20	14,72	36,96	0,26
3500	4574	2618	2622	25,21	14,71	36,94	0,26
3000	4568	2618	2622	25,09	14,71	36,91	0,25
2500	4568	2616	2622	25,11	14,70	36,89	0,26
2000	4568	2614	2620	25,14	14,67	36,85	0,26
1500	4562	2612	2618	25,05	14,65	36,78	0,26
1000	4556	2610	2616	24,96	14,63	36,72	0,25
500	4550	2608	2614	24,87	14,61	36,65	0,25

PE-C-6 Halita com argila	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	202,88	77,53	39,43	93,56	2,17	0,90	94,46

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4566	2619	2621	25,13	14,74	36,99	0,25
4500	4566	2619	2621	25,13	14,74	36,99	0,25
4000	4566	2619	2621	25,13	14,74	36,99	0,25
3500	4561	2617	2621	25,04	14,73	36,95	0,25
3000	4561	2617	2619	25,05	14,72	36,93	0,25
2500	4561	2615	2619	25,06	14,71	36,91	0,25
2000	4556	2615	2617	24,97	14,70	36,87	0,25
1500	4556	2614	2615	25,00	14,68	36,84	0,25
1000	4556	2612	2615	25,01	14,67	36,82	0,25
500	4550	2610	2614	24,93	14,65	36,76	0,25

PE-C-7 Halita com argila	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	148,65	56,79	39,39	68,50	2,18	1,00	69,20

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4565	2617	2622	25,11	14,74	36,98	0,25
4500	4565	2617	2622	25,11	14,74	36,98	0,25
4000	4565	2614	2622	25,13	14,72	36,95	0,25
3500	4565	2614	2622	25,13	14,72	36,95	0,25
3000	4557	2614	2622	24,98	14,72	36,92	0,25
2500	4557	2614	2622	24,98	14,72	36,92	0,25
2000	4557	2614	2619	25,00	14,71	36,89	0,25
1500	4557	2614	2619	25,00	14,71	36,89	0,25
1000	4550	2612	2619	24,88	14,70	36,83	0,25
500	4550	2610	2617	24,91	14,67	36,79	0,25

PE-D-1 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	197,33	77,51	38,97	91,39	2,16	1,10	92,45

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4560	2617	2624	24,83	14,66	36,74	0,25
4500	4560	2617	2622	24,85	14,65	36,73	0,25
4000	4560	2617	2622	24,85	14,65	36,73	0,25
3500	4560	2617	2622	24,85	14,65	36,73	0,25
3000	4554	2615	2622	24,76	14,64	36,68	0,25
2500	4554	2615	2620	24,77	14,63	36,66	0,25
2000	4554	2613	2619	24,79	14,61	36,63	0,25
1500	4549	2610	2615	24,74	14,57	36,53	0,25
1000	4538	2605	2610	24,62	14,51	36,38	0,25
500	4528	2598	2599	24,54	14,41	36,16	0,25

PE-D-2 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	188,27	74,11	38,98	87,21	2,16	1,40	88,44

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4558	2628	2617	24,71	14,64	36,68	0,25
4500	4558	2626	2617	24,72	14,63	36,66	0,25
4000	4558	2626	2617	24,72	14,63	36,66	0,25
3500	4558	2626	2617	24,72	14,63	36,66	0,25
3000	4552	2626	2615	24,62	14,62	36,61	0,25
2500	4552	2624	2615	24,63	14,61	36,59	0,25
2000	4547	2622	2613	24,57	14,58	36,53	0,25
1500	4541	2619	2609	24,50	14,55	36,43	0,25
1000	4530	2611	2604	24,39	14,47	36,25	0,25
500	4508	2600	2593	24,13	14,35	35,93	0,25

PE-D-3 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	199,61	79,01	39,08	92,56	2,16	2,30	94,77

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4551	2616	2620	24,38	14,44	36,17	0,25
4500	4546	2616	2620	24,28	14,44	36,14	0,25
4000	4546	2616	2618	24,29	14,43	36,13	0,25
3500	4546	2614	2618	24,31	14,42	36,11	0,25
3000	4541	2614	2616	24,22	14,41	36,07	0,25
2500	4541	2613	2616	24,23	14,40	36,05	0,25
2000	4541	2611	2614	24,26	14,38	36,02	0,25
1500	4536	2608	2611	24,21	14,34	35,93	0,25
1000	4520	2597	2602	24,05	14,24	35,67	0,25
500	4489	2575	2580	23,78	14,00	35,10	0,25

PE-E-1 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	193,41	76,26	38,97	89,58	2,16	1,50	90,96

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4545	2621	2612	24,52	14,55	36,45	0,25
4500	4545	2621	2612	24,52	14,55	36,45	0,25
4000	4545	2619	2610	24,54	14,53	36,41	0,25
3500	4545	2619	2610	24,54	14,53	36,41	0,25
3000	4539	2617	2610	24,45	14,52	36,37	0,25
2500	4539	2617	2608	24,46	14,51	36,35	0,25
2000	4539	2615	2606	24,49	14,49	36,32	0,25
1500	4534	2612	2603	24,44	14,45	36,22	0,25
1000	4529	2608	2599	24,39	14,41	36,13	0,25
500	4513	2592	2585	24,30	14,25	35,76	0,25

PE-E-2 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	199,70	77,91	38,95	92,00	2,17	0,90	92,83

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4588	2625	2625	25,52	14,82	37,26	0,26
4500	4588	2625	2625	25,52	14,82	37,26	0,26
4000	4583	2625	2623	25,43	14,81	37,21	0,26
3500	4583	2625	2623	25,43	14,81	37,21	0,26
3000	4583	2623	2623	25,44	14,80	37,19	0,26
2500	4583	2623	2623	25,44	14,80	37,19	0,26
2000	4577	2621	2621	25,36	14,78	37,13	0,26
1500	4577	2621	2621	25,36	14,78	37,13	0,26
1000	4572	2620	2620	25,28	14,76	37,07	0,26
500	4572	2618	2618	25,31	14,74	37,04	0,26

PE-E-3 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	197,91	77,88	39,14	91,74	2,16	2,10	93,70

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4565	2626	2620	24,64	14,53	36,43	0,25
4500	4565	2626	2619	24,65	14,52	36,42	0,25
4000	4565	2626	2619	24,65	14,52	36,42	0,25
3500	4560	2626	2619	24,55	14,52	36,39	0,25
3000	4560	2624	2619	24,56	14,51	36,37	0,25
2500	4560	2624	2617	24,57	14,50	36,36	0,25
2000	4560	2624	2617	24,57	14,50	36,36	0,25
1500	4554	2622	2615	24,50	14,48	36,30	0,25
1000	4549	2619	2613	24,43	14,45	36,22	0,25
500	4544	2612	2606	24,44	14,38	36,06	0,25

PE-F-1 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	176,63	71,26	38,24	82,01	2,16	-0,20	81,84

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4516	2622	2695	23,68	15,25	37,67	0,23
4500	4516	2624	2695	23,66	15,26	37,69	0,23
4000	4516	2622	2691	23,71	15,23	37,63	0,24
3500	4510	2622	2691	23,60	15,23	37,60	0,23
3000	4510	2618	2691	23,63	15,21	37,56	0,23
2500	4505	2614	2685	23,59	15,15	37,44	0,24
2000	4505	2608	2681	23,66	15,10	37,35	0,24
1500	4493	2597	2673	23,59	14,98	37,10	0,24
1000	4482	2578	2655	23,65	14,78	36,69	0,24
500	4459	2554	2599	23,82	14,33	35,80	0,25

PE-F-2 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	173,44	68,96	39,09	80,45	2,16	2,80	82,76

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4609	2550	2546	26,38	13,61	34,84	0,28
4500	4609	2550	2548	26,37	13,62	34,86	0,28
4000	4609	2552	2548	26,35	13,63	34,87	0,28
3500	4603	2550	2548	26,25	13,62	34,83	0,28
3000	4603	2546	2546	26,29	13,59	34,77	0,28
2500	4603	2545	2545	26,32	13,57	34,74	0,28
2000	4597	2543	2543	26,22	13,55	34,67	0,28
1500	4591	2537	2537	26,19	13,49	34,54	0,28
1000	4585	2526	2528	26,21	13,38	34,30	0,28
500	4567	2507	2513	26,10	13,21	33,90	0,28

PE-F-3 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	187,02	75,30	38,49	86,61	2,16	1,10	87,62

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4581	2695	2682	24,21	15,43	38,18	0,24
4500	4581	2693	2682	24,23	15,42	38,16	0,24
4000	4581	2693	2682	24,23	15,42	38,16	0,24
3500	4575	2691	2678	24,16	15,38	38,07	0,24
3000	4575	2688	2676	24,21	15,35	38,02	0,24
2500	4575	2688	2672	24,24	15,33	37,98	0,24
2000	4569	2686	2672	24,14	15,32	37,93	0,24
1500	4564	2676	2665	24,17	15,22	37,74	0,24
1000	4558	2659	2648	24,31	15,03	37,38	0,24
500	4542	2659	2570	24,58	14,59	36,54	0,25

PE-H-1 Carnalita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	39,09	22,39	37,43	24,26	1,59	1,50	24,64

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4056	2149	1999	17,00	6,82	18,06	0,32
4500	4056	2149	1999	17,00	6,82	18,06	0,32
4000	4056	2149	1992	17,04	6,80	18,01	0,32
3500	4056	2149	1992	17,04	6,80	18,01	0,32
3000	4056	2149	1992	17,04	6,80	18,01	0,32
2500	4042	2149	1992	16,85	6,80	17,98	0,32
2000	4042	2149	1992	16,85	6,80	17,98	0,32
1500	4027	2141	1985	16,73	6,75	17,85	0,32
1000	4027	2132	1981	16,78	6,71	17,77	0,32
500	3998	2120	1974	16,50	6,65	17,59	0,32

PE-I-1 Silvinita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	128,17	55,49	37,78	61,56	2,08	1,00	62,21

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4282	2425	2400	21,78	11,99	30,40	0,27
4500	4282	2427	2400	21,77	12,00	30,42	0,27
4000	4275	2423	2400	21,68	11,98	30,36	0,27
3500	4275	2425	2402	21,65	12,00	30,39	0,27
3000	4268	2421	2396	21,60	11,95	30,27	0,27
2500	4268	2423	2396	21,59	11,96	30,29	0,27
2000	4262	2417	2392	21,54	11,91	30,17	0,27
1500	4255	2415	2382	21,51	11,85	30,03	0,27
1000	4242	2400	2367	21,47	11,71	29,72	0,27
500	4210	2380	2335	21,25	11,45	29,12	0,27

PE-J-1 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	81,43	34,36	37,61	37,44	2,17	1,90	38,17

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4545	2611	2611	24,68	14,54	36,46	0,25
4500	4545	2611	2611	24,68	14,54	36,46	0,25
4000	4545	2611	2611	24,68	14,54	36,46	0,25
3500	4545	2607	2611	24,71	14,52	36,42	0,25
3000	4545	2607	2611	24,71	14,52	36,42	0,25
2500	4533	2607	2607	24,50	14,50	36,33	0,25
2000	4533	2607	2607	24,50	14,50	36,33	0,25
1500	4533	2607	2607	24,50	14,50	36,33	0,25
1000	4533	2607	2607	24,50	14,50	36,33	0,25
500	4521	2607	2607	24,27	14,50	36,27	0,25

PE-J-2 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	137,61	56,73	37,86	63,13	2,18	1,20	63,87

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4524	2583	2583	24,92	14,38	36,18	0,26
4500	4524	2586	2586	24,89	14,41	36,23	0,26
4000	4524	2583	2586	24,91	14,39	36,20	0,26
3500	4524	2583	2583	24,92	14,38	36,18	0,26
3000	4524	2581	2583	24,94	14,37	36,16	0,26
2500	4517	2581	2581	24,82	14,35	36,10	0,26
2000	4517	2576	2579	24,87	14,31	36,03	0,26
1500	4517	2574	2576	24,91	14,29	35,98	0,26
1000	4510	2569	2572	24,84	14,24	35,86	0,26
500	4502	2551	2558	24,94	14,06	35,50	0,26

PE-K-1 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm ³	G grãos g/cm ³	Porosidade %	V total cm ³
	199,89	75,21	39,92	-	-	-	94,13

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4542	2601	2577	24,82	14,23	35,85	0,26
4500	4536	2592	2574	24,81	14,17	35,70	0,26
4000	4536	2592	2572	24,82	14,16	35,68	0,26
3500	4536	2593	2572	24,81	14,17	35,70	0,26
3000	4531	2590	2570	24,74	14,14	35,62	0,26
2500	4531	2586	2567	24,79	14,10	35,55	0,26
2000	4520	2570	2558	24,76	13,96	35,26	0,26
1500	4514	2553	2546	24,87	13,80	34,94	0,27
1000	4504	2532	2526	24,96	13,58	34,49	0,27
500	4487	2494	2495	25,14	13,21	33,73	0,28

PE-K-2 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm3	G grãos g/cm3	Porosidade %	V total cm3
	205,73	77,18	39,89	-	-	-	96,45

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4578	2607	2622	25,26	14,58	36,68	0,26
4500	4578	2607	2622	25,26	14,58	36,68	0,26
4000	4578	2606	2620	25,28	14,56	36,65	0,26
3500	4578	2606	2620	25,28	14,56	36,65	0,26
3000	4572	2604	2616	25,22	14,53	36,57	0,26
2500	4572	2602	2614	25,24	14,51	36,53	0,26
2000	4567	2600	2611	25,18	14,48	36,46	0,26
1500	4561	2593	2600	25,20	14,38	36,25	0,26
1000	4556	2580	2580	25,35	14,19	35,88	0,26
500	4529	2544	2539	25,39	13,78	35,00	0,27

PE-K-3 Halita	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm	V grãos cm3	G grãos g/cm3	Porosidade %	V total cm3
	209,80	78,46	39,90	96,75	2,17	1,40	98,10

P. Conf. (PSI)	VP (m/s)	VS1 (m/s)	VS2 (m/s)	K (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	RP
5000	4583	2678	2608	25,00	14,94	37,37	0,25
4500	4583	2680	2610	24,97	14,96	37,41	0,25
4000	4583	2680	2610	24,97	14,96	37,41	0,25
3500	4583	2680	2610	24,97	14,96	37,41	0,25
3000	4578	2680	2608	24,88	14,95	37,37	0,25
2500	4578	2676	2607	24,92	14,92	37,31	0,25
2000	4572	2672	2605	24,86	14,89	37,23	0,25
1500	4567	2665	2600	24,84	14,82	37,08	0,25
1000	4562	2652	2593	24,89	14,71	36,87	0,25
500	4535	2626	2576	24,70	14,47	36,31	0,25