

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS –
MESTRADO PROFISSIONAL

DISSERTAÇÃO

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA EXPLOTAÇÃO DE SAIS DE
POTÁSSIO NO SUBSOLO MARINHO UTILIZANDO LAVRA POR
DISSOLUÇÃO.**

Autor: SANDER MORAIS DOS SANTOS
Orientadora: PROFa. Dra. ANDRÉIA BICALHO HENRIQUES
Coorientador: Prof. Dr. MICHEL MELO

BELO HORIZONTE-MG
MARÇO DE 2021

SANDER MORAIS DOS SANTOS

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA EXPLOTAÇÃO DE SAIS DE
POTÁSSIO NO SUBSOLO MARINHO UTILIZANDO LAVRA POR
DISSOLUÇÃO.**

Dissertação apresentada para o Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional, como pré-requisito para a obtenção do título de mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Andréia Bicalho
Henriques

Coorientador: Prof. Dr. Michel Melo

BELO HORIZONTE-MG

MARÇO DE 2021

S237e Santos, Sander Morais dos.
Estudo de viabilidade técnica de exploração de sais de potássio no subsolo marinho utilizando lavra por dissolução [recurso eletrônico] / Sander Morais dos Santos. – 2021.
1 recurso online (xv,118 f. : il., color.) : pdf.

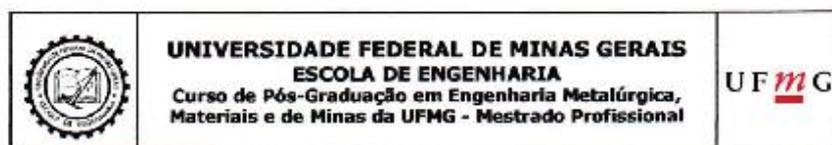
Orientadora: Andréia Bicalho Henriques.
Coorientador: Michel Melo Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 112-118.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Evaporitos – Teses.
3. Lavra a céu aberto – Teses. 4. Mecânica do solo - Teses.
5. Mineração no oceano- Teses. 6. Potássio – Teses. I. Henriques, Andréia Bicalho. II. Oliveira, Michel Melo. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 669(043)



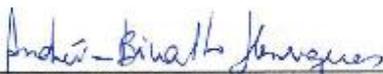
**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA EXPLOTAÇÃO DE SAIS DE
POTÁSSIO NO SUBSOLO MARINHO UTILIZANDO LAVRA POR
DISSOLUÇÃO**

SANDER MORAIS DOS SANTOS

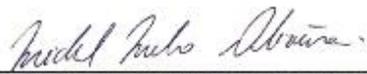
Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 30 de março de 2021.

Por:


Prof.ª Andreia Bicalho Henriques, Dr.ª (UFMG)

Orientadora


Prof. Michel Melo Oliveira, Dr. (UFMG)

Coorientador


Prof. Pedro Benedito Casagrande, Dr. (UFMG)

RESUMO

O estudo da viabilidade técnica da exploração de sais de potássio no subsolo marinho, mais precisamente de uma anomalia mapeada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) na costa Sergipana, tem como objetivo possibilitar o aproveitamento econômico de um recurso mineral escasso no Brasil por meio do uso da técnica de lavra por dissolução. Para tanto, efetuou-se uma parceria técnico-científica entre Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), onde a ANP forneceu uma série de dados técnicos de poços perfurados por empresas petrolíferas. Dados como: descrições de amostras de calhas, perfil composto, dados de perfilagem dos poços, geofísica, gravimetria, magnetometria e outros estudos da zona de interesse. Posteriormente, estes dados foram trabalhados utilizando-se ferramentas petrográficas, visando caracterizar a anomalia de sais de potássio existente. Por conseguinte, os dados de perfilagem dos poços (gamma ray, nêutron, resistividade, etc) foram processados de maneira a se criar um filtro para facilitar a separação dos sais de potássio de outros sais. A resistividade, por exemplo, foi utilizada para distinguir os evaporitos de outros tipos de rochas sedimentares (sais tem baixa resistividade). Logo, com a combinação da interpretação sísmica e a descrição dos poços, realizou-se o modelamento geológico do corpo mineral com o intuito de classificá-lo em: ocorrência mineral ou jazida. Posteriormente, estipulou-se os melhores parâmetros de lavra, equipamentos, taxa de bombeio, rota de beneficiamento e disposição de rejeitos, ou seja, visando garantir a exploração deste recurso mineral.

Palavras-chave: Lavra por dissolução; Potássio; Evaporitos; Geomecânica; Mineração no mar.

ABSTRACT

The study of the technical feasibility of exploiting potassium salts in the sea underground, more precisely of an anomaly mapped by the Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) on the coast of Sergipe, aims to enable the economic exploitation of a scarce mineral resource in Brazil, through of use of solution mining. To this end, a technical-scientific partnership was made between Federal University of Minas Gerais (UFMG) and National Agency of the Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), where the ANP provided us with a series of technical data from wells drilled by oil companies. Data such as descriptions of channel samples, composite profile, well profiling data, geophysics, gravimetry, magnetometry and other studies of the area of interest. Subsequently, these data were worked using petrographic tools, in order to characterize the anomaly of the existing potassium salts. To this end, the profile data will be processed (gamma rays, neutrons, resistance, etc.) to create a filter that facilitates the separation of potassium salts from other salts. Resistivity, for example, was used to distinguish evaporites from other types of sedimentary rocks (salts have low resistivity). Therefore, with the combination of the seismic interpretation and the description of the wells, the geological modelling of the mineral body is carried out with the aim of defining whether it was a mineral occurrence or a deposit. Subsequently, the best parameters of exploitation, equipment, pumping rate, beneficiation route and disposal of rejects were defined, that is, aiming at the possible exploitation of these minerals.

Key-words: Solution Mining; Potassium; Evaporites; Geomechanics; Mining in the sea.

Agradecimentos

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

A meu querido Deus todo poderoso que me guia e fortalece na minha jornada, à professora Andréia pela presteza e boa vontade em me orientar, ao professor Michel Melo pelo apoio prestado como meu coorientador, ao professor Pedro Casagrande pelas importantes contribuições no que concerne à parte de geologia, a toda a estrutura do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional (CPGEM), a ANP pela presteza e cordialidade na disponibilização dos dados para meu projeto, ao professor Cláudio Lúcio pela disponibilidade e paciência em ensinar e por me fazer apaixonar pela área de lavra e geomecânica, ao meu grande amigo Pedro Nader pelo apoio no uso do software Micromine na parte de modelamento geológico e ao querido amigo e ex-colega Luciano Rodrigues pelo imenso apoio na estruturação dos dados e geração dos resultados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 Localização da Zona Econômica Exclusiva e da Plataforma Continental Jurídica brasileira. Os limites exteriores da Plataforma Continental, além das 200 milhas marítimas, foram submetidos em 2004, à deliberação na ONU. Fonte: Souza et al (2017)	20
Figura 3. 2 Rift com início da abertura continental. Fonte: IBP- Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (2016)	22
Figura 3. 3 Localização dos principais direitos minerários para sais de potássio requerido no Brasil em vermelho. Fonte: ANM (2019)	23
Figura 3. 4 Estratificação de rochas salinas (silvita, carnalita e halita) em galeria da Mina Taquari-Vassouras. Fonte: Botelho (2017)	23
Figura 3. 5 Esquemática do sistema petrolífero do pré-sal (a) evaporito (sal) e (b) carbonato. Fonte: Botelho (2017)	25
Figura 3. 6 Curva genérica de fluência. Fonte: Botelho (2017)	28
Figura 3. 7 Curva genérica de fluência ao longo do tempo. Fonte: Botelho (2017)	29
Figura 3. 8 Mecanismos de deformação por fluência. Fonte: Pinto (1995)	30
Figura 3. 9 Comparação entre os dados medidos in-situ e o modelo proposto por Pinto (1995)	35
Figura 3. 10 Amostragem de rocha salina - testemunhos e preparação de corpo de prova. Fonte: Botelho (2017)	36
Figura 3. 11 Equipamento para o ensaio triaxial de fluência. Fonte: Botelho (2017)	37
Figura 3. 12 Intercorrências em perfurações de poços atravessando rochas salinas - enfoque geral. Fonte: Botelho (2017)	38
Figura 3. 13 Intercorrências em perfurações de poços atravessando rochas salinas - enfoque evaporíticos. Fonte: Botelho (2017)	39
Figura 3. 14 Dobramento da coluna de revestimento em trecho salino de um poço. Fonte: Botelho (2017)	40
Figura 3. 15 Preço US\$/t de potássio. Fonte: INDEX MUNDI (2020)	41
Figura 3. 16 Configuração de um poço para lavra por dissolução de sais impermeáveis. Schlitt & Larson (1985)	44

Figura 3. 17 Sucessivas camadas de corte que ocorrem em sais impermeáveis utilizando-se lavra por dissolução à medida que o tubo de revestimento do poço é elevado. Schlitt & Larson (1985).....	45
Figura 3. 18 Visão de topo de cinco cavidades salinas resultantes do processo de lavra por dissolução no domo salino de Bryan Mound, Freeport - Texas. Schlitt & Larson (1985).....	46
Figura 3. 19 Configuração poços multidirecionais. Fonte: Bosworth, et al., Key Issues in Multilateral Technology, (2016).....	48
Figura 3. 20 Diagrama de fase ternário a 100° C apresentando o circuito de evaporação para produzir potássio e uma solução residual rica em boro. Fonte: Mark (1964).....	50
Figura 3. 21 Tanque de evaporação solar e fluxo da salmoura simplificado. Fonte: Bartlett (2007).....	51
Figura 3. 22 Esquema simplificado dos tanques de cristalização de sais de potássio utilizado pela empresa Yancoal no Canadá. Fonte: Yancoal Canada (2016).....	51
Figura 3. 23 Curvas típicas de taxas de evaporação da salmoura, unidade de concentração gramas/cm ³ (g/cc)-dados para o hemisfério norte onde as estações são contrárias ao hemisfério sul. Fonte: Bartlett (2007).....	52
Figura 3. 24 Taxa de evaporação dependente da densidade da salmoura. Fonte: Bartlett (2007).....	53
Figura 3. 25 Carta estratigráfica da Sub-bacia de Sergipe. Fonte: Souza-Lima (2005) .	57
Figura 3. 26 Seção tipo para a Formação Muribeca no poço 1PM0001SE, localizado a cerca de 4 km a NW da cidade de Carmópolis (modificado de Feijó, (1994)).	60
Figura 3. 27 Seção-tipo para o Membro Carmópolis da Formação Muribeca no poço 1CP0008SE (modificado de Schaller (1970)).	61
Figura 3. 28 Seção-tipo para o Membro Ibura da Formação Muribeca no poço 7CP0072SE (modificado de Schaller (1970)).	62
Figura 3. 29 Seção-tipo para o Membro Oiteirinhos da Formação Muribeca no poço 1CPB0001ASE (modificado de Schaller (1970))	62
Figura 3. 30 Arcabouço estrutural da Bacia Sergipe - Alagoas, exibindo os grandes compartimentos tectônicos e falhas principais, em vermelho área de trabalho. Fonte: Falkenhein (1986).....	66

Figura 3. 31 Seção geológica da Sub-Bacia de Sergipe. Modificado de C. & Mohriak (1998) . Fonte: retirado de Sá & Oliveira (2008).	67
Figura 3. 32 Esboço geológico do embasamento Pré-cambriano e bacias cretáceas entre o Lineamento Pernambuco e a região nordeste do Cráton São Francisco (modificado de (Lana, 1990)), em vermelho área de trabalho. Fonte: retirado de Sá & Oliveira (2008).	68
Figura 3. 33 Dobras e outras estruturas de fluxo dúctil-frágil nos evaporitos da Mina de Taquari-Vassouras (Mosaic, Rosário do Catete, SE). Em (A) e (B), observar a geometria curvilinear (sigmoidal em B) das superfícies de charneira (tracejadas), indicativas de gradientes de strain zonas de cisalhamento intra ou interestratais, associadas ao fluxo do sal. No detalhe em (C), as dobras assimétricas afetam o acamamento e superfícies de dissolução e soldamento subparalelas (estas últimas marcadas por picos estilolíticos e filmes escuros de material residual, insolúvel). Tais superfícies foram ativas durante o progressivo soterramento das camadas. Em (D), uma dobra assimétrica apresentando o flanco invertido falhado, indicando transição ao comportamento frágil. Essas condições transicionais se refletem em (E, rotação e faturamento distensional de um bloco acamadado) e (F, clastos entelhados e falhados) as setas indicam o sentido de cisalhamento aparente nas paredes das galerias. Fonte: Sá & Oliveira (2008)	69
Figura 3. 34 Navio de aquisição sísmica realizando levantamento de campo na Bacia de Santos. Fonte: SBGF (2012).....	70
Figura 3. 35 Perfil de raios gama e perfil espectral de raios gama e algumas respostas típicas de diferentes litologias. Fonte: Rider (2002).....	72
Figura 3. 36 Algumas respostas típicas para o perfil de densidade. Fonte: Rider (2002).	73
Figura 3. 37. A variedade de velocidades e o intervalo de tempo de trânsito das principais litologias. Fonte: Rider (2002).....	74
Figura 4. 1 Esquemático do processo de mapeamento de um horizonte no software DUG. Fonte: arquivo próprio - Dug Insight (2020)	76
Figura 4. 2 Esquemático do processo de mapeamento do horizonte (Membro Ibura) no software Kindgom. Fonte: arquivo próprio - IHS Markit (2020).....	76

Figura 4. 3 Linhas do horizonte do topo do membro Ibura (modelo em profundidade) que foram exportadas do software Kindgom para o Micromine para posterior geração de superfície, por meio de métodos de interpolação. Fonte: IHS Markit (2020). 77

Figura 5. 1 Painel estratigráfico ilustrativo mostrando o comportamento dos perfis geofísicos numa formação salina. O retângulo vermelho destaca o comportamento das curvas de densidade, sônico e Gamma Ray diante da ocorrência de sal de potássio. Fonte: Christopher *et Al.* (2015) 79

Figura 5. 2 Esquemático perfilagem do poço 1-SES-1A-SE, mostrando o comportamento das curvas sônica (DT), gamma ray (GR) e densidade (RHOB) na presença de corpos de sais de potássio. Fonte: autoria própria (2020) 80

Figura 5. 3 Esquemático perfilagem do poço 1-SES-3-SE, mostrando o comportamento das curvas sônica (DT), gamma ray (GR) e densidade (RHOB) na presença de corpos de sais de potássio. Fonte: autoria própria (2020) 81

Figura 5. 4 Esquemático perfilagem do poço 1-SES-8-SE, mostrando o comportamento das curvas sônica (DT), gamma ray (GR) e densidade (RHOB) na presença de corpos de sais de potássio. Fonte: autoria própria (2020) 82

Figura 5. 5 Modelo geológico do Membro Ibura com litologia cortada pelos poços (Vista 45° SW). Fonte: (Micromine, 2020) 83

Figura 5. 6 Modelo geológico do Membro Ibura (Vista 45° SW). Fonte: (Micromine, 2020) 83

Figura 5. 7 Seção do Modelo geológico cortando os poços 1-SES-3-SE e 1-SES-8-SE (Linha azul representa o corte da seção). Fonte: (Micromine, 2020) 84

Figura 5. 8 Seção do Modelo geológico cortando os poços 1-SES-3-SE e 1-SES-1A-SE (Linha azul representa o corte da seção). Fonte: (Micromine, 2020) 85

Figura 5. 9 Seção do Modelo geológico cortando os poços 1-SES-1A-SE e 1-SES-8-SE (Linha azul representa o corte da seção). Fonte: (Micromine, 2020) 86

Figura 5. 10 Mapa de localização do poço. Fonte: Nader (2021) 90

Figura 5. 11 Grid sísmica do topo do Membro Ibura. Fonte: Nader (2021) 91

Figura 5. 12 Membro Ibura interpretado da sísmica. Fonte: Nader (2021) 92

Figura 5. 13 Pontos de controle do sal. Fonte: Nader (2021). 94

Figura 5. 14 Topo de sísmica interpretado e topo da camada salina. Fonte: Nader (2021).	95
Figura 5. 15 Linha de interpretação sísmica, topo e base do contato de sal. Fonte: Nader (2021).	96
Figura 5. 16 Pontos de controle da base do sal. Fonte: Nader (2021).	96
Figura 5. 17 Horizonte final da base do sal criado. Fonte: Nader (2021).	97
Figura 5. 18 Perfis de topo e base do sal gerado. Fonte: Nader (2021).	98
Figura 5. 19 Linha azul representando o limite do modelo para estimativa de recursos. Fonte: Nader (2021).	98
Figura 5. 20 As seções de perfil do modelo mostram que a parte superior e a inferior respeitam os contatos. Fonte: Nader (2021).	99
Figura 5. 21 Layouts de lavra, realce cilíndrico. Modelo obtido variando-se a distância entre os realces, ou seja, o tamanho do pilar. Rec 1 distância entre realce de 75 m, Rec 2 distância entre realces de 37,5 m, Rec 3 distância entre realces de 56,25 m e Rec 4 distância entre realces de 20 m. Lembrando que os furos foram feitos todos em uma área de 1 km ² . Fonte: AutoCad (2020).	103
Figura 5. 22 Layouts de lavra, realce elíptico. Modelo obtido variando-se a distância entre os realces, ou seja, o tamanho do pilar. Rec 1 distância entre realce de 75 m, Rec 2 distância entre realces de 37,5 m, Rec 3 distância entre realces de 56,25 m e Rec 4 distância entre realces de 20 m. Lembrando que os furos foram feitos todos em uma área de 1 km ² . Fonte: AutoCad (2020).	104
Figura 5. 23 Curva de solubidade do cloreto de potássio (KCl). Fonte: IUPAC (2020).	105
Figura 5. 24 Distância do centro da anomalia à costa sergipana. Fonte: Google (2020)	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Íons dissolvidos na água marinha	21
Tabela 3.2. Propriedades físicas de algumas rochas evaporíticas.....	26
Tabela 3.3. Constantes do material salino	36
Tabela 3.4. Alguns dados de produção, consumo e mercado dos sais de potássio.....	40
Tabela 3.5. Principais países produtores e detentores e reservas no ano de 2018	41

Tabela 5. 1 Informações gerais do furo.	87
Tabela 5. 2 Informações gerais a partir do nível do mar.	87
Tabela 5. 3 Distribuição de frequência de ocorrência por Unidade Geológica.	87
Tabela 5. 4 Caracterização de estéril e minério	89
Tabela 5. 5 Reporte Micromine, volume Membro Ibura	100
Tabela 5. 6 Cálculo da fração volumétrica em % de sais de potássio no estrato salino	100
Tabela 5. 7 Teor médio ponderado do sal de potássio.....	101

LISTA DE FLUXOGRAMA

Fluxograma 3. 1 Processo de beneficiamento convencional de sais de potássio. Fonte: 911 Metallurgist (2019)	55
Fluxograma 4. 1 Passo a passo do trabalho no Kindgom. Fonte: arquivo próprio (2020).	75

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1. Frost & Ashby (1982)	31
Equação 3.2. Munson & Dawson (1981).....	32
Equação 3.3. Raj & Ashby (1971).....	32
Equação 3.4. Munson & Dawson (1981).....	33
Equação 3.5. Efeito do endurecimento no tempo	33
Equação 3.6. Lei de Bailey Norton.....	33
Equação 3.7. Equação constitutiva Ducan & Lajtai, E. (1972)	34
Equação 3.8. Equação constitutiva de Salamon (1970).....	34
Equação 3.9. Equação constitutiva de Menzel & Schreiner (1977)	34
Equação 3.10. Equação constitutiva de Pinto (1995)	35

Lista de siglas

Agência Nacional de Mineração (ANM)
Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)
American Petroleum Institute (API)
Bacia Sergipe Alagoas (BSA)
British Broadcasting Corporation (BBC)
Centro de pesquisas econômicas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (CEPEA)
Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional (CPGEM)
Densidade (RHOB)
Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM)
Descrição de amostras de calha (DAC)
Desmontagem, transporte e montagem (DTM)
Free on Board (FOB)
Gamma Ray (GR)
Mercado Comum do Sul (MERCOSUL)
Organizações das Nações Unidas (ONU)
Produto interno Bruto (PIB)
Run of Mine (ROM)
Sergipe (SE)
Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGF)
Sub-bacia Alagoas (SBAL)
Sub-bacia Sergipe (SBSE)
United States Geological Survey (USGS)
Universidade de São Paulo (USP)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Velocidade sônica (DT)

SUMÁRIO

1	
.	INTRODUÇÃO 17
2.	OBJETIVOS 18
2.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... 18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
3.1	ROCHAS EVAPORÍTICAS 20
3.1.1	Depósitos de rochas evaporíticas da plataforma continental brasileira e áreas oceânicas adjacentes. 20
3.1.2	Geomecânica de rochas evaporíticas 24
3.1.3	Comportamento de fluência..... 27
3.1.4	Ensaio triaxial de fluência..... 36
3.1.5	Poços em rochas salinas..... 37
3.1.6	Aspectos econômicos e de mercado relacionados aos evaporitos 40
3.2	LAVRA POR DISSOLUÇÃO (Solution mining) 42
3.2.1	Tecnologia aplicada à lavra por dissolução de evaporitos permeáveis. 42
3.2.2	Tecnologia aplicada à lavra por dissolução de evaporitos impermeáveis 43
3.2.3	Características da perfuração e completação de poços para lavra por dissolução 46
3.3	BENEFICIAMENTO DA SALMOURA 49
3.3.1	Circuitos de cristalização de salmouras evaporíticas..... 49
3.3.2	Processo de concentração do potássio 49
3.3.3	Tanques de evaporação solar 50
3.3.4	Taxas de evaporação 51
3.3.5	Depósitos salinos e salmouras 53

3.3.6	Processamento mineral convencional de sal de potássio.....	54
3.4	ANOMALIA DE SAIS DE POTÁSSIO NA COSTA DE ARACAJU – SE.....	56
3.4.1	Geologia regional.....	56
3.4.2	Formação Muribeca: definição e relações estratigráficas.....	58
3.4.3	Seções tipo	59
3.4.4	Fácies e Sistemas Depositionais.....	62
3.5	Interpretação geofísica: sísmica aplicada à evaporitos	69
3.6	Petrofísica aplicada à evaporitos.....	71
4.	METODOLOGIA	74
5.	RESULTADOS	78
5.1	Petrofísica e modelagem geológica.....	78
5.2	Layout de lavra.....	102
6.	CONCLUSÕES	108
	REFERÊNCIAS.....	110

1. INTRODUÇÃO

Um fato notório e importante em termos econômicos e estratégicos é a dependência brasileira de insumos salinos de potássio importados DNPM e USGS (2014). O potássio é um insumo fundamental para a produção de fertilizantes, como o setor agrícola representa 21,4% do PIB total brasileiro CEPEA (2020) dado de 2019, pode-se ter uma noção da dependência interna por essa *commodity*. De acordo com o DNPM e USGS (2014), no ano de 2014 o Brasil produzia somente 10% do insumo total de potássio necessários para a produção de fertilizantes, o restante era importado de países como Marrocos, Rússia, Israel, China e EUA.

Vale ressaltar que a importação de insumos de potássio representou 36,9% em quantidade ou 39,3% em valor, do total de bens minerais importados pelo país no primeiro semestre de 2019 (ANM, 2019).

Visando pôr fim a essa dependência brasileira de sais de potássio importado, este trabalho tem como objetivo investigar possíveis soluções técnicas para se explorar sais de potássio no ambiente marinho. Já que, de acordo com a reportagem da BBC Brasil (2020), hoje o ambiente marinho já é considerado a nova fronteira da mineração e a corrida para se conquistar o pioneirismo em termos tecnológicos e intelectual já começou.

Através de um trabalho de pesquisa prévio, encontrou-se uma anomalia de sais de potássio mapeada pelo Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (2019) na costa sergipana. Com essas informações, iniciou-se a busca por dados de perfilagem e perfuração de poços de petróleo dessa região junto à ANP, com o objetivo de se determinar a viabilidade técnica da exploração dessa possível jazida por meio do uso de lavra por dissolução.

Como subsídio deste trabalho, será feito uma revisão bibliográfica a respeito de rochas evaporíticas, ambiente de formação de evaporitos, geomecânica de rochas evaporíticas, lavra por dissolução e beneficiamento da salmoura. Espera-se, com isso, modelar essa anomalia geológica e construir um possível layout de lavra.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar a viabilidade técnica da exploração de sais de potássio no subsolo marinho através de lavra por dissolução. Logo, pretende-se:

- modelar a anomalia mineral como subsídio para se construir um layout de lavra;
- definir os parâmetros técnicos de lavra e possíveis rotas de beneficiamento.

Será feita uma revisão bibliográfica sobre geomecânica de rochas evaporíticas, lavra por dissolução, beneficiamento de salmoura, dentre outros assuntos de relevância para esse trabalho.

Tal estudo é inovador, pois busca uma alternativa econômica para a exploração de depósitos minerais que seriam inviáveis de serem explorados por meio de métodos convencionais de lavra a céu aberto e subterrânea, dado que, o ambiente de pesquisa em questão é marinho. Além disso, possibilitaria a lavra de uma *commodity* mineral (sais de potássio), de suma importância para a economia brasileira tal como demonstrado em DNPM e USGS (2014), posto que, o Brasil é um grande importador de sais de potássio para a produção de fertilizantes (ver tabela 3.4), contribuindo assim, para a o saldo positivo da balança comercial brasileira.

2.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A fim de se estudar a viabilidade técnica da exploração de sais de potássio no subsolo marinho estruturou-se esse trabalho em 6 capítulos.

No primeiro capítulo é realizado uma breve introdução ao tema a ser pesquisado, definindo-se alguns conceitos que serão úteis ao restante dessa investigação.

No segundo capítulo, definiu-se os objetivos e a estruturação desse trabalho.

No terceiro capítulo é realizado uma revisão bibliográfica a respeito de rochas evaporíticas, discutindo-se os seguintes temas: depósitos de rochas evaporíticas localizados na plataforma continental brasileira e áreas adjacentes, geomecânica de rochas evaporíticas e aspectos econômicos e de mercado relacionados aos evaporitos, metodologia de lavra por dissolução (tecnologia aplicada a lavra por dissolução de evaporitos permeáveis e impermeáveis bem como as características da perfuração), beneficiamento mineral aplicado à concentração de sais de potássio oriundos de salmouras e a caracterização e análise estratigráfica da ocorrência mineral.

No quarto capítulo será descrito toda a metodologia de trabalho: fonte de dados, processamento, dentre outras informações pertinentes.

No quinto capítulo será apresentado os resultados dessa pesquisa, como, por exemplo: modelo geológico, recursos potenciais, parâmetros de lavra (teor, recuperação e diluição), custo simplificado de opex e capex do empreendimento.

No sexto capítulo será exposto as conclusões desse trabalho, parâmetros operacionais mais adequados, layout do processo de extração, beneficiamento e seu impacto econômico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ROCHAS EVAPORÍTICAS

3.1.1 Depósitos de rochas evaporíticas da plataforma continental brasileira e áreas oceânicas adjacentes.

Segundo Souza (2010), a Plataforma Continental Jurídica Brasileira, com uma área de 4,5 milhões de quilômetros quadrados, é o espaço geográfico marinho sobre o qual o Brasil exerce direito de soberania para efeitos de exploração e aproveitamento dos seus recursos naturais. Constituída pelo Mar Territorial Brasileiro, a Zona Econômica Exclusiva e a área de extensão da plataforma continental, além das 200 milhas náuticas, pleiteada junto às Organizações das Nações Unidas (ONU) (Figura 3.1) como uma extensão dessa zona. Nesta zona, existem importantes depósitos de evaporitos, hidrocarbonetos, *placers* (ouro, diamante e etc), nódulos de manganês e agregados de construção civil (areia e cascalho). Neste trabalho, focaremos nas ocorrências de evaporitos, sobretudo, sais de potássio.

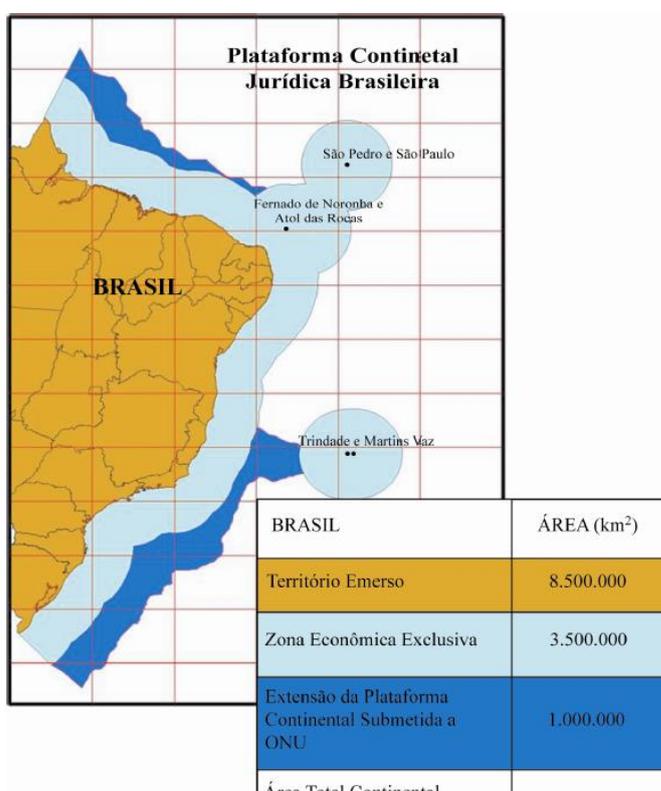


Figura 3. 1 Localização da Zona Econômica Exclusiva e da Plataforma Continental Jurídica brasileira. Os limites exteriores da Plataforma Continental, além das 200 milhas marítimas, foram submetidos em 2004, à deliberação na ONU. Fonte: Souza et al (2017)

De acordo com Silva *et al.* (2001), evaporitos são rochas de origem sedimentar comumente formada em ambientes de sedimentação de baixo aporte de terrígenos, submetidos a clima seco, onde a taxa de evaporação da água é elevada, permitindo a formação de uma salmoura a partir da qual minerais evaporíticos se formam, esse processo conduz à deposição de minerais na ordem inversa de suas solubilidades. Um depósito evaporítico típico, contém camadas de halita (NaCl), silvinita (KCl.NaCl), silvita (KCl), calcita (CaCO₃) e ou/ dolomita (MgCO₃), carnalita (CaCl₂.KCl.6H₂O), taquidrita (MgCl₂.CaCl₂.12H₂O) e ou minerais sulfatados: anidrita (CaSO₄). Além disso, metais como: magnésio e lítio são derivados de salmouras.

Segundo Bartlett (2007): “normalmente os carbonatos insolúveis precipitam primeiro, seguido por gesso (CaSO₄.2H₂O), polihalita (K₂Ca₂Mg(SO₄)₄) e halita. Depois que 91,7% da água do mar evaporou, a halita cristaliza. O gesso pode se desidratar e transformar em anidrita (CaSO₄), que é frequentemente uma camada que recobre a sequência marinha evaporítica. Outros sais são formados após a saturação da halita, como por exemplo os sais de potássio: silvita (KCl), carnalita (KMgCl₃.6H₂O) e langbeinita (K₂Mg₂(SO₄)₃).” Adicionalmente, de acordo com Schlitt & Larson (1985) a concentração da salmoura pode gerar bischofita (MgCl₂.6H₂O), porém este mineral raramente é encontrado em evaporitos marinhos devido à rápida resolubilização gerando carnalita secundária. Schlitt & Larson (1985) afirmam ainda que o mineral langbeinita somente é favorecido em temperaturas acima de 40°C, indicando uma alta temperatura durante a cristalização nos depósitos do New Mexico, onde ele ocorre. Já o mineral taquidrita (CaCl₂.MgCl₂.12H₂O) é observado a baixas temperaturas, sendo abundante no Brasil e na África. Este sal se precipita abaixo de -15°C a partir de salmouras enriquecidas em cloretos de sódio e magnésio, indicando um clima ártico durante a deposição Schlitt & Larson (1985).

Schlitt & Larson (1985) afirmam que a sequência deposicional é frequentemente episódica, causando uma série de estratos horizontais intercalados com níveis de siltito e argilito. Posteriormente essas camadas podem ser remobilizadas, falhadas e deformadas.

Com base nos estudos de Bartlett (2007) o sal mais abundante da terra é a halita (NaCl), depositada em estratos rochosos, resultante do processo de precipitação devido à evaporação da água do mar. Ainda segundo o mesmo autor, a composição da água do mar é ilustrada na Tabela 3.1, e acredita-se que ela tenha se mantido aproximadamente constante ao longo do tempo geológico.

Tabela 3.1. Íons dissolvidos na água marinha

Cátions (%)	Ânions (%)
-------------	------------

Na	30,61	Cl	55,00
Mg	3,69	SO ₄	7,64
Ca	1,16	HCO ₃	0,41
K	1,10		

Fonte: Bartlett (2007)

Segundo Bartlett (2007), à medida que as salmouras se concentram, elas se tornam mais densas e migram para depressões nas bacias evaporíticas, onde pode ocorrer maior concentração durante a evaporação nos flancos rasos da bacia. A sequência de evaporação também depende da temperatura. De acordo com Silva *et al.* (2001), camadas de silvita com teores comercialmente interessantes são formadas, eventualmente, por alteração secundária devido à percolação de salmouras enriquecidas em sulfato, mais comumente em evaporitos do período Permiano.

De acordo com Feijó (1994), os depósitos evaporíticos das bacias marginais brasileiras são de idade aptiana (125 Ma), foram formados a partir de vários processos relativos à ruptura do Gondwana e formação do Oceano Atlântico Sul. Ainda segundo o mesmo autor, a precipitação dos evaporitos ocorreu durante a formação de um ambiente marinho restrito (Figura 3.2), denominado golfo, que sucedeu a fase inicial de rifteamento, onde ambientes continentais prevaleciam, e antecedeu a fase marinha carbonática relativa a um mar raso que evoluiu para a bacia oceânica do Atlântico Sul. Esses depósitos evaporíticos formaram um pacote espesso, de 1 km ou mais localmente (Feijó, 1994), que caracteriza um importante marco estratigráfico observado em poços e seções sísmicas obtidos na margem continental.



Figura 3. 2 Rift com início da abertura continental. Fonte: IBP- Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (2016)

Segundo Morais (2013), a bacia evaporítica marginal brasileira é constituída de depósitos de anidrita (Figura 3.3), gipsita, salgema e sais de potássio e magnésio, se estende desde o Platô de São Paulo, ao sul, até a Bacia de Alagoas, ao norte, ocorrendo na porção emersa de algumas bacias marginais, como é o caso das bacias do Espírito Santo e de Sergipe-Alagoas.

Os pontos em vermelhos na figura 3.3 são todos os direitos minerários para sais de potássio requerido.



Figura 3. 3 Localização dos principais direitos minerários para sais de potássio requerido no Brasil em vermelho.
Fonte: ANM (2019)

Silva *et al.* (2001) afirma que a formação salina pode ocorrer tanto estratificada (figura 3.4), quanto formando domos ou estruturas do tipo almofada. Os domos ocorrem na porção sul e no leste-meridional da bacia evaporítica. Na bacia de Sergipe-Alagoas, onde a formação salina se encontra estratificada ou formando almofadas, já foram encontrados sais de potássio e magnésio em poços perfurados pela Petrobras na plataforma fronteira à Aracaju (SE), essa camada de sal tinha uma espessura aproximada entre 15 e 50 m e situa-se pouco abaixo de 3000 metros de profundidade. Tal camada será objeto de estudo neste trabalho.

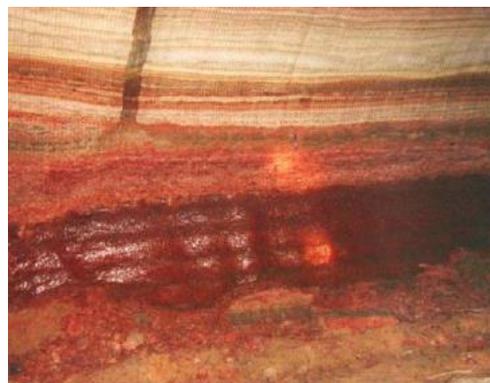


Figura 3. 4 Estratificação de rochas salinas (silvita, carnalita e halita) em galeria da Mina Taquari-Vassouras. Fonte: Botelho (2017)

Um poço perfurado pela Petrobras na área de Barra Nova, fronteira do Espírito Santo, detectou a ocorrência de áreas com domos de sal, contendo halita de elevada pureza. Esses domos juntamente com os que ocorrem nas áreas de Abrolhos Norte e Mucuri na Bahia, poderão se tornar prospectos economicamente interessantes. Isso em virtudes das profundidades relativamente rasas, tanto das respectivas lâminas d'água como dos topos dos domos, alguns quase aflorantes no piso marinho. Além disso, essas ocorrências estão próximas a grandes centros consumidores como o sudeste brasileiro e países do Mercado Comum do Sul (MERCOSUL).

Tendo em vista este conhecimento, por meio do uso combinado de dados de poços de petróleo: perfil composto, descrição de amostras de calha (DAC), perfilagem geofísica, dentre outros dados fornecido pela ANP e dados disponibilizados por agentes da Agência Nacional de Mineração (ANM) e CPRM, realizou-se nesse trabalho o mapeamento de uma anomalia de sal de potássio da costa sergipana. Vários estudos de viabilidade técnica para sua exploração, tais como: modelagem geológica, sequenciamento de lavra e alguns estudos simulados de recuperação e taxa de dissolução a nível de lavra e beneficiamento foram realizados.

3.1.2 Geomecânica de rochas evaporíticas

Silva *et al.* (2001) descreve os evaporitos como rochas formadas a partir da cristalização de minerais precipitados pela evaporação da água salgada, ou seja, um material inorgânico e de ligação atômica iônica. De acordo com Botelho (2017), o caráter iônico e a estrutura cristalina têm relação direta com o mecanismo de fluência proeminente nessas rochas. Para Mohriak *et al.* (2009), sais “não são propriamente rochas: são solúveis, vieram de líquidos e a eles retornam assim que possível”. Esses autores caracterizam os sais como rochas temporárias ou móveis, movimento esse que pode ser analisado sob enfoque químico, no que diz respeito à dissolução e físico quanto ao fluxo sólido por fluência.

Segundo Baar (1977), do ponto de vista geomecânico, rochas salinas em campo são altamente dúcteis e exibem comportamento viscoplástico. Apresentam resistência relativamente baixa, estão próximas à transição entre rochas brandas e duras, além disso, exibem alta mobilidade devido ao comportamento viscoso.

Vale ressaltar que nem todos os evaporitos exibem comportamento de fluência para fins de engenharia. De acordo com Baar (1977):

“Rochas salinas são detentoras de propriedades físicas raras e exibem comportamento mecânico único. Entretanto, alguns tipos de evaporitos como a anidrita ou dolomita, apresentam comportamento geomecânico que se

assemelha mais aos de rochas sedimentares comuns, do que a de rochas salinas.”

Por esse motivo, faz-se necessário distinguir rochas salinas de outros evaporitos, como anidrita ou dolomita, no que diz respeito às propriedades físicas e ao comportamento mecânico.

O fenômeno de fluência, traduzido em deformações lentas e contínuas, é algo a que se deve especial atenção em rochas salinas. De acordo com Pinto (1995), a tensão de Von Mises é utilizada em equações constitutivas do comportamento mecânico de fluência, por apresentar valores sempre positivos e por estar relacionada aos três eixos direcionais.

Serata & Schultz (1972) definiram dois tipos diferentes de mecanismos de ruptura de teto em rochas salinas, que são: *mass failure* (instabilidade global) e *slab buckling* (flambagem de laje). *Mass failure* é uma consequência direta de uma magnitude de tensão maior do que a resistência da rocha. O *slab buckling* (flambagem de laje) é causado pela presença de planos de debilidade ou descontinuidades no estrato, permitindo assim um movimento lateral excessivo.

A porosidade e permeabilidade de sais é funcionalmente nula, sugerindo uma capacidade selante que torna as rochas salinas perfeitas para aprisionar fluidos e gases, como acontece na bacia petrolífera do pré-sal (Figura 3.5), bem como, em conjunto com a fluência, o encapsulamento de materiais de descarte.



Figura 3.5 Esquemática do sistema petrolífero do pré-sal (a) evaporito (sal) e (b) carbonato. Fonte: Botelho (2017)

Considerando a porosidade do sal praticamente desprezível, é possível também sugerir que ele não sofre efeito de compactação, ou seja, é incompressível e sua densidade pode ser

assumida constante com a profundidade (Botelho, 2017). Nos modelos de comportamento viscoplástico dos sais a variação da deformação volumétrica é nula.

Botelho (2017) define uma outra importante propriedade dos sais que é a capacidade de cura ou cicatrização (*self-healing*). Com isso, devido às deformações lentas do sal mesmo para um elevado nível de descontinuidades, trincas e fraturas, essas podem ser fechadas naturalmente, retornando à condição íntegra.

De acordo com Baar (1977), a resistência à compressão simples das rochas salinas mais comuns está em torno de 35 a 40 Mpa. Com relação à escavabilidade, em geral podem ser desmontadas mecanicamente (sem uso de explosivo), sendo facilmente perfuradas ou escavadas.

Outro ponto importante, que será fundamental para o novo método de lavra de evaporitos que é aqui proposto e que tem como base uma técnica de lavra já conhecida (lavra por dissolução) é a alta solubilidade das rochas salinas em água.

A tabela 3.2 apresenta as propriedades físicas típicas de algumas rochas salinas.

Tabela 3.2. Propriedades físicas de algumas rochas evaporíticas

Rochas salinas		Composição química	Peso específico (kg/m ³)	Resistência a Compressão Simples (MPa)
Halita		NaCl	2170,0	37,3
Silvita		KCl	1998,0	42,3

Carnalita		$MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$	1570,0	19,7
Taquidrita		$CaCl_2 \cdot MgCl_2 \cdot 12H_2O$	1700,0	3,0

Fonte: PUC RIO, Rio de Janeiro (2017)

3.1.3 Comportamento de fluência

No estudo geomecânico de rochas evaporíticas, ao contrário da grande maioria das rochas, nas quais a estabilidade das intervenções é avaliada com base no modelo de comportamento mecânico elasto-plástico, o mecanismo de fluência torna-se uma condicionante mais importante para essa análise (Botelho, 2017), dadas as condições de temperatura e pressão encontradas nas operações usuais. Deformações lentas e contínuas, dependentes do tempo, prevalecem sobre as trincas e fraturas, que tendem inclusive a ser fechadas devido à capacidade de “cura” do sal.

O fenômeno de fluência consiste na ocorrência progressiva de deformações viscoplásticas em regime de tensão e temperatura constantes. Segundo Baar (1977), rochas salinas *in situ* apresentam comportamento elastoviscoplástico, altamente dúctil. Um material salino comporta-se como um material elástico até que ocorra uma alteração no estado de tensões cuja diferença entre as tensões principais exceda seu limite de elasticidade. Quando isso ocorre, o material começa a se deformar viscoplasticamente por fluência até que um novo limite de deformabilidade é estabelecido.

Quando um poço, túnel ou galeria é escavado no material salino, ocorre a remoção de material e, conseqüentemente, o desconfinamento da rocha circundante. Com isso, são provocadas alterações no estado de tensões do maciço, deflagrando o comportamento de fluência. Vale lembrar que a fluência se administra e não se controla, ou seja, dimensiona-se as estruturas para que mesmo com a fluência do material durante a vida útil da estrutura, seu risco seja minimizado.

Ainda que se reforce a escavação com cambotas metálicas, concreto projetado e tirantes, e se utilize preenchimento com fluido e revestimento metálico, no caso de poços, a reposição das tensões confinantes aliviadas é apenas parcial.

Segundo Goodman (1989), o mecanismo de fluência pode ter causas diferentes dependendo do tipo de rocha. Em sais e minério de potássio (rochas salinas), a fluência causa movimentos de discordâncias e deslizamentos intracristalino. Já no caso de rochas argilosas, ela tende a provocar compactação – fenômeno que usualmente não é considerado nos sais (Goodman, 1989). Rochas betuminosas são inerentemente viscosas, sobretudo em altas temperaturas.

O fenômeno de fluência é representado tradicionalmente por três fases: fluência primária ou transiente (*primary creep* ou *transiente creep*), fluência secundária, estacionária ou permanente (*secondary creep* ou *steady-state creep*) e fluência terciária ou acelerativa (*terciary creep* ou *accelerative creep*). (Figura 3.6)

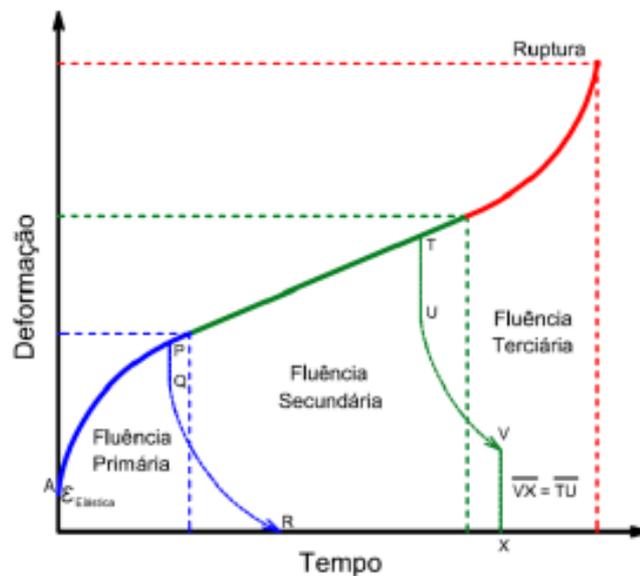


Figura 3. 6 Curva genérica de fluência. Fonte: Botelho (2017)

Na figura 3.7, observa-se a curva típica da taxa de fluência ao longo do tempo de um material.

A fluência primária corresponde ao trecho inicial da curva de deformações, iniciando-se logo após a deformação elástica ($\xi_{\text{Elástica}}$) do material. Por conta do endurecimento (*hardening*), a taxa de deformação diminui ao longo do tempo até atingir um valor constante, ponto a partir do qual a fluência secundária tem início. (Figura 3.7). De acordo com Botelho (2017), tal fenômeno em rochas salinas *in situ* é de difícil compreensão. A partir da teoria da viscoplasticidade, o endurecimento pode ser controlado pela própria deformação ou pelo tempo, em mecanismos conhecidos como *strain hardening* ou *time hardening*.

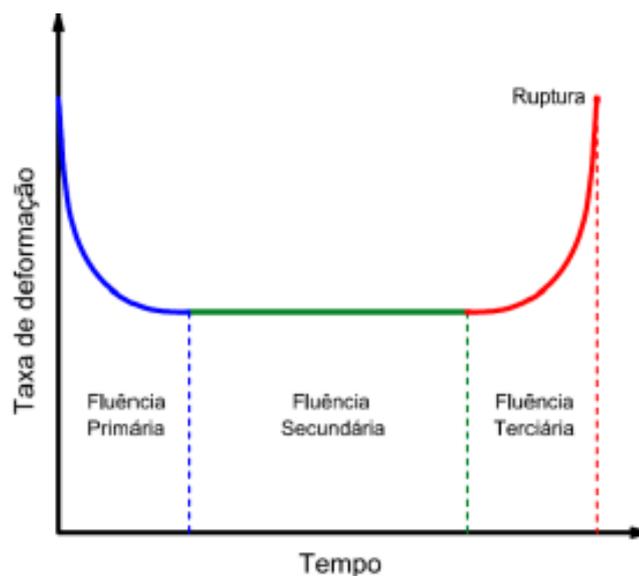


Figura 3.7 Curva genérica de fluência ao longo do tempo. Fonte: Botelho (2017)

Ainda que, o endurecimento por deformação (*strain hardening*) seja observado em ensaios de laboratório convencionais para análise de fluência, tais como uniaxial e triaxial, Baar (1977) nega a ocorrência desse mecanismo em rochas salinas *in situ*. Segundo ele, a deformação por fluência a longo prazo em sais não é afetada pelo endurecimento por deformação – isto é evidenciado por taxas de fluência constantes sob condições constantes. Entretanto, segundo Pinto (1995), instrumentações *in situ* mostram claramente a ocorrência do fenômeno como no fechamento do *shaft* da mina de Boulby na Inglaterra.

Na fluência primária, não haverá deformações, posto que essas ainda serão integralmente reversíveis. Uma vez suspenso o carregamento o material se recupera instantaneamente ao ponto inicial logo após a deformação elástica.

Na fluência secundária, trecho retilíneo na figura 3.8, considera-se que as deformações por fluência ocorrem em taxa constante no tempo, desde que as condições de carregamento e de temperatura permaneçam constantes.

No estudo de geomecânica das rochas salinas a fluência secundária é o fenômeno melhor compreendido e verificado em campo. Baar (1977) afirma que a fluência secundária é predominante no comportamento à fluência das rochas salinas em campo.

Observa-se na figura 3.6, que os caminhos PQ e TU representam a recuperação instantânea da componente de deformação elástica, se a tensão aplicada for reduzida a zero. O caminho QR mostra que se esta redução de tensão ocorrer na região de fluência primária, a recuperação da deformação tenderá assintoticamente a zero, ou seja, não haverá deformação permanente. Este fenômeno é chamado de viscoelasticidade ou elasticidade dependente do tempo. Já o caminho UV mostra que se a redução da tensão aplicada ocorrer na região de fluência secundária, a deformação final tenderá a um valor de deformação permanente (Jeremic, 1994)

Fluência terciária, corresponde ao trecho ascendente final da curva típica de fluência (Figura 3.6). Nessa fase, a taxa de fluência deixa de ser constante, crescendo exponencialmente ao longo do tempo, conforme vemos na figura 3.7.

Na fase terciária o regime é predominantemente viscoplástico. Segundo (Jeremic, 1994), na fase terciária, o material tende a dilatar, aumentando seu volume por micro-fraturamento e, a seguir, rompe bruscamente.

Segundo (Cruz, 2003), diversos mecanismos físicos de fluência vêm sendo sugeridos para explicar o comportamento desses materiais. Ainda de acordo com a autora, alguns exemplos desses mecanismos são: deslizamento de planos cristalográficos, cavalgamento de planos cristalográficos, fluência por difusão, entre outros. Para cada mecanismo são associadas formulações matemáticas que procuram descrever esses comportamentos. Todavia, as condições de pressão e temperatura encontradas normalmente nas escavações de evaporitos situam-se numa região onde nenhum mecanismo físico de deformação foi definido, como mostra a figura 3.8. Na literatura, é possível encontrar diversas formulações empíricas sugeridas para descrever matematicamente as deformações observadas nessas situações (Munson & Dawson, 1981).

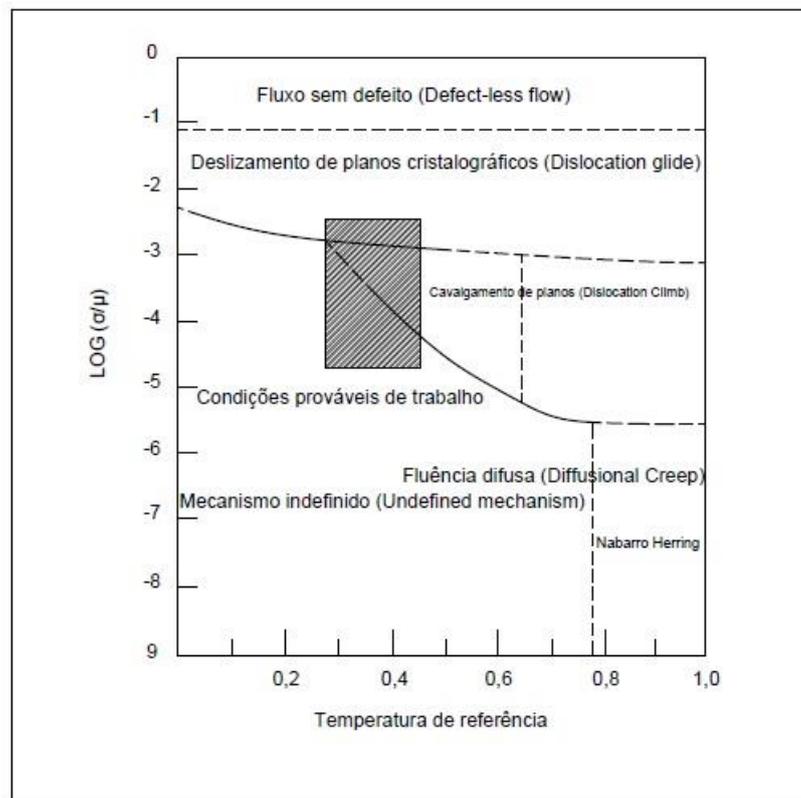


Figura 3. 8 Mecanismos de deformação por fluência. Fonte: Pinto (1995)

Mecanismos físicos de deformação descritos por Pinto (1995):

- *Defectless flow* (fluxo sem defeito): em condições de tensão suficientemente altas, um cristal inicialmente livre de defeito está sujeito a deformação após interação entre suas ligações atômicas. Para o início do defectless flow, a variável adimensional (σ/μ) é 0,086, σ é a tensão desviatória e μ é o módulo de cisalhamento, para temperatura de zero absoluto. Devido à grandeza da tensão, esse mecanismo é de pouca importância para fins de engenharia.
- *Dislocation glide* (deslizamento de planos cristalográficos): O sistema isométrico cúbico de cristalização, no qual o sal está incluído, possibilita inúmeros padrões de deslizamento, o quais permitem que os sais se deformem rapidamente pelo movimento de deslocamento. Este mecanismo é provavelmente influenciado pela tensão cisalhante, sendo um fenômeno planar. Para sais, o plano de deslizamento mais frágil é o que obriga os íons de mesma carga a se mover em direções opostas. O deslizamento de planos cristalográficos pode ser obstruído por diferentes sistemas de retenção, tais como redes que se intersectam, partículas de segunda fase e limites de grão. As deformações persistentes resultam no endurecimento e no aumento do fluxo de tensão. Uma equação constitutiva comum Eq. (3.1) para deslizamento de planos cristalográficos é dada por Frost & Ashby (1982):

Equação 3.1. Frost & Ashby (1982)

$$\dot{\epsilon}' = A \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 e^{\left[-\frac{\Delta F}{RT} \left(1 - \frac{\sigma}{\tau} \right) \right]}$$

Onde $\dot{\epsilon}'$ é a taxa de deformação, σ é a tensão desviatória, μ representa o módulo de cisalhamento, R é a constante de gás universal, T representa a temperatura absoluta, e A , ΔF , τ são constantes do material.

A expressão exponencial é a energia de ativação, que compreende termos de temperatura e tensão. Ela se aproxima da velocidade de deslocamento. O termo adimensional $(\sigma/\mu)^2$ descreve a relação entre a densidade de deslocamento e a tensão aplicada. No estado estacionário (região II, figura 3.8) a densidade de deslocamentos migratórios é proporcional ao quadrado da diferença de tensões no material.

- *Dislocation climb* (cavalgamento de planos cristalográficos): trabalhos experimentais sugerem que o deslocamento pode ser capaz de "cavalgar" um plano de deslizamento sobre outro. O cavalgamento de planos é caracterizado pelo deslocamento deste de uma posição pré-definida, onde o movimento foi restringido, para uma nova posição em que a mobilidade é permitida novamente. Exemplos de restrições foram discutidos antes

para o regime de deslizamento de planos cristalográficos. A equação (3.2), foi apresentada por (Munson & Dawson, 1981) para o cavalgamento de planos:

Equação 3.2. Munson & Dawson (1981)

$$\varepsilon' = Ae^{\frac{-Q_v}{RT}} \frac{Q_v}{RT} \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^n$$

Aqui, ξ' é a taxa de deformação, σ representa a tensão desviatória, μ simboliza módulo de cisalhamento, R é a constante de gás universal, T é a temperatura absoluta, Q_v indica a energia de ativação, A e n são constantes do material.

Esta equação constitutiva é muito frequente na literatura, sendo amplamente utilizada na modelagem numérica. O fator n varia de 1 a 2. Munson & Dawson (1981) obtiveram os seguintes valores de ajuste da curva para 87 testes de compressão uniaxial para sal-gema. As tensões utilizadas estavam na faixa de 2 a 18 MPa e as temperaturas variaram de 27° centígrados a 300° centígrados:

$$A=0,18 \text{ Ma}^{-5}/\text{dias}; n=5; Q_v=54 \text{ kJ/mol}; R= 8,3143 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/molK};$$

- *Diffusional creep* (fluência difusa): este mecanismo está relacionado às mudanças da forma do grão por transporte seletivo de material. É novamente subdividido em duas regiões: Nabarro-Herring (N-H) se o transporte é por difusão em volume e Coble (C) se o transporte é controlado pela difusão do limite de grão. O regime Nabarro-Herring é completamente substituído pelo mecanismo Coble para grãos com menos de 0,33 mm de diâmetro. Raj & Ashby (1971) desenvolveram a equação (3.3), para descrever esse fenômeno no estado estacionário:

Equação 3.3. Raj & Ashby (1971)

$$\varepsilon' = 14 \frac{\Omega}{kT} \cdot \frac{\sigma}{d^2} D_v \left[1 + \frac{\pi \varepsilon D_b}{d D_v} \right]$$

Aqui ξ' é a taxa de deformação, σ representa a tensão desviadora, Ω define o volume atômico das espécies difusoras, ξ é a espessura do limite efetivo, d define o tamanho do grão, T é a temperatura absoluta, D_v e D_b são as difusividades do volume e do limite respectivamente.

- *Undefined mechanism* (mecanismo indefinido): para condições de baixa tensão e temperatura, onde a energia de ativação é consideravelmente menor que a de qualquer

outro processo de deslocamento ou controle de difusão, nenhum mecanismo de deformação é definido. Embora a maioria das situações de mineração caia na faixa de tensão e temperatura desse regime, pouco é conhecido da natureza teórica desse mecanismo Munson & Dawson (1981) sugeriram o uso da equação 3.4 que se usava para o regime de cavalgamento de planos cristalográficos:

Equação 3.4. Munson & Dawson (1981)

$$\dot{\epsilon} = A_2 e^{-\frac{Qv_2}{RT}} \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{n_2}$$

Outras equações foram propostas com o objetivo de se considerar o efeito do endurecimento, observado principalmente em testes laboratoriais, ou para se descrever a fluência transiente. Normalmente um termo dependente do tempo é incluído na lei constitutiva discutida anteriormente para o cavalgamento de planos cristalográficos (*dislocation climb*) e mecanismo indefinido (*undefined mechanism*). Podendo ser exemplificada como:

Equação 3.5. Efeito do endurecimento no tempo

$$\dot{\epsilon} = A e^{-\frac{Qv}{RT}} \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^n t^m$$

Onde $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação, σ é a tensão desviatória, μ representa o módulo de cisalhamento, R é a constante de gás universal, T é a temperatura absoluta, Qv representa a energia de ativação, A e n são constantes do material. Para uma condição isotérmica, comumente nos referimos à lei de Bailey Norton, demonstrada pela equação 3.6:

Equação 3.6. Lei de Bailey Norton

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n t^m$$

Quinteiro (1992) usou uma técnica numérica para modelar a convergência de painéis na formação potássica e o fechamento do shaft na mina de sal de potássio de Boulby, usando a equação (3.6). Ele usou as seguintes constantes para simular o endurecimento no tempo/período/deformação observado nesta instância:

Rocha salina e potássio:

$$\begin{aligned} A &= 2,80 \times 10^{-11} \text{ MPa}^{-3,6} \text{ s}^{-1} \\ n &= 3,6 \\ m &= -0,51 \end{aligned}$$

Carnalita:

$$\begin{aligned} A &= 2,24 \times 10^{-10} \text{ MPa}^{-3,6} \text{ s}^{-1} \\ n &= 3,6 \\ m &= -0,51 \end{aligned}$$

Testes de fluência uniaxial nas rochas salinas potássicas de Esterhazy e Patience-Lake, foram conduzidos e modelados por Ducan & Lajtai, E. (1972), usando uma formulação diferente. O valor da constante de tensão (σ) foi incluída na potência do termo referente ao tempo (t). A equação (3.7) constitutiva usada em seu estudo foi:

Equação 3.7. Equação constitutiva Ducan & Lajtai, E. (1972)

$$\xi_a = A\sigma^n t^{m\sigma}$$

Aqui ξ_a representa a microdeformação axial e as constantes do material A , n e m são dadas por $0,75\text{MPa}^{-2}\text{s}^{-0,048}$, $2,0$ e $-0,048$ respectivamente.

A inclusão explícita do tempo nas formulações acima provou ser problemática em aplicações práticas na indústria da mineração. Duas escavações contíguas introduzidas em tempos diferentes, uma situação comum na mineração, não poderiam fazer uso das equações constitutivas apresentadas, posto que os parâmetros da equação não consideram a influência da primeira escavação na segunda e vice-versa. Para descrever o comportamento elástico e plástico das rochas que interagem com o revestimento do túnel, Salamon (1970) propôs a equação constitutiva (3.8):

Equação 3.8. Equação constitutiva de Salamon (1970)

$$S_{rr} + \frac{t_0 \partial S_{rr}}{\partial t} = \frac{2G_r \sigma_p e_{jk}}{2\sqrt{3} G_r (J_2)^{\frac{1}{2}} + \sigma_p} + 2G_i t_0 \frac{\partial e_{if}}{\partial t}$$

$$S = 3K_e$$

Onde t é o tempo, t_0 define o tempo de relaxamento (relaxation time) do modelo, J_2 define o segundo invariante das tensões desviatórias, s_{jk} e e_{jk} são a tensão e a deformação desviatória, respectivamente, s e e são 1/3 do primeiro invariante da tensão e da deformação desviatória respectivamente. A equação (3.8) descreveria um comportamento isotrópico elástico com módulos de G e K para mudanças de esforços instantâneas. Salamon demonstrou que a relação tensão-deformação não-linear poderia ser empregada para representar uma situação de endurecimento no tempo.

Menzel & Schreiner (1977) usaram a deformação desviatória efetiva como modificador dependente do tempo na lei constitutiva para modelar numericamente testes de fluência uniaxial. A equação (3.9) descreve esse modelo:

Equação 3.9. Equação constitutiva de Menzel & Schreiner (1977)

$$\dot{\epsilon}_c = A\sigma^n \xi_e^\alpha$$

Onde $\dot{\epsilon}_c$ representa a taxa de fluência, A , n , α são constantes do material, σ e ξ_e é a tensão e a deformação equivalente de Von Mises, respectivamente. A deformação equivalente de Von Mises é definida como: $\xi_e = (3\xi_2)^{1/2}$, onde $\xi_2 = e_{ij}e_{ij}$, e e_{ij} é o tensor de deformação desviatória.

Pinto (1995) definiu a equação constitutiva (3.10) para descrever o fenômeno de endurecimento no tempo de rochas evaporíticas:

Equação 3.10. Equação constitutiva de Pinto (1995)

$$\dot{\epsilon}_{cr} = a \bar{\sigma}^n \frac{1}{(\gamma + \bar{\epsilon})^\alpha}$$

Onde σ e ξ são respectivamente a tensão e deformação a , n , γ e α são constantes dependentes do material cujos valores estão na tabela 3.3.

Para desenvolver tal equação Pinto (1995) mediu o fechamento do Shaft da mina em 4 pontos distintos e logo depois aplicou sua fórmula visando modelar a convergência dos painéis e verificar a consistência do modelo proposto, a figura (3.9) ilustra esse processo:

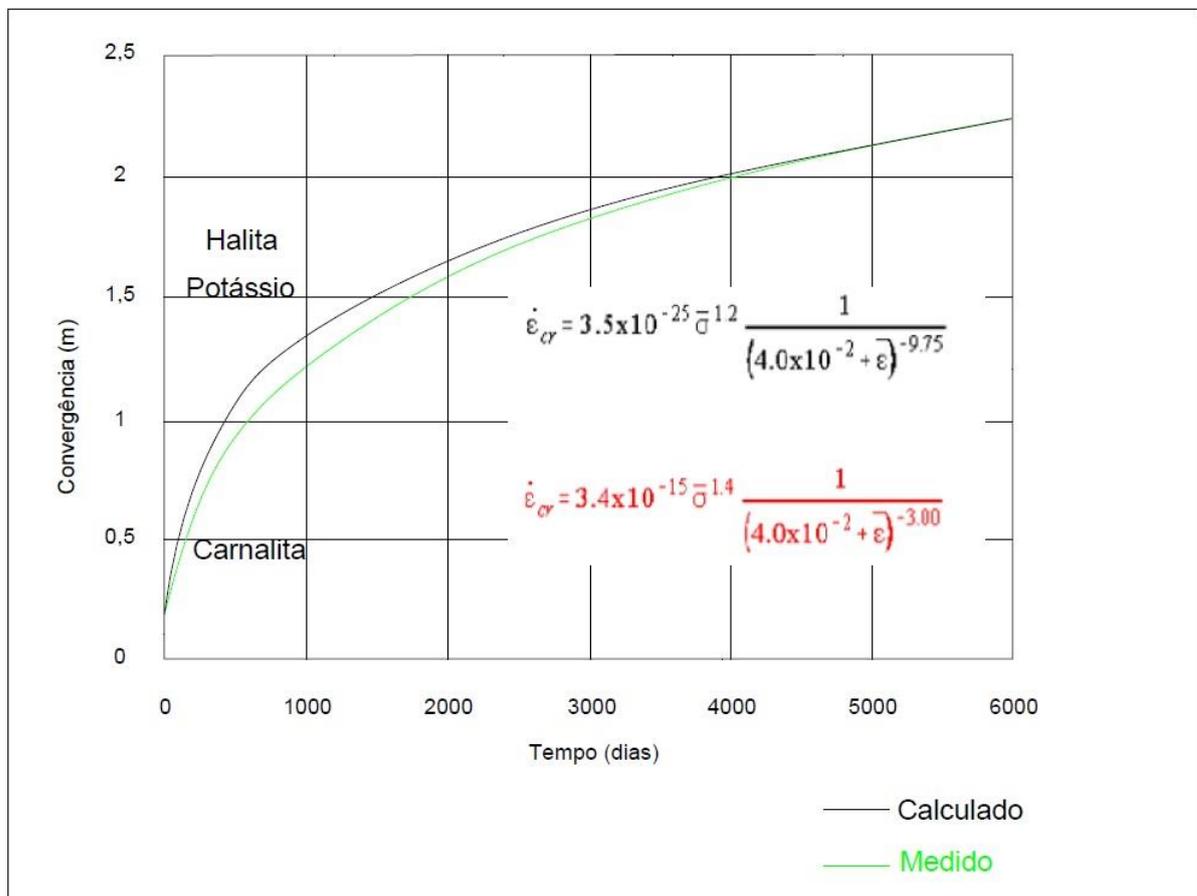


Figura 3.9 Comparação entre os dados medidos in-situ e o modelo proposto por Pinto (1995).

A equação (3.10) pode ser usada para simular situações realistas na mineração, como a presença de múltiplas escavações interagindo. Os cálculos para o fechamento do shaft e para a convergência dos painéis renderam os seguintes valores aproximados para as constantes de materiais evaporíticos presentes na mina de Boulby na Inglaterra, ver tabela 3.3:

Tabela 3.3. Constantes do material salino

Formação rochosa	a (Mpa ⁻ⁿ)	n	α	γ
<i>Halita superior</i>	$3,4 \cdot 10^{-25}$	1,2	-9,75	$4 \cdot 10^{-2}$
<i>Carnalita margosa</i>	$3,5 \cdot 10^{-15}$	1,4	-3,00	$4 \cdot 10^{-2}$
Potássio intermediário	$3,4 \cdot 10^{-25}$	1,2	-9,75	$4 \cdot 10^{-2}$
<i>Halita intermediária</i>	$3,4 \cdot 10^{-25}$	1,2	-9,75	$4 \cdot 10^{-2}$

Fonte: Pinto (1995)

3.1.4 Ensaio triaxial de fluência.

Os fenômenos de fluência descritos anteriormente foram analisados e sistematizados a partir de procedimentos experimentais que possibilitaram simular as condições de carregamento e de temperatura, bem como minimizar os efeitos de amostragem.

Os ensaios de laboratório, em geral, não reproduzem os regimes de tensões originais do material extraído, de modo que é sempre recomendável que validações sejam feitas tanto com base em dados de laboratório e in situ. Na figura 3.10 vemos a preparação dos corpos de prova de rocha salina para um ensaio de laboratório, um estudo mais detalhado a respeito da preparação de corpo de provas para ensaios foge ao propósito deste trabalho.



Testemunhos

Preparação do corpo de prova

Figura 3. 10 Amostragem de rocha salina - testemunhos e preparação de corpo de prova. Fonte: Botelho (2017)

O ensaio triaxial é um dos principais e mais confiáveis experimentos para o estudo da fluência. Na figura 3.11, vemos o equipamento utilizado. Simplificadamente ele é composto por uma câmara, onde é colocado o corpo de prova, entradas e saídas de fluido para confinamento, uma prensa, por meio da qual será imposto o carregamento axial à amostra e controles eletrônicos de carga, temperatura, pressão, dentre outras grandezas relevantes. Além disso, observamos também um testemunho de rocha salina sendo ensaiado na câmara triaxial. As deformações axiais e radiais na amostra são visíveis.



Visão geral do equipamento



Detalhe para o corpo de prova salino ensaiado

Figura 3. 11 Equipamento para o ensaio triaxial de fluência. Fonte: Botelho (2017).

3.1.5 Poços em rochas salinas.

A perfuração, estabilidade e integridade de poços em rochas salinas é um tópico importante nesse estudo, sendo uma questão chave para o acesso aos reservatórios carbonáticos do pré-sal brasileiro e um dos maiores desafios do momento atual da engenharia petrolífera.

Uma vez realizada a perfuração, o poço proporciona uma redistribuição de tensões (figura 3.12), por ser uma descontinuidade na formação que até então era considerada contínua (Botelho, 2017). O estado de tensão ao redor da perfuração deixa de ser por um instante hidrostático. A perfuração é acompanhada da injeção de fluido no interior do poço, gerando uma contrapressão na parede, que repõe parte das tensões horizontais suprimidas pela retirada do confinamento lateral. O poço permanece não revestido por certo tempo operacional, entretanto, deve-se assegurar sua estabilidade.

Na figura 3.12 observamos os problemas operacionais típicos que ocorrem nessas rochas durante a perfuração e o período não revestido do poço.

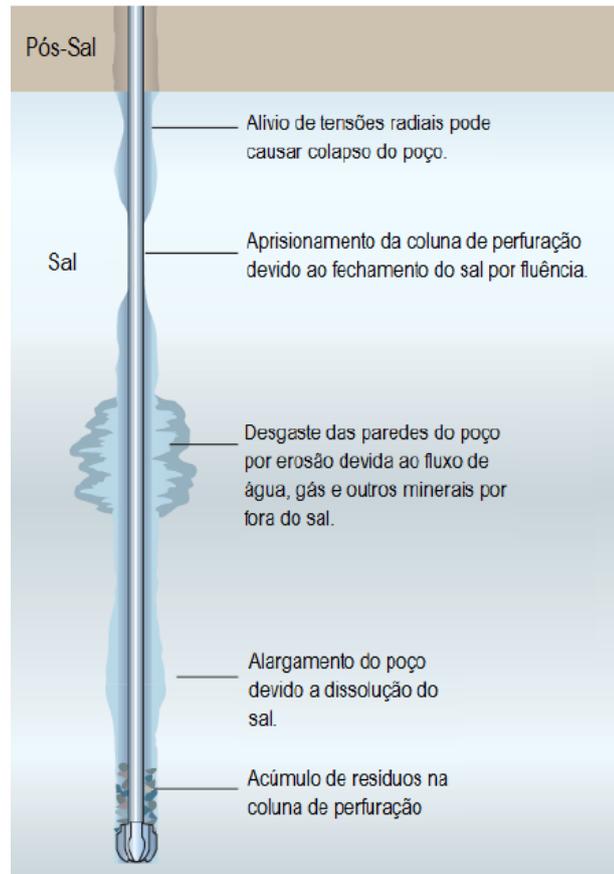


Figura 3. 12 Intercorrências em perfurações de poços atravessando rochas salinas - enfoque geral. Fonte: Botelho (2017)

De natureza mecânica, a redistribuição de tensões causada pela perfuração gera uma grande energia de deformação, que é dissipada pelo fenômeno de fluência. Caso não seja devidamente atenuada pela pressão do fluido de perfuração, a fluência pode atingir níveis que provocam rupturas na parede do sal. Dependendo da extensão do dano, o colapso do poço pode ocorrer. As deformações por fluência tendem a fechar o furo, podendo levar à prisão da coluna de perfuração. Possivelmente, esse será o principal desafio a ser vencido no desenvolvimento de um novo método de exploração de rochas evaporíticas.

De natureza físico-química, os fluidos de perfuração ao redor da parede do poço, em sal exposto, tendem a provocar processos de erosão, lixiviação e dissolução, causando desgastes e gerando cavidades. Além disso, conforme tratado anteriormente, rochas salinas são altamente solúveis, o que contribui para a formação de cavidades e cavernas ao longo do poço.

Vale ressaltar, que dentro da família dos evaporitos, rochas com mobilidade por fluência e aquelas com mobilidade reduzida apresentam comportamentos distintos. Assim, dentro de um intervalo evaporítico, os problemas operacionais possíveis podem ser diferentes. Na figura 3.13 está ilustrado esquematicamente esses efeitos.

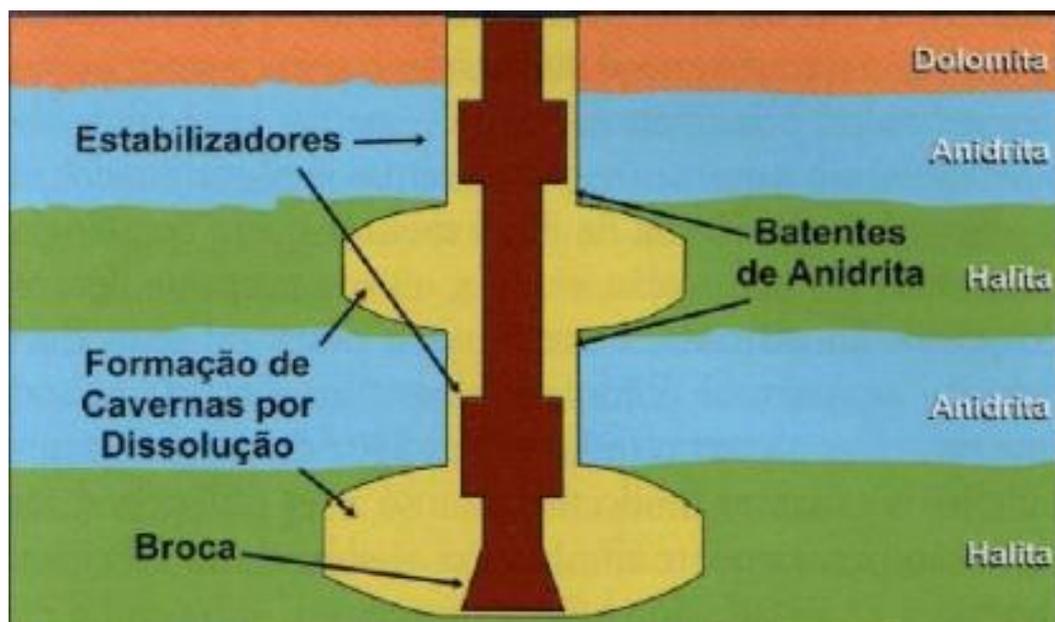


Figura 3.13 Intercorrências em perfurações de poços atravessando rochas salinas - enfoque evaporíticos. Fonte: Botelho (2017).

A título exemplificativo, consideremos a anidrita que é uma rocha evaporítica cuja dissolução e comportamento de fluência são desprezíveis para fins geomecânicos, já a halita é solúvel e tende a formar cavernas (cavidades). Essa diferença de comportamento em sucessivas intercalações dessas rochas, provoca a formação de “batentes de anidrita”, semelhantes a lajes rígidas no topo e na base de cavidades, tornado a seção do furo irregular.

Uma vez perfurado o poço é necessário a instalação de um revestimento, cimentação, e sua posterior perfuração nas camadas de reservatório, conhecida como canhoneio. Ainda assim, o sal continuará aliviando o desconfinamento lateral por meio de deformações por fluência, logo, tanto a cimentação quanto o revestimento metálico sofrerão algum efeito desse fenômeno, podendo inclusive torna-se oval sua seção transversal e colapsar. Por esse motivo, o projeto de um poço atravessando rochas salinas deve levar em conta toda sua vida útil, e não só o tempo não revestido Botelho (2017).

Outro fenômeno que merece atenção é o dobramento do revestimento (Figura 3.14) devido à fluência diferencial do sal no poço já revestido. Para tanto, é fundamental a compreensão de todos os aspectos geomecânicos do maciço salino que se está trabalhando, dado que, nenhum maciço é igual a outro, existem particularidades que os distinguem.

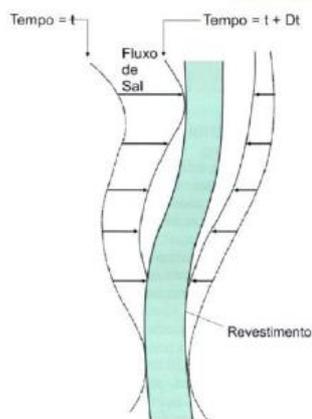


Figura 3. 14 Dobramento da coluna de revestimento em trecho salino de um poço. Fonte: Botelho (2017)

Um estudo mais detalhado da geomecânica de poços que cortam formações salinas foge ao objetivo deste trabalho, porém vale salientar que com o auxílio de softwares específicos, como o FLAC 3D[®] é possível simular o comportamento do maciço rochoso salino, com base no modelo viscoplástico.

3.1.6 Aspectos econômicos e de mercado relacionados aos evaporitos

Dentre os minerais associados aos evaporitos, provavelmente os de maior interesse econômico são os sais de potássio (carnalita e silvita) e a gipsita (mineral de uso industrial na produção de gesso, cimento Portland, fundentes de minério de níquel, etc.).

O Brasil é um grande importador de potássio, tendo importado em 2013 US\$ -FOB 3,32 bilhões (DNPM e USGS (2014)), correspondente a 4,9 Mt de K₂O equivalente. Os principais fornecedores em 2013 foram: Canadá (31,59%), Alemanha (16,46%), Rússia (15,63%), Bielorrússia (14,86%) e Israel (9,43%), os quais, juntos, forneceram cerca de 4,3 Mt de K₂O equivalente, correspondendo a um valor de importação da ordem US\$- FOB 2,91 bilhões (Tabela 3.4).

Tabela 3.4. Alguns dados de produção, consumo e mercado dos sais de potássio

Discriminação		Unidade	2011 ^(r)	2012 ^(r)	2013 ^(p)
Produção	KCl	(t)	625.30	548.500	492.151
	K ₂ O equivalente	(t)	395.002	346.509	310.892
Importação	K ₂ O equivalente	(t)	4.607.449	4.225.774	4.880.907
		(10 ³ US\$-FOB)	3.503.225	3.512.828	3.324.578
Exportação	K ₂ O equivalente	(t)	9.553	12.187	33.956
		(10 ³ US\$-FOB)	8.638	7.546	17.450
Consumo Aparente ⁽²⁾	K ₂ O equivalente	(t)	4.992.898	4.560.096	5.157.843
Preços ⁽³⁾	Importação K ₂ O equivalente	(US\$ FOB /t)	760,34	831,29	681,14

Fonte: DNPM e USGS (2014)

Segundo o USGS (2019), no ano de 2018 os principais países produtores e detentores das maiores reservas era os ilustrados na tabela 3.5:

Tabela 3.5. Principais países produtores e detentores e reservas no ano de 2018

	Mine production		Reserves ⁵	
	2017	2018*	Recoverable ore	K ₂ O equivalent
United States ¹	480	500	970,000	220,000
Belarus	7,100	7,100	3,300,000	750,000
Brazil	290	300	310,000	24,000
Canada	12,200	12,000	4,900,000	1,200,000
Chile	1,100	1,000	NA	100,000
China	5,510	5,500	NA	350,000
Germany	2,700	2,900	NA	150,000
Israel	2,000	2,000	NA	⁶ 270,000
Jordan	1,390	1,400	NA	⁶ 270,000
Russia	7,300	7,500	NA	2,000,000
Spain	610	560	NA	41,000
United Kingdom	250	190	NA	170,000
Other countries	500	600	1,500,000	280,000
World total (rounded)	41,400	42,000	NA	5,800,000

Fonte: USGS (2019)

Segundo USP (2020), o setor agrícola brasileiro representou 21,4% do PIB brasileiro em 2019, dada a dimensão desse mercado, tem-se a explicação lógica para a grande demanda de fertilizantes e consequentemente de potássio internamente, entretanto, as reservas brasileiras de potássio em 2018 eram de apenas 24 milhões de toneladas de K₂O. Logo, a viabilidade da exploração destas reservas localizadas no fundo do mar seria interessante para suprir a demanda brasileira pela commodity. Outros usos do potássio ocorrem na indústria do papel, química, explosivos, dentre outras aplicações.

Hoje em dia, umas das principais minas em operação no Brasil pertence à Potássio do Brasil (2020) e explora o depósito mineral de Autazes na Amazônia utilizando o método de lavra por dissolução.

A figura 3.15, ilustra o preço em dólares americanos por tonelada métrica de cloreto de potássio, nos últimos 15 anos. Percebe-se claramente uma queda acentuada nos preços desde 2009, sendo que o preço atual oscila em torno de US\$ 210,00/ ton.

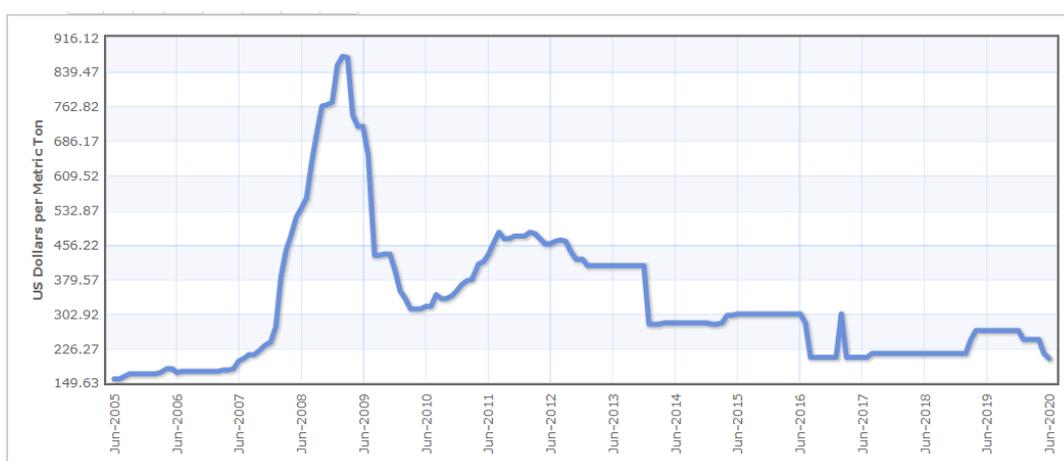


Figura 3. 15 Preço US\$/t de potássio. Fonte: INDEX MUNDI (2020)

3.2 LAVRA POR DISSOLUÇÃO (Solution mining)

O método de lavra por dissolução é um processo tecnológico muito antigo. Nesse sentido, a salmoura resultante da dissolução de sais (evaporitos), é obtida pela aplicação de jatos de água nas câmaras de mineração ou pela injeção de água em temperatura elevada em poços, com a posterior recuperação da salmoura resultante.

O método de lavra por dissolução é definido por Hartman & Mutmansky (2002) como uma subclasse dos métodos por desmonte hidráulico, em que minerais são recuperados por lixiviação, dissolução, fusão ou recuperação dos fluidos de perfuração. De acordo com Hartman & Mutmansky (2002) na década de 50 e 60 a técnica se desenvolveu bastante. Foi nesse período que a tecnologia hoje disponível de lavra por dissolução através de poços surgiu.

A técnica de lavra por dissolução facilitou a exploração de depósitos de minerais como: halita, silvinita, carnalita, taquidrita, trona, entre outros. Segundo (Hartman & Mutmansky, 2002), um quarto do ouro, prata, cobre, urânio, sal, magnésio, enxofre e lítio são produzidos por meio do uso de métodos de *solution mining* (lixiviação, dissolução, derretimento, ou recuperação dos fluidos de perfuração). O uso dessas técnicas tem se incrementado nas últimas décadas.

A classificação dos métodos de *solution mining* é difícil porque seu uso se dá em diferentes tipos de depósitos (minerais in situ, pilhas previamente mineradas e evaporitos) e existem inúmeros métodos de ataque (dissolução com água somente, dissolução com agentes químicos, evaporação da salmoura ou derretimento). Porém, visando agrupar as diversas operações Hartman & Mutmansky (2002) sugere a seguinte subdivisão:

- Sistemas de extração por furos de sondagem;
- Métodos de lixiviação;
- Exploração de evaporitos;

3.2.1 Tecnologia aplicada à lavra por dissolução de evaporitos permeáveis.

Evaporitos podem ser divididos em duas classes: impermeáveis e permeáveis. Ambos os tipos são explorados através de métodos convencionais de lavra subterrânea, bem como através de lavra por dissolução. Como evaporitos apresentam frequentemente menor resistência mecânica ao desmonte mecânico e são frequentemente estratificados e horizontais; equipamentos e métodos da lavra do carvão são frequentemente adaptados a esse tipo de exploração. Como, por exemplos os métodos de lavra: câmaras e pilares, mineradores contínuos

e longwall. Depósitos de potências maiores e domos salinos podem ser lavrados por métodos subterrâneos por meio da abertura de realces ou câmaras usando desmonte com explosivo de maneira similar ao que é feito à céu aberto.

Evaporitos permeáveis que se apresentam em camadas estratificadas aproximadamente horizontais são explotados fazendo-se uso de um poço de injeção e poços de produção/captação. O agente que provoca a lixiviação é normalmente a água, sem nenhum outro reagente químico, mas existem exceções onde reagentes químicos são adicionados para melhorar a solubilização. A camada evaporítica pode ser limitada por uma formação de menor permeabilidade que irá controlar a solubilização.

3.2.2 Tecnologia aplicada à lavra por dissolução de evaporitos impermeáveis

Depósitos de rochas evaporíticas são altamente porosos e permeáveis quando originalmente depositados, mas com o soterramento (pressão litostática) eles começam a se consolidar (litificar) por causa da viscoplasticidade natural do sal. Embora alguns vazios (trapas), contendo salmoura ou gás possam ocorrer em domos salinos, estas formações são altamente impermeáveis.

Devido à grande quantidade de NaCl na salmoura saturada, halita é rapidamente dissolvida por água e uma grande quantidade de sal pode ser produzida desde um simples poço de injeção e outro de captação, oriunda ou de um domo salino ou de um estrato salino de grande potência. Essa simples configuração de um poço injetor e outro de captação pode chegar a produzir mais de 1200 toneladas de sal por dia.

O teto de uma cavidade salina se dissolve muito mais rapidamente que suas paredes laterais. Conseqüentemente, a lavra por dissolução começa por formar uma pequena cavidade no fundo da zona evaporítica. Posteriormente essa cavidade é alargada e estendida ascendentemente. Essa sequência também separa os minerais não-solúveis, usualmente anidrita, que permanece no fundo da cavidade onde esses sedimentos resultantes não impedem a continuação da lavra por dissolução.

Quando se usa este método é necessário prevenir que a salmoura insaturada se eleve no poço acima do teto da cavidade, que é o horizonte desejado de extração. Isso é realizado fazendo-se uso de um fluido (*blanket fluid*) menos denso e imiscível (em geral algum óleo) que ficará sobre a camada da salmoura, evitando-se assim, o contato direto desta com o teto. Esse fluido, conhecido como *blanket fluid* é usualmente petróleo, óleo diesel ou gás natural pressurizado.

Um exemplo desse método de lavra por dissolução é ilustrado na figura 3.16.

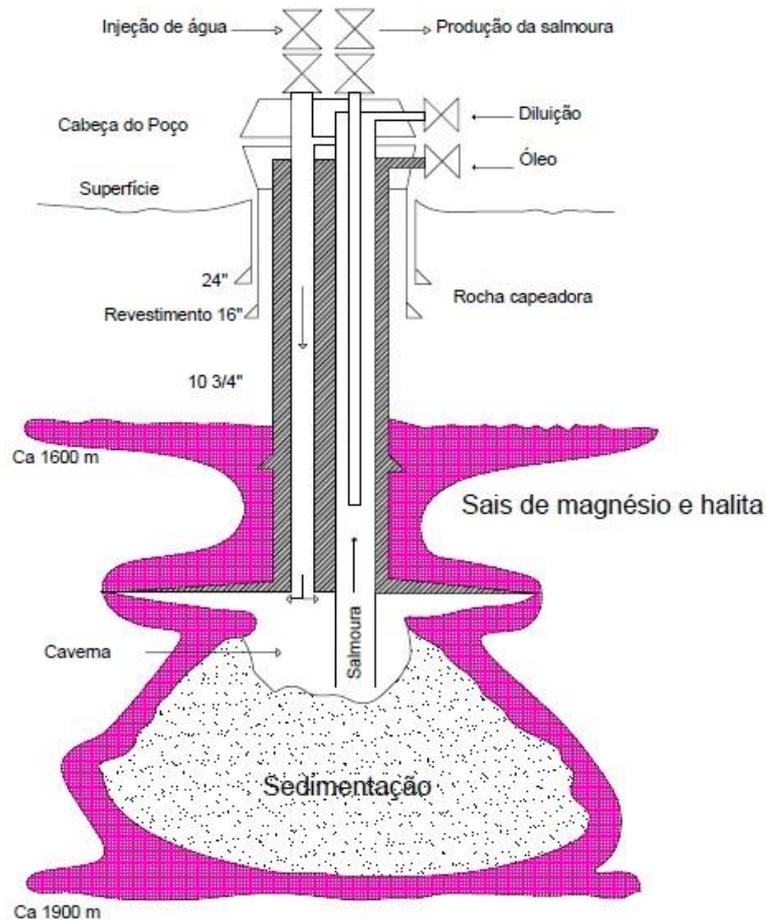


Figura 3. 16 Configuração de um poço para lavra por dissolução de sais impermeáveis. Schlitt & Larson (1985)

Água é injetada e a salmoura é extraída através de tubos separados. Uma pequena quantidade de água de diluição é adicionada ao tubo da salmoura para prevenir à cristalização, assim como o congelamento, dado que a reação de cristalização dos sais em sua maioria é endotérmica. Uma certa quantidade de óleo é introduzida através de um quarto tubo para se evitar o contato com a camada rochosa superior à formação salina de interesse. Periodicamente, o tubo é elevado de maneira gradual e isso conduz o nível de corte da camada salina e a progressão da cavidade, tal como ilustrado na figura 3.17.

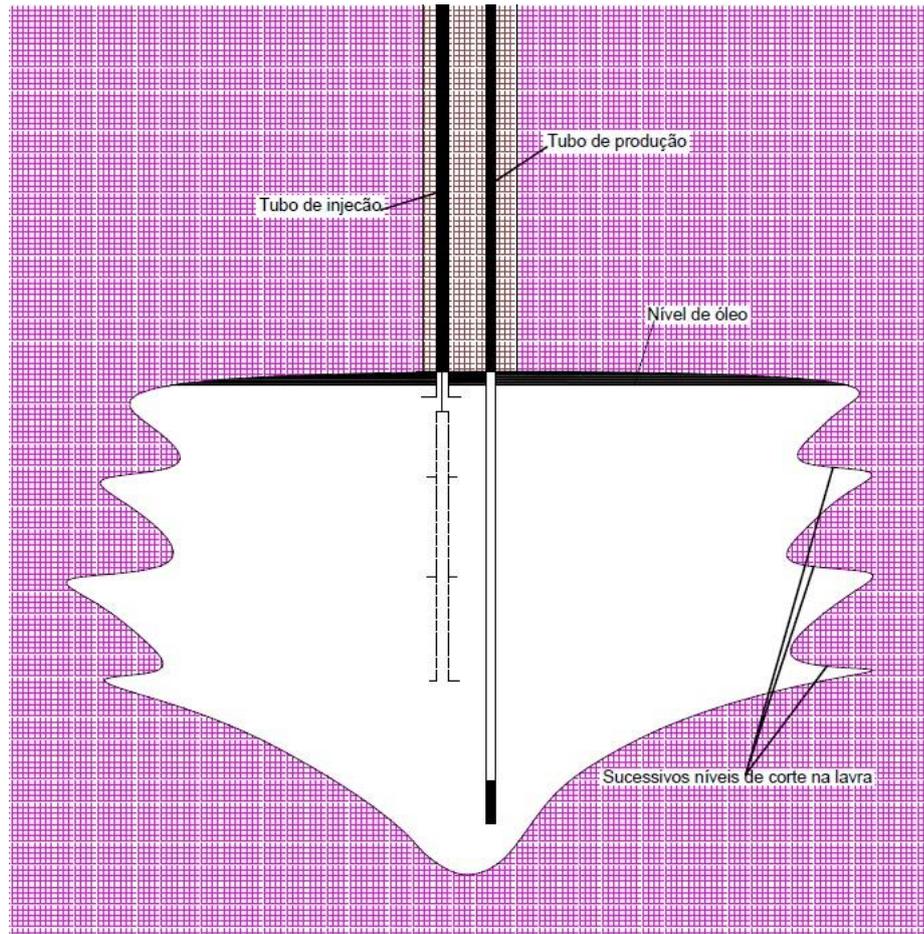


Figura 3. 17 Sucessivas camadas de corte que ocorrem em sais impermeáveis utilizando-se lavra por dissolução à medida que o tubo de revestimento do poço é elevado. Schlitt & Larson (1985)

O tamanho da cavidade será dimensionado levando-se em consideração fatores geomecânicos do estrato salino de maneira a evitar-se o colapso da cavidade. O diâmetro limite da cavidade usualmente gira em torno de 150 m. Muitos poços de exploração salina e correspondentes cavidades resultante do processo de lavra por dissolução, podem ocorrer de maneira similar em domos salinos, tal qual ilustrado na figura 3.18 de um domo salino próximo à Freeport, Texas. A pressão do fluido na cavidade salina deve ser próxima à pressão litostática (*in situ*) local, em vez da pressão hidrostática, para prevenir o colapso da cavidade.

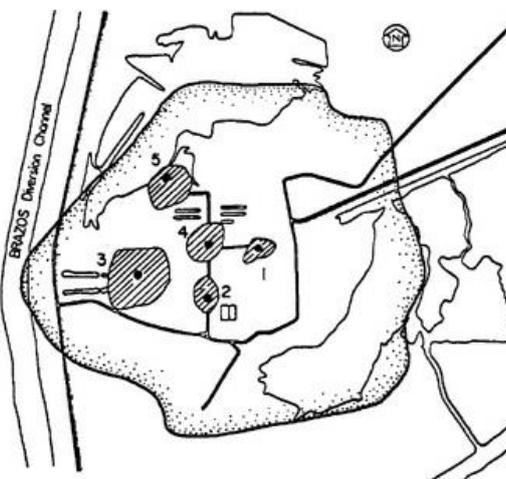


Figura 3. 18 Visão de topo de cinco cavidades salinas resultantes do processo de lavra por dissolução no domo salino de Bryan Mound, Freeport - Texas. Schlitt & Larson (1985)

O segundo método de lavra por dissolução de evaporitos impermeáveis é usado em depósitos estratificados e requer dois ou mais poços. Depois de perfurados e completados os poços, a técnica de faturamento hidráulico e a pressão acima da pressão litostática fornece à permeabilidade necessária para a comunicação entre os poços (que distam aproximadamente 150 a 300 m um do outro), devido ao faturamento gerado na formação rochosa. Água é bombeada desde um poço injetor até um poço de produção, à medida que ela se desloca de um poço ao outro, solubiliza o sal conectando os dois poços. Frequentemente um poço central de injeção fornece água para muitos poços de produção.

3.2.3 Características da perfuração e completação de poços para lavra por dissolução

A perfuração de um poço seja ele para mineração ou petróleo inicia-se com a alocação de um ponto na superfície do terreno onde exista uma anomalia mapeada no modelo geológico, construído a partir de dados de campanhas de sondagem, sísmicas, correlações entre poços anteriormente perfurados, geoquímica, etc.

Uma vez definido o ponto, nos casos de poços *on-shore*, é preparado pela equipe de terraplanagem uma base adequada visando comportar a sonda e demais estruturas auxiliares necessárias à execução da perfuração. Com a base pronta, inicia-se a mobilização da sonda para o ponto de interesse, etapa esta conhecida na indústria do petróleo como Desmontagem, transporte e montagem (DTM). No caso de poços *off-shore*, a estrutura do navio sonda é mobilizada para o ponto de interesse em alto mar.

As sondas utilizadas para perfuração de poços de petróleo e, neste caso, para poços onde será utilizado lavra por dissolução, baseiam-se no princípio de perfuração rotativa. Onde rotação (torque) é aplicada na coluna de perfuração e essa rotação chega até o elemento cortante localizado no fundo do poço, a broca (*bit*). O fluido utilizado na perfuração é a lama (mistura de bentonita, água, sal e outros polímeros) ou fluido sintético (onde no lugar de água é usado N-Parafina como solvente). A lama é necessária tanto para refrigerar o elemento cortante como para manter a estabilidade geomecânica da parede do poço durante a perfuração.

Nessa nova aplicação de lavra por dissolução em subsolo marinho, será utilizado uma técnica de perfuração conhecida como perfuração direcional, logo abordar-se-á de maneira sucinta esse tópico nos próximos parágrafos.

Segundo o API - American Petroleum Institute (2018) a perfuração direcional pode ser definida como: “A arte e a ciência que implica no desvio intencional de um furo numa direção específica visando atingir um objetivo predeterminado que está localizado no subsolo”. Em outras palavras, um poço dirigido, direcional ou multilateral é aquele que segue uma trajetória definida desde um ponto na superfície (origem) a outro ponto no subsolo chamado objetivo, o qual não pode ser unido à origem mediante uma linha vertical (reta), a trajetória do poço é curvilínea e pode ou não está contida num plano. Tal como ilustrado na figura 3.19.

Com o uso da técnica de perfuração direcional é possível construir poços multilaterais que é um único poço com um ou mais ramos secundários que se irradiam do poço principal. Pode ser um poço de exploração, um poço de desenvolvimento ou uma reentrada em um poço existente. Pode ser tão simples como um poço vertical com um desvio, ou tão complexo como um poço horizontal de alcance estendido com múltiplos ramos laterais e sublaterais. As configurações multilaterais gerais incluem poços multi-ramificados (Multibranch), poços bifurcados (forked), poços com vários ramais laterais que se ramificam de um poço principal horizontal (Laterals into horizontal hole), poços com vários ramais laterais (Lateral into vertical hole) que se ramificam de um poço vertical principal, poços com laterais empilhados (Stacked laterals) e poços com laterais opostas (Dual-oposing laterals) (Ver figura 3.19). Esses poços geralmente representam dois tipos básicos: laterais verticalmente escalonados e laterais horizontais espalhados em formas de T (ventilador), espinha e costela ou opostas.

A perfuração direcional pode se deslocar mais de 3000 metros lateralmente, como comprovado no poço M-17 do campo Wytch Farm, segundo consta no arquivo (Alaska Department of Natural Resources (Division of Oil & Gas), 2017), fornecido pelo governo do Alasca.

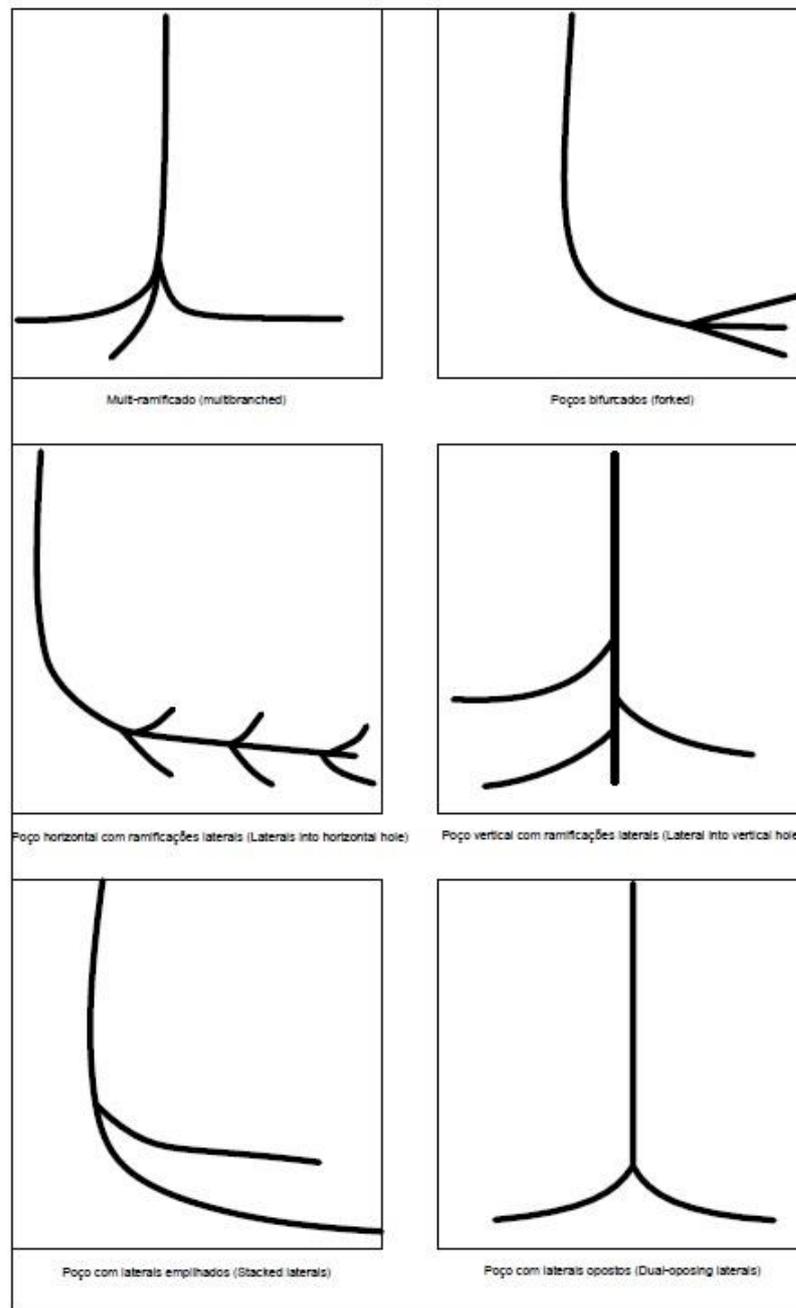


Figura 3. 19 Configuração poços multidirecionais. Fonte: Bosworth, et al., Key Issues in Multilateral Technology, (2016)

De acordo com Bosworth S. , et al. (2000) existe duas tecnologias capazes de realizar a perfuração direcional: deslocamento positivo e PowerDrive Xceed, a segunda é mais moderna em relação à primeira e fornece maior controle direcional.

Nesse trabalho, será utilizado a perfuração direcional de maneira a se otimizar a lavra por dissolução, realizando-se assim menos furos o que facilita a operação no caso de operações em plataformas no mar.

3.3 BENEFICIAMENTO DA SALMOURA

3.3.1 Circuitos de cristalização de salmouras evaporíticas

Um circuito de cristalização de salmouras evaporíticas descreve a sequência de sais que são precipitados em água e posteriormente removidos. Circuitos de cristalização de salmouras dependem da composição inicial desta e da temperatura da solução. O ponto inicial é a saturação da solução por cloreto de sódio originado desde a extração ou uma a priori evaporação.

A prática usual é determinar três ou mais diagramas complexos de fase para os componentes críticos dissolvidos que mostram as fases cristalinas estáveis em função da composição da solução da salmoura, expressa em % de mol, apenas dos componentes mostrados no diagrama de fases. Um diagrama de fase ternário inclui somente três componentes, a água é normalmente excluída. Diagramas com mais fases são raros e dificultam a interpretação. Obviamente o número de componentes químicos numa salmoura é muito maior que três, dificultando assim a análise.

Devido à complexidade do circuito de cristalização do sal, flotação é frequentemente utilizada para auxiliar no processo de separação dos sais. As salmouras resultantes do processo de exploração mineral são cristalizadas em tanques solares ou por evaporação termal. Toda a mistura de cristais resultantes é moída e submetida à flotação diferencial numa salmoura saturada, usando ácidos ou outros compostos orgânicos como reagentes. Flotação é também extensivamente utilizada na concentração de misturas salinas lavradas através de métodos convencionais.

3.3.2 Processo de concentração do potássio

KCl é separado dos demais sais por flotação em explorações convencionais na região do *Novo Mexico (EUA)* e *Saskatchewan (Canadá)*, e é obtido de misturas de cristais salinos originadas do lago *Great Salt* e *Bonneville*, Utah por meio de evaporação solar.

Potássio que é produzido no *Searles Lake* possui a vantagem de deter um favorável circuito de cristalização, onde a solução é aquecida à elevada temperatura num evaporador de efeito triplo (Mark, 1964). A figura 3.20 representa o sistema, Na^+ , K^+ , SO_4^{-2} , CO_3^{-2} , Cl^{-1} , e H_2O a 100°C . A salmoura do *Searles Lake* de composição 'B' é combinada numa proporção adequada com uma substância de composição 'M' na planta visando-se obter uma salmoura de alimentação do evaporador de composição 'F'. Obtendo-se assim uma solução cuja composição é aproximadamente à ideal para se iniciar a precipitação da burkeita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$) durante à evaporação, juntamente com a halita, que não é incluída nesse diagrama de fase ternário. A

evaporação continua até a composição da salmoura sair de ‘F’ para um ponto ‘A’ na figura 3.20. Quando a salmoura se satura em $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, diz-se que a solução atingiu a composição ‘A’, essa fase começa a precipitar e a salmoura segue até atingir o ponto ‘C’.

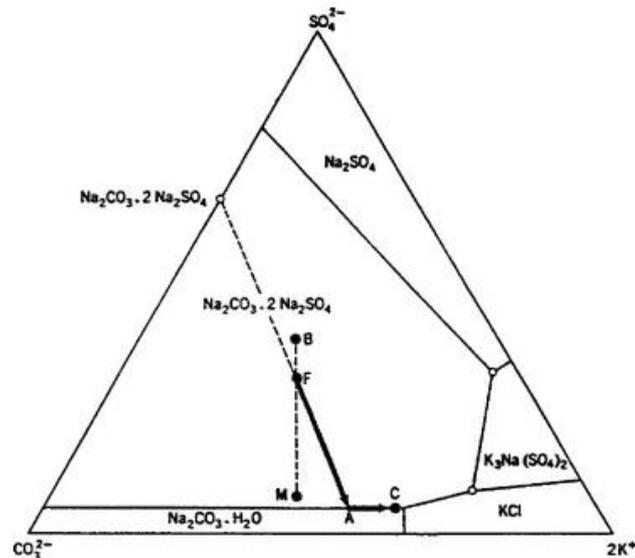


Figura 3. 20 Diagrama de fase ternário a 100° C apresentando o circuito de evaporação para produzir potássio e uma solução residual rica em boro. Fonte: Mark (1964)

A vantagem deste processo é que somente sais de sódio são removidos até se atingir o ponto ‘C’, enquanto todos os sais de potássio e boro permanecem concentrados na solução residual. Depois que todos os sais de sódio foram removidos, essa solução aquecida é rapidamente refrigerada produzindo-se assim cristais de KCl. Boratos, altamente enriquecidos na salmoura remanescente, são recuperados depois que todos os cristais de KCl foram separados.

3.3.3 Tanques de evaporação solar

Tanques de evaporação solar são utilizados extensivamente para remover o excesso de água oriunda de soluções produzidas por lixiviação, para concentrar salmouras e para precipitar e separar cristais de sais provenientes de soluções saturadas. Esta é uma das maiores aplicações comerciais da energia solar. As principais fontes de salmoura são: água do mar, água de aquíferos, lagos salgados e soluções produzidas por meio de lavra por dissolução de evaporitos e domos salinos. A taxa de evaporação da salmoura nestes tanques depende do quão concentrada está a salmoura (densidade da salmoura). O tanque solar e o balanço de material decorrente do processo de evaporação da salmoura podem ser descritos na figura 3.21.

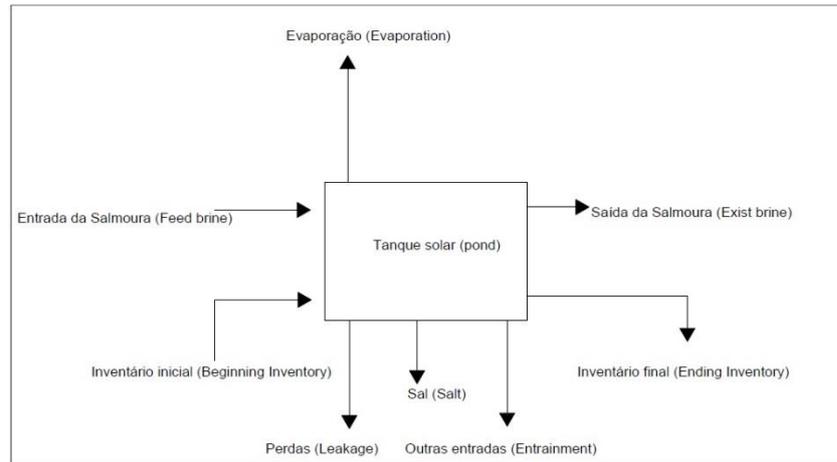


Figura 3. 21 Tanque de evaporação solar e fluxo da salmoura simplificado. Fonte: Bartlett (2007)

Uma série de equações relacionadas ao balanço de massa dos materiais que incluem água e cada um dos componentes salinos podem ser consideradas. Frequentemente estes tanques estão dispostos em série, e em cada tanque algum material é precipitado. A salmoura residual segue para o próximo tanque até se concluir a separação dos sais. Na figura 3.22 é apresentado os tanques de cristalização utilizados na empresa (Yancoal Canada, 2016) no Canadá.



Figura 3. 22 Esquema simplificado dos tanques de cristalização de sais de potássio utilizado pela empresa Yancoal no Canadá. Fonte: Yancoal Canada (2016)

Por causa da ação do vento e do longo período de tempo de residência, salmouras e solução em tanques solares tendem a ir igualmente se misturando. Assim, a concentração da salmoura nos tanques solares é igual à concentração de salmoura de saída. Quando o sal é cristalizado no produto desejado, a salmoura pode ser evaporada e seca sem a presença de efluentes.

3.3.4 Taxas de evaporação

Taxas comuns de evaporação da salmoura variam com a época do ano e a densidade da solução salina, tal como ilustrado na figura 3.23. Para regiões de clima seco, a maior evaporação ocorre nos meses de verão a taxas de 3 a 6 mm por dia. Altas temperaturas, baixa umidade e ventos favorecem altas taxas de evaporação. Ventos aumentam a taxa de evaporação porque diminuem o vapor circundante à superfície da salmoura que está nos tanques. Espera-se que no hemisfério sul, onde as estações são inversas ao do hemisfério norte, que as curvas apresentem picos nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março (que são os meses de verão neste hemisfério).

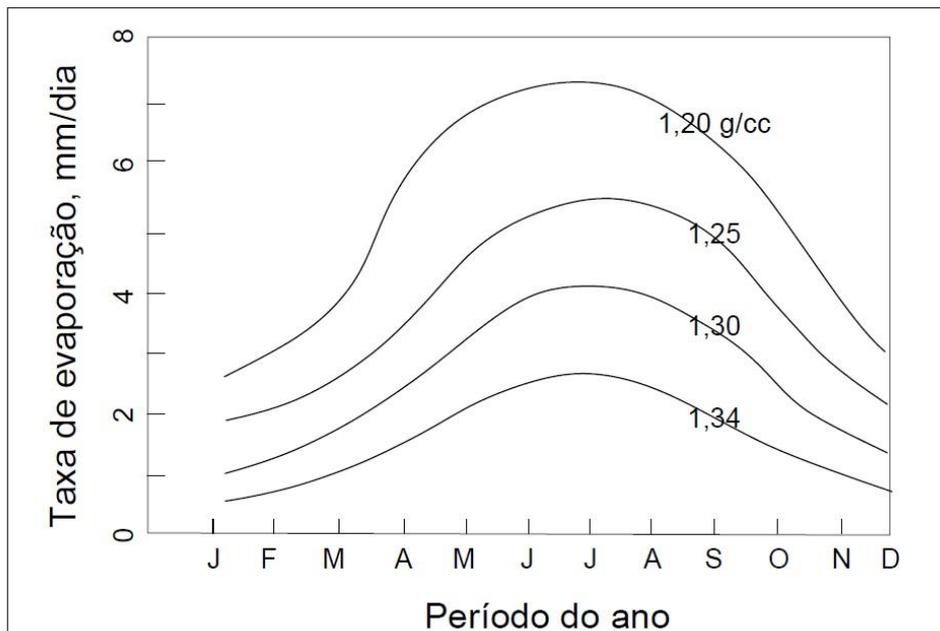


Figura 3. 23 Curvas típicas de taxas de evaporação da salmoura, unidade de concentração gramas/cm³ (g/cc)-dados para o hemisfério norte onde as estações são contrárias ao hemisfério sul. Fonte: Bartlett (2007)

O gerenciamento efetivo dos tanques de evaporação solar requer conhecer-se a variação da taxa de evaporação em função da densidade da salmoura para cada mês. Um exemplo é ilustrado na figura 3.24. Obtendo-se assim os dados necessários para se planejar e programar a localização de cada tanque solar ano após ano. Dados meteorológicos coletados em um ano de clima atípico podem provocar erros e por isso minuciosos ajustes dos dados são necessários para se planejar a área dos tanques solares. A taxa de evaporação da salmoura invariavelmente diminui com o incremento da densidade devido à atividade química, e, portanto, a pressão de vapor de equilíbrio da água diminui com o incremento da concentração de sais. Para uma salmoura simples, composta de um único sal, a densidade torna-se constante quando a saturação é alcançada e a cristalização do sal se inicia. Para salmouras mais complexas, ou seja, compostas por mais sais, a densidade continua a incrementar-se enquanto um ou mais sais atingem a saturação, mas outros sais continuam a aumentar sua concentração durante a evaporação.

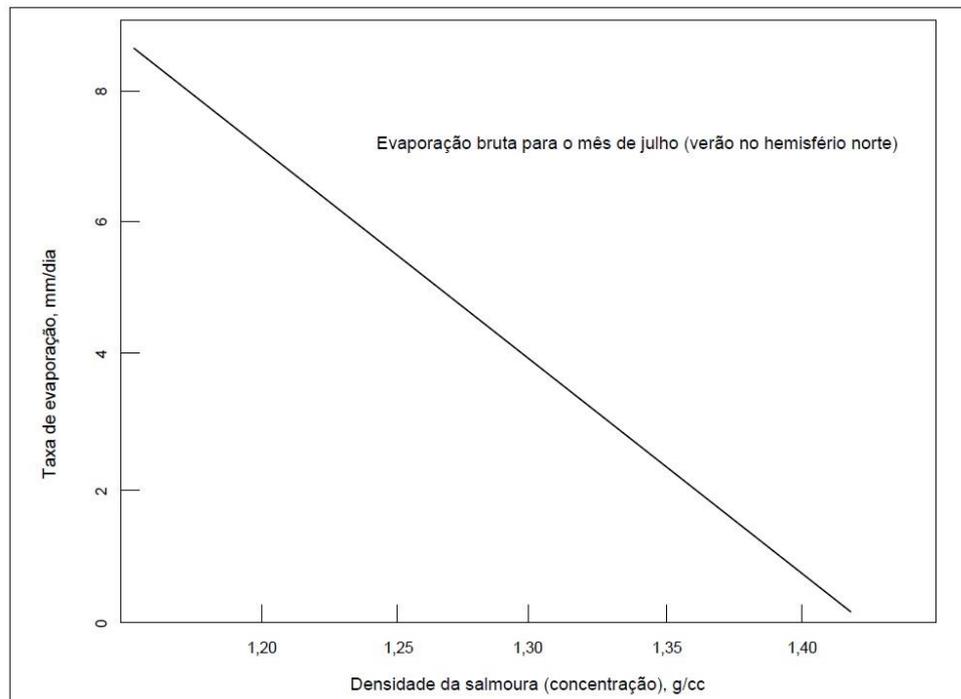


Figura 3. 24 Taxa de evaporação dependente da densidade da salmoura. Fonte: Bartlett (2007)

Tanques de evaporação solar podem ter taxas de evaporação negativas durante os meses mais chuvosos e úmidos do ano, devido ao aporte de água pluvial.

3.3.5 Depósitos salinos e salmouras

Na primeira fase de concentração de salmouras oceânicas, sais frequentemente não se cristalizam. Muitos sistemas de tanques solares cristalizam somente um mineral de cada vez halita (NaCl) ou silvita (KCl). Geralmente halita, como é o sal dominante, é depositado e permanece no fundo dos tanques. Enquanto o concentrado, contendo muitos componentes de alto valor, é depois processado numa planta de superfície ou separado nos tanques de evaporação solar. Cada sal que é cristalizado, incluindo mistura de sais, deve ser incluído no balanço de massa do tanque.

Sais minerais cristalizam-se em sequência, usualmente por nucleação na interface salmoura/ar onde a evaporação está ocorrendo e a solução é mais supersaturada. Frequentemente o crescimento desses núcleos superficiais provoca a formação de grandes cristais que invadem os demais, enquanto os mesmos flutuam na superfície. Eventualmente a força gravitacional excede à tensão superficial para manter os cristais na superfície e eles afundam. Fracas redes de massivos cristais rudimentares ou dendritos podem possibilitar à existência de grandes espaços vazios em sedimentos, com alta permeabilidade e grande quantidade de arraste da salmoura no sedimento salino.

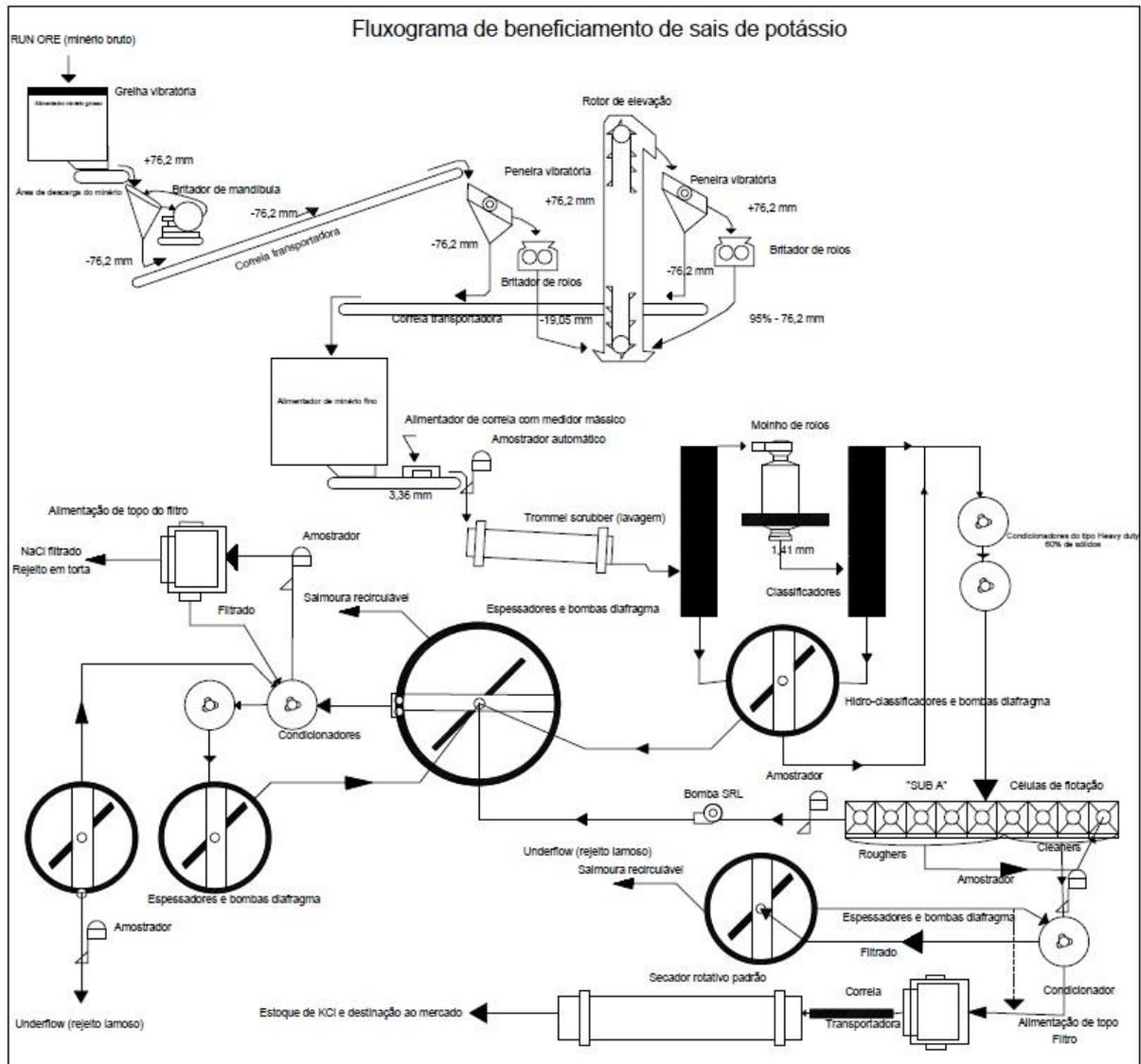
O fator de arraste é definido como a relação da massa de salmoura carregada e a massa salina sólida. O fator de arraste para muitos sais é na faixa de 0,3-0,5. A seleção de um fator de arraste igual à 0,4 é um fator prático usual na ausência de dados para avaliação. O fator de arraste para evaporitos contendo halita é de 0,35, que também é aproximadamente a fração de volume de vazios. Contudo, muitos minerais salinos cristalizam-se desde tanques solares com uma fração de espaços vazios superior à sua fração sólida in situ, principalmente para altos fatores de arraste. Um exemplo é a mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e Bischofite ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) que tem um fator de arraste de 2 a 3.

3.3.6 Processamento mineral convencional de sal de potássio

O fluxograma 3.1, representa esquematicamente o processo de beneficiamento convencional do sal de potássio.

Neste caso o *Run of Mine (ROM)*, ou seja, o produto bruto vindo direto da mina passa por etapas de cominuição que fará com que ele atinja a granulometria de 3,36 mm, com a menor geração de finos possível. Posteriormente, o material passa por etapas de lavagem e deslamagem, onde o líquido usado neste processo é uma salmoura saturada, por meio do uso de hidrociclones. Na sequência o material passa por uma etapa de classificação por tamanho com o uso de hidrociclones. A mistura salina deslamada e classificada contendo aproximadamente 60% de sólido (ou 54% de salmoura por volume) permanece em condicionadores sob agitação. Geralmente no primeiro condicionador, um reagente como amido ou Guartec pode ser adicionado para neutralizar e deprimir qualquer material argiloso não removido nas etapas de classificação ou formado pela ação abrasiva subsequente da polpa. No segundo condicionador, um acetato de amina alifática é adicionado para ativar a silvinita atuando como um coletor e aumentando sua flotabilidade. O NaCl não é afetado e permanece

no fundo da célula de condicionamento. Em geral, se adiciona um espumante como o óleo de pinho para se controlar a espuma.



Fluxograma 3. 1 Processo de beneficiamento convencional de sais de potássio. Fonte: 911 Metallurgist (2019)

Segundo 911 Metallurgist (2019), a flotação se desenvolveu como o principal processo de separação para sais de potássio que geralmente são grosseiramente cristalinos e estão liberados na faixa granulométrica de 2 a 1,41 mm. Na maioria dos casos o sal de potássio flota juntamente com a espuma e o NaCl permanece deprimido no fundo da célula ou coluna de flotação, sendo posteriormente direcionado para barragens de rejeitos.

O processo de flotação geralmente é muito rápido, se a solução está devidamente condicionada. Normalmente de 1,5 a 2 minutos seriam suficientes, porém por segurança a taxa

de alimentação e a granulometria dos cristais é controlada. A porcentagem de sólidos permanece em torno de 25% a 30% durante todo o processo de flotação.

3.4 ANOMALIA DE SAIS DE POTÁSSIO NA COSTA DE ARACAJU – SE

3.4.1 Geologia regional

A estratigrafia regional da Bacia Sergipe Alagoas, doravante denominada simplesmente pela sigla BSA, cujos trabalhos mais recentes são de Feijó (1994), W.U (1997), Azambuja Filho, L.M., & G (1998) e Souza-Lima (2005). Estes autores reconhecem, na coluna estratigráfica da BSA, a ocorrência de cinco tectonossequências (e respectivos estágios de evolução tectônica): Sinéclise, Pré-rifte, Rifte, Transicional e Drifte (carta estratigráfica figura 3.25).

Em um contexto regional e cronológico mais amplo, a BSA, definida quando do evento de rifteamento Sul-Altântico, preserva registros parciais de duas bacias interiores precedentes, uma sinéclise neopaleozóica e uma sinéclise (designada de “depressão periférica” ou Depressão Brasileira por Estrella (1972) e Asmus & Porto (1980) de idade jurássica ou juro-triássica (de 201 a 145 Ma), está última periférica a uma grande área soerguida e com vulcanismo ativo, centrada na atual região leste/sudeste brasileira. Ainda que comumente citada como exemplo de um dos registros sedimentares mais completos, na Margem Atlântica Leste, a coluna estratigráfica da BSA comporta importantes hiatos (erosão e/ou não deposição), que podem envolver intervalos de tempo de até dezenas de milhões de anos (ver carta Fig. 3.25), entre as sequências da Margem Atlântica (Rifte + Transicional + Drifte) e aquelas das sinéclises precedentes (Juro-Triássica e Neopaleozóica).

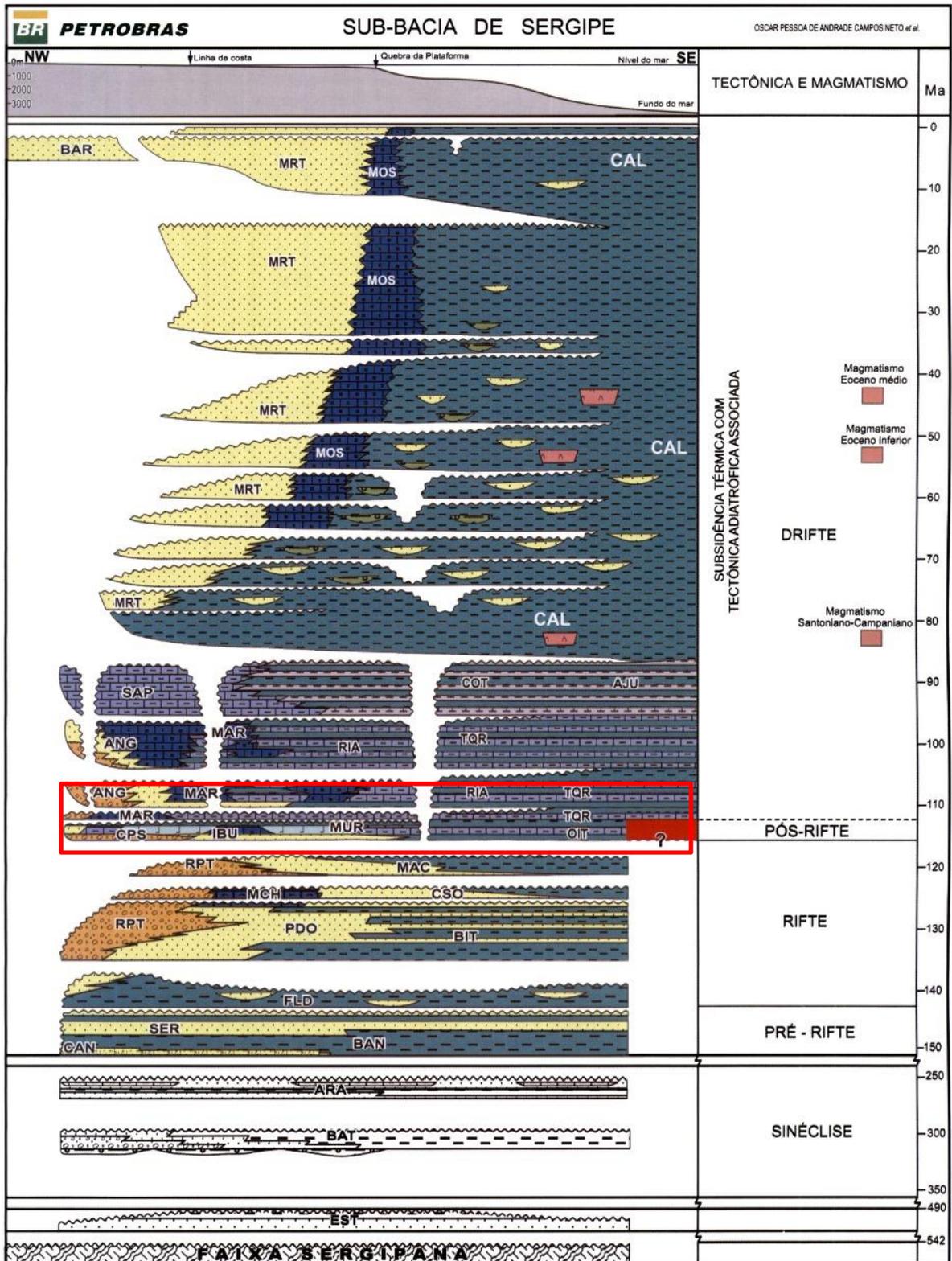


Figura 3. 25 Carta estratigráfica da Sub-bacia de Sergipe. Fonte: Souza-Lima (2005)

Segundo Sá & Oliveira (2008), o contato basal das rochas sedimentares, com o embasamento cristalino, é feito por uma superfície de não-conformidade que pode envolver, no topo: a) a base da Tectonossequência Neopaleozóica, representada pela formação Batinga (por

exemplo, na região do Domo de Igreja Nova), ou pela Formação Aracaré, mais jovem (o que parece ser o caso no Alto de Palmeira Alta); b) a Tectonossequência Pré-rifte Juro-Triássica, representada pelas formações Candeeiro ou Bananeiras (por exemplo, no Baixo de Divisa Pastora e nos altos de Atalaia e Aracaju); c) a base da Tectonossequência Rifte, caracterizada pela Formação Serraria (no Baixo de Japarutuba e no Alto de Itaporanga); d) outras unidades mais jovens da Tectonossequência Rifte, tais como as formações Penedo ou Poção (setores de rampas de revezamento na SBAL centro-norte); e) a Formação Muribeca, atualmente considerada como o topo da Tectonossequência Rifte na SBSE (região de Carmópolis/Alto de Aracaju). Exceto pela Formação Barreiras, que se estende a oeste da margem continental falhada da BSA, não são conhecidas ocorrências de outras unidades das tectonossequências Drifte capeando diretamente o embasamento cristalino.

Discordâncias angulares importantes ocorrem: a) internamente à Tectonossequência Rifte, com destaque para a discordância na base da Formação Muribeca; b) na base da Tectonossequência Drifte Transgressiva, sendo que em ambos os casos (a,b) ocorrem, sotopostas, unidades sinrifte basculadas; a mesma discordância pode ter caráter predominantemente erosivo, quando a unidade sotoposta é a Formação Muribeca; c) na base da Formação Barreiras, capeando camadas basculadas das tectonossequências Drifte (especialmente, da Drifte Transgressiva) ou mais antigas.

Nesse trabalho, o enfoque será a formação Muribeca que é onde ocorre as rochas evaporíticas.

3.4.2 Formação Muribeca: definição e relações estratigráficas

Na proposta de Schaller (1970), a unidade foi subdividida em cinco membros: Maceió, Tabuleiro dos Martins, Carmópolis, Ibura e Oiteirinhos. Na revisão de (Feijó, Bacias de Sergipe e Alagoas. , 1994), o Membro Maceió foi elevado à categoria de formação, incluindo na mesma o Membro Tabuleiro dos Martins.

Segundo Sá & Oliveira (2008), o termo “Membro Carmópolis” foi introduzido por Schaller (1970), tendo seu nome derivado da cidade homônima, situada na região onde também se localiza o Campo de Carmópolis. Já o termo “Ibura” foi proposto como formação por Petri (1962), para incluir os evaporitos e rochas associadas, perfurados pelos poços Ibasa 2, 3 e 4 e Itatig 3 e 4, tendo seu nome derivado da localidade de Ibura, onde estes poços foram executados.

Schaller (1970) utilizou o termo como um membro da sua Formação Muribeca. Finalmente, o “Membro Oiteirinhos” foi proposto por Schaller (1970) para designar o pacote de folhelhos, calcários e arenitos que capeiam os evaporitos do Membro Ibura.

A Formação Muribeca não é aflorante, ocorrendo exclusivamente em subsuperfície e restrita à Sub Bacia Sergipe, *onshore* e *offshore*, alcançando o Baixo do São Francisco, sua espessura comumente varia entre 50 a 400 m, podendo atingir 600 m; poços com registros de até 1.600 m devem se reportar à ocorrência de diápiros de sal. Os membros apresentam potências que comumente variam entre 15 a 200 m, com máximo de 420 m para o Membro Ibura, o que pode refletir corpos de sal intrusivos.

Segundo Sá & Oliveira (2008), o contato basal desta unidade é marcado por uma importante discordância, de caráter regional, facilmente reconhecível em sísmica e em poços, tendo sido denominada, no referido projeto, de Discordância Pré-Alagoas superior (equivalente à discordância denominada de “pré-Neo-Alagoas” por Bacelar & Costa (1993). Esta discordância é também identificada na contraparte africana da bacia, e é considerada por muitos autores como o limite superior da fase principal de rifteamento das bacias marginais brasileiras Azambuja, Souza-Lima, & Ferreira (2004), ou seja, como uma “discordância de *breakup*”.

3.4.3 Seções tipo

Segundo Feijó (1994), a seção tipo da Formação Muribeca foi definida no intervalo entre 359 e 1.005 m do poço 1PM0001SE (Fazenda Palma 1; Figura 3.26), perfurado pela PETROBRAS no município de Japarutuba, figura 3.26.

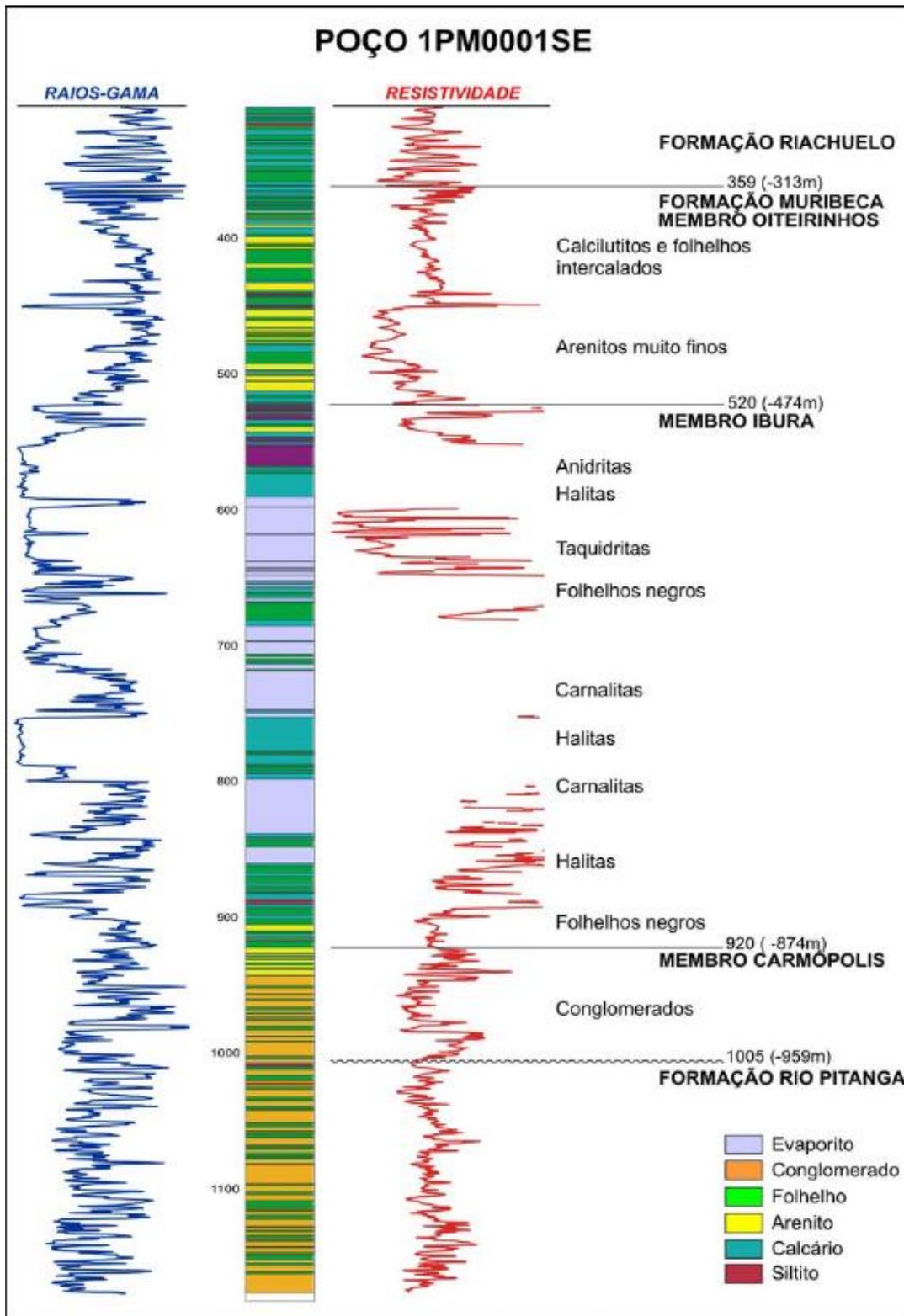


Figura 3. 26 Seção tipo para a Formação Muribeca no poço 1PM0001SE, localizado a cerca de 4 km a NW da cidade de Carmópolis (modificado de Feijó, (1994)).

De acordo com Sá & Oliveira (2008), as seções-tipo dos membros da Formação Muribeca permanecem conforme a definição original de (Schaller, 1970). Para o Membro Carmópolis, foi definido o intervalo entre 664 e 805 m do poço 1CP0008SE (Carmópolis 8)

para servir de seção-tipo (Figura 3.27), ficou definido como seção-tipo do Membro Ibura o intervalo 558 a 651 m do poço 7CP0072SE (Carmópolis 72; Figura 3.28) e, para o Membro Oiteirinhos, a seção-tipo corresponde ao intervalo entre 363 e 463 m do poço 1CPB001ASE (Carmópolis Zona B 1A Figura 3.29), todos perfurados em Carmópolis, SE.

Os perfis de raios-gama e resistividade dão uma ideia geral respectivamente da presença de minerais radioativos, identificação das litologias e diferença de fluido.

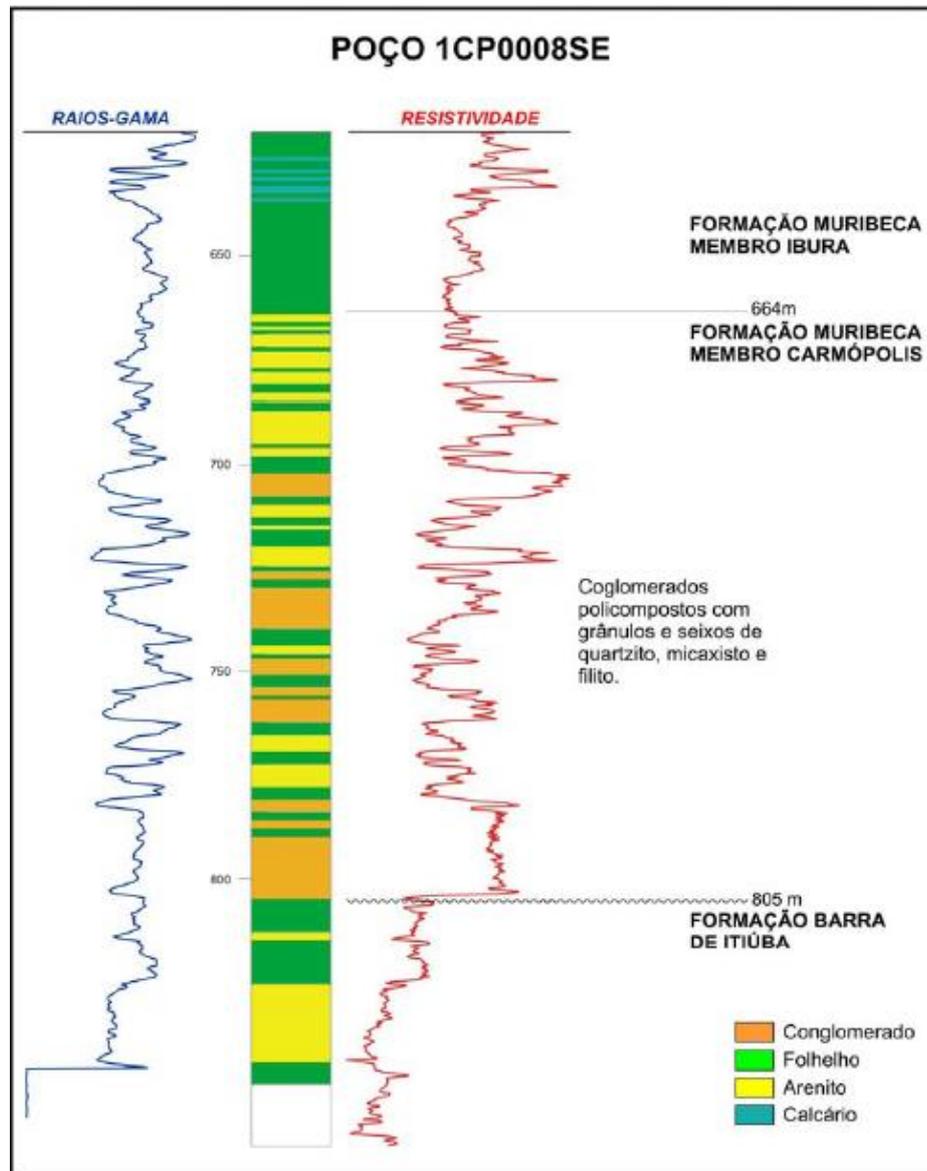


Figura 3. 27 Seção-tipo para o Membro Carmópolis da Formação Muribeca no poço 1CP0008SE (modificado de Schaller (1970)).

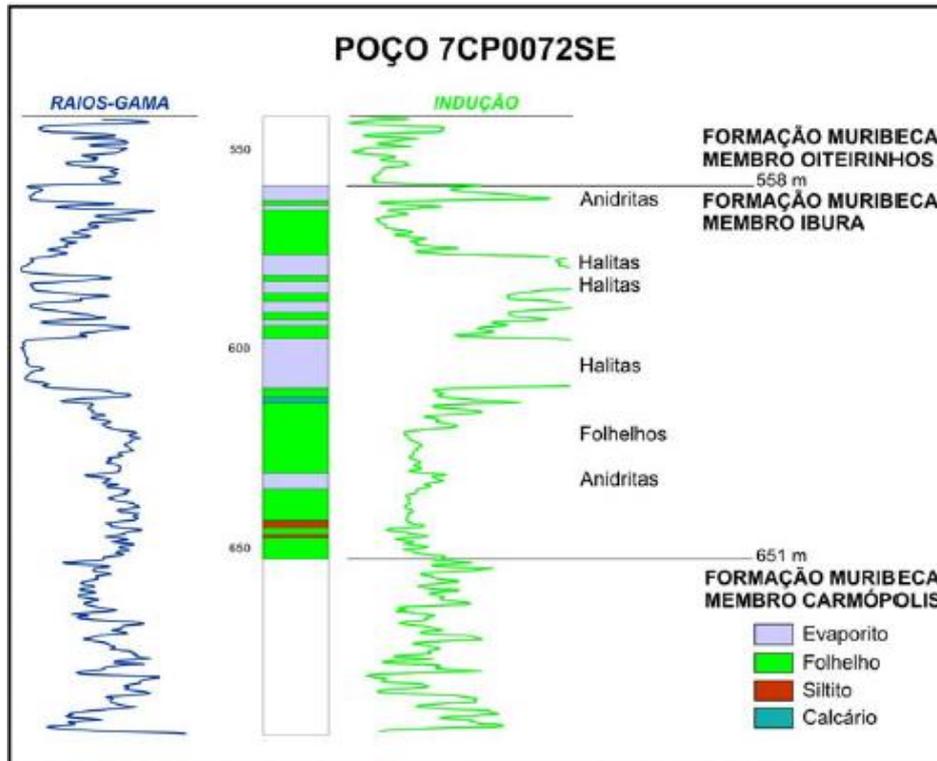


Figura 3. 28 Seção-tipo para o Membro Ibura da Formação Muribeca no poço 7CP0072SE (modificado de Schaller (1970)).

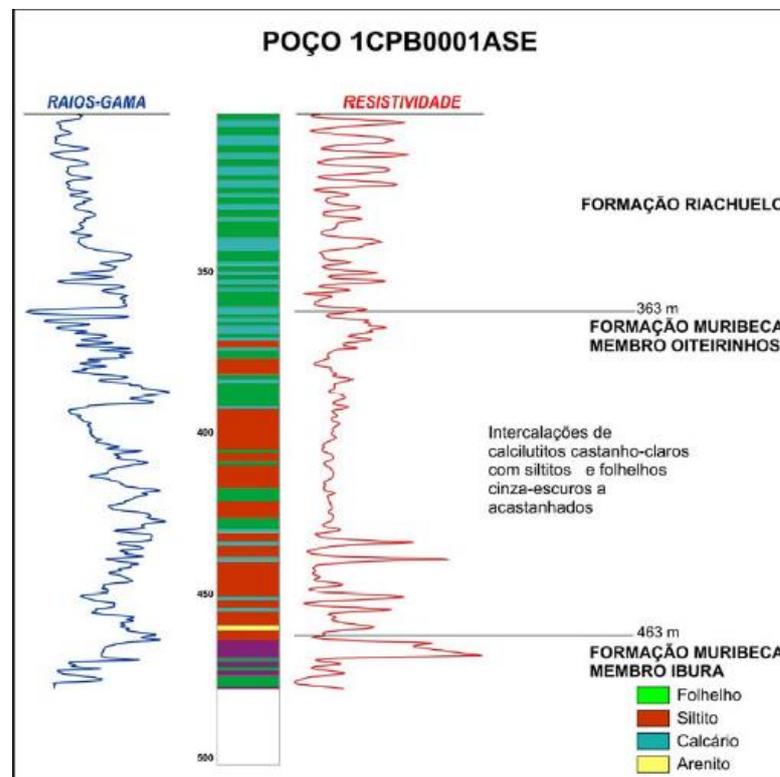


Figura 3. 29 Seção-tipo para o Membro Oiteirinhos da Formação Muribeca no poço 1CPB0001ASE (modificado de Schaller (1970)).

3.4.4 Fácies e Sistemas Depositionais

A faciologia da Formação Muribeca é bastante diversificada, havendo uma relação direta entre as litofácies e cada um dos seus membros, Sá & Oliveira (2008).

Ainda segundo Sá & Oliveira (2008), o Membro Carmópolis apresenta coloração cinza a castanha, sendo constituído, de um modo geral, por conglomerados polimíticos compostos por seixos de filitos, micaxistos, metarenitos e, em menor quantidade, de siltitos e margas. Em função das características granulométricas e estruturas sedimentares, Souza (1989) distinguiu sete litofácies para esta unidade, associando cada uma delas ao sistema ou sub-sistema de origem, como apresentadas a seguir, retirado de Sá & Oliveira (2008):

(i) *Conglomerados: consiste de conglomerados polimíticos, pobremente selecionados, com blocos, seixos e grânulos de quartzito, gnaisse, quartzo leitoso de veio, micaxisto, filito, ardósia, mármore, metarenito e raros intraclastos argilosos;*

(ii) *Diamictito: constituída por diamictitos com clastos imersos em matriz essencialmente argilo-arenosa, exibindo feições de escorregamento, depositados a partir de fluxos de lama que ocorreram nas partes proximais dos leques.*

(iii) *Arenitos conglomeráticos: caracterizada por conglomerados de matriz arenosa, com seixos de até 5 cm, arenitos conglomeráticos e arenitos muito grossos a grossos, todos de composição lítica. Apresentam estratificações cruzadas tabulares ou acanaladas, bem como acamamentos com gradação normal, na maioria dos casos, com raras ocorrências de gradação inversa nos níveis mais grossos.*

(iv) *Arenitos: composta de arenitos médios a muito finos, algumas vezes sílticos ou com grânulos dispersos, bem selecionados, de composição lítica. Apresentam normalmente granodecrescência ascendente e laminações planoparalelas bem desenvolvidas, podendo ainda exibir estrutura maciça ou estruturas de escape de fluido, do tipo prato. Localmente, ocorrem estratificações cruzadas indistintas e laminações cruzadas por corrente. Estes arenitos, por vezes, compõem ciclos turbidíticos incompletos, centimétricos, tipo Tbce de Bouma, podendo apresentar estruturas de retrabalhamento por ondas.*

(v) *Ritmitos: caracterizada por interlaminações centimétricas de siltitos e folhelhos, com predominância de laminações paralelas. Os siltitos exibem marcas onduladas cavalgantes e evidências de retrabalhamento por ondas. São comuns as intercalações de arenitos muito finos, contendo restos de vegetais, carvão, escamas fosfatizadas de peixes, conchas de gastrópodes e bivalvíos. Gretas de contração e bioturbação intensa podem estar presentes.*

(vi) *Calcilititos: caracterizada pela alternância de folhelhos e calcilititos dolomíticos, margas e nódulos de anidrita dispersos, e níveis de caliche. Sua origem possivelmente está relacionada*

a processos ocorridos às margens de um grande lago tectônico, em transição para um estágio lagunar.

(vii) Folhelhos: representada por espessas (até 6 m) camadas de folhelhos cinza-escuros, laminados e papiráceos, com distribuição lateral regional.

As feições sedimentares do Membro Carmópolis sugerem um sistema deposicional constituído por leques em clima semi-árido, associado a um complexo lacustre ou lagunar. Em alguns momentos os leques eram retrabalhados por um sistema alúvio-fluvial entrelaçado e, em outros, desembocavam diretamente no corpo aquoso lacustre Souza (1989).

No Membro Ibura se encontra a maior parte da seção evaporítica da Formação Muribeca. Segundo Sá & Oliveira (2008), este membro é constituído por diversos ciclos evaporíticos, iniciados pela deposição de carbonatos e sulfatos (anidrita), seguida pela precipitação de halita e de depósitos mistos de halita-silvita, denominados de silvinita. Alguns ciclos evoluíram para condições de aridez extrema, depositando sais raros e extremamente solúveis, tais como carnalita e taquidrita.

Em Fonseca (1972), foi apresentada uma detalhada descrição dos ciclos evaporíticos do Membro Ibura, sendo definido diversos marcos estratigráficos para esta unidade. Foram caracterizados dez ciclos principais, os dois primeiros representados por sais solúveis e os dois últimos por uma seção de anidrita, calcário e folhelho.

Segundo Feijó (1979) e Azambuja et al. (1980), os calcários do Membro Ibura teriam sido depositados em um sistema lagunar hipersalino raso (menos de 20 m), sob clima semi-árido, demonstrado pela presença de esteiras algálicas, com aporte periódico de águas continentais e marinhas, formando um sistema de planície de maré com água relativamente turva.

De acordo com Sá & Oliveira (2008), um modelo da deposição deste sistema evaporítico foi sintetizado por Oliver (1997). A exposição subaérea e o ressecamento dos calcários laminados gerariam níveis de calcários brechados, associados a este sistema. Construções estromatolíticas teriam sido desenvolvidas nas porções mais rasas e periféricas da laguna. A intensa evaporação e concentração das águas da laguna teriam originado uma planície de sabhka nas bordas, com a precipitação de anidrita nodular nos sedimentos carbonáticos. Com o aumento da concentração de sais na salmoura, iniciou-se a deposição de halita, em uma depressão rasa. O aporte de água deve ter sido periódico, a julgar pelas abundantes intercalações de folhelhos com os evaporitos. Porém, segundo Sá & Oliveira (2008) os modelos apresentados são insuficientes para explicar como uma sucessão evaporítica tão expressiva teria sido gerada.

O Membro Oiteirinhos por sua vez, é constituído pela alternância de folhelhos e calcilitos peloidais ou calcários microbiais. Sua origem, de acordo com Sá & Oliveira (2008) é interpretada como relacionada aos sedimentos marinhos depositados nas porções menos restritas, externas à bacia evaporítica.

3.4.5 Estratigrafia da bacia

Em termos de geologia estrutural, os grandes compartimentos tectônicos e falhas principais, são exibidos na figura 3.30.

Na figura 3.31, exhibe-se uma seção geológica da Sub-Bacia de Sergipe. Modificado de Mohriak (1998) e a figura 3.32 um esboço geológico do embasamento Pré-cambriano.

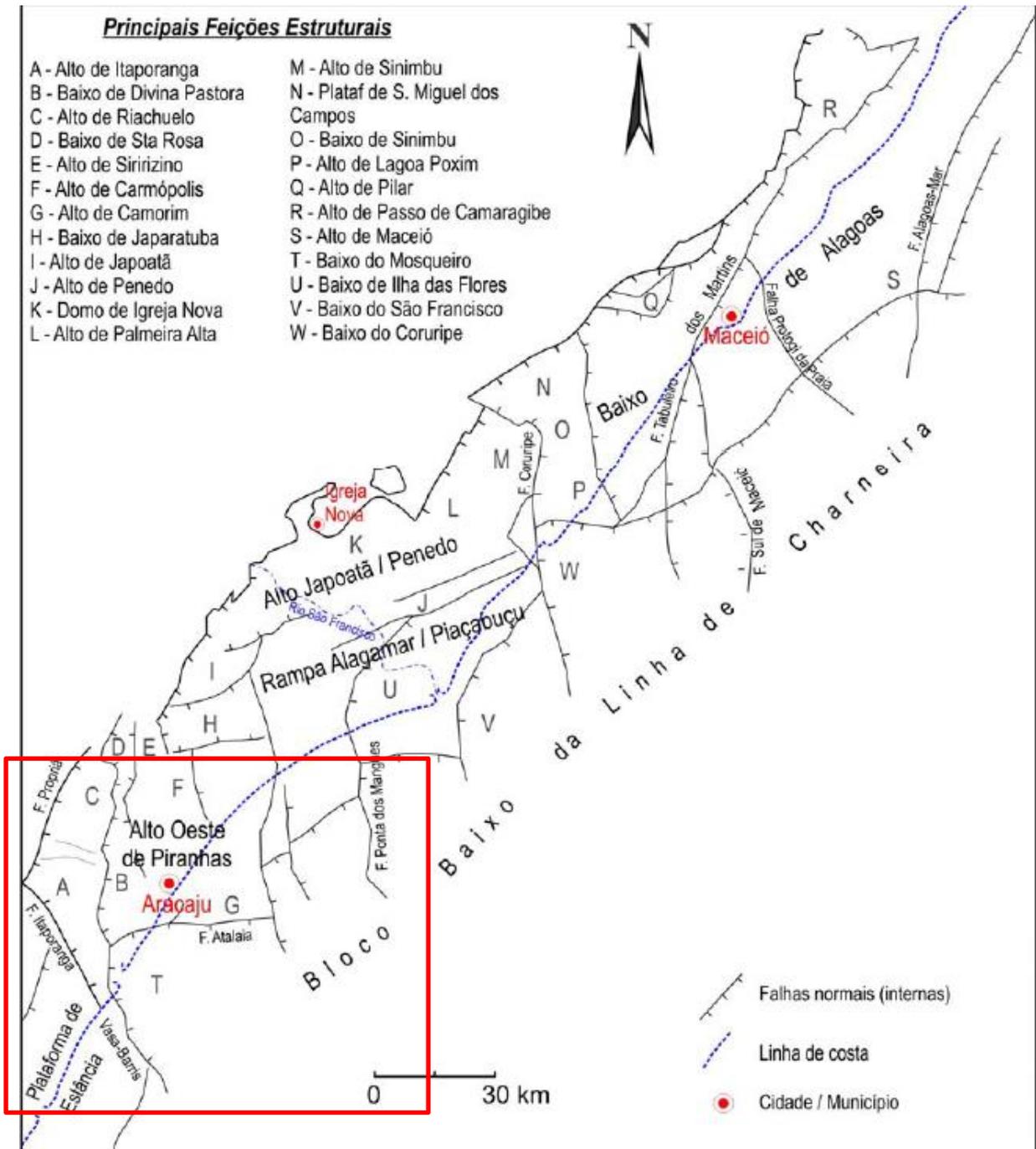


Figura 3. 30 Arcabouço estrutural da Bacia Sergipe - Alagoas, exibindo os grandes compartimentos tectônicos e falhas principais, em vermelho área de trabalho. Fonte: Falkenheim (1986)

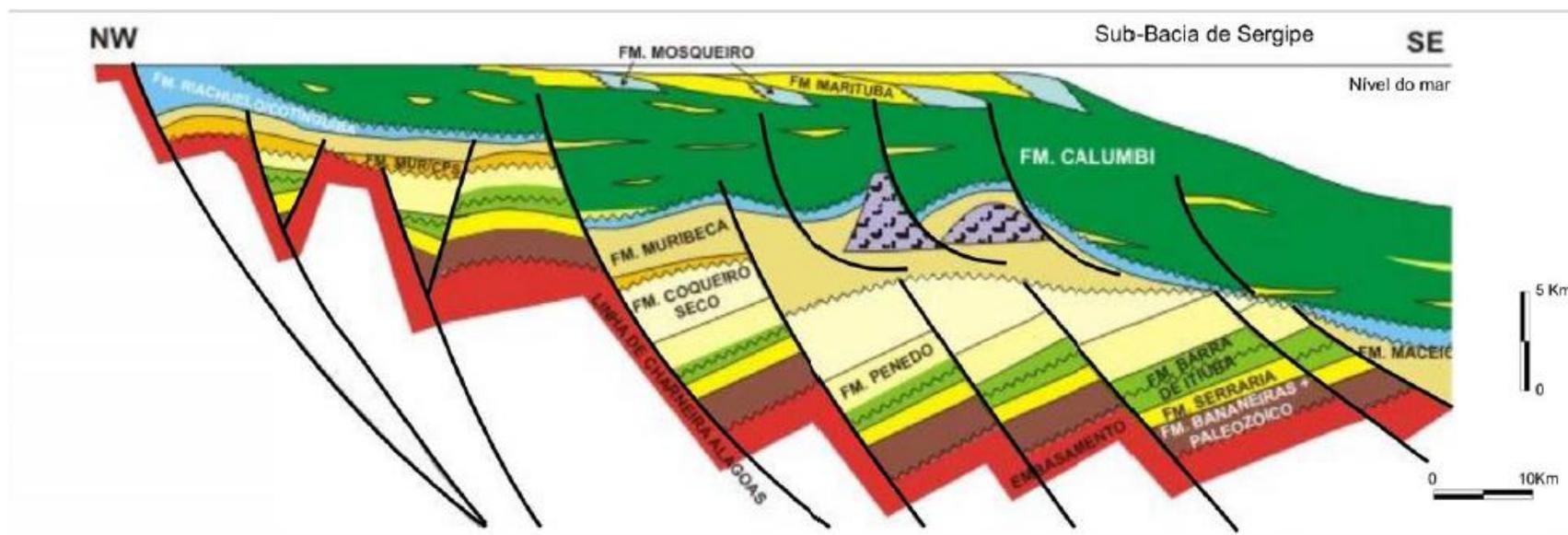


Figura 3. 31 Seção geológica da Sub-Bacia de Sergipe. Modificado de C. & Mohriak (1998) . Fonte: retirado de Sá & Oliveira (2008).

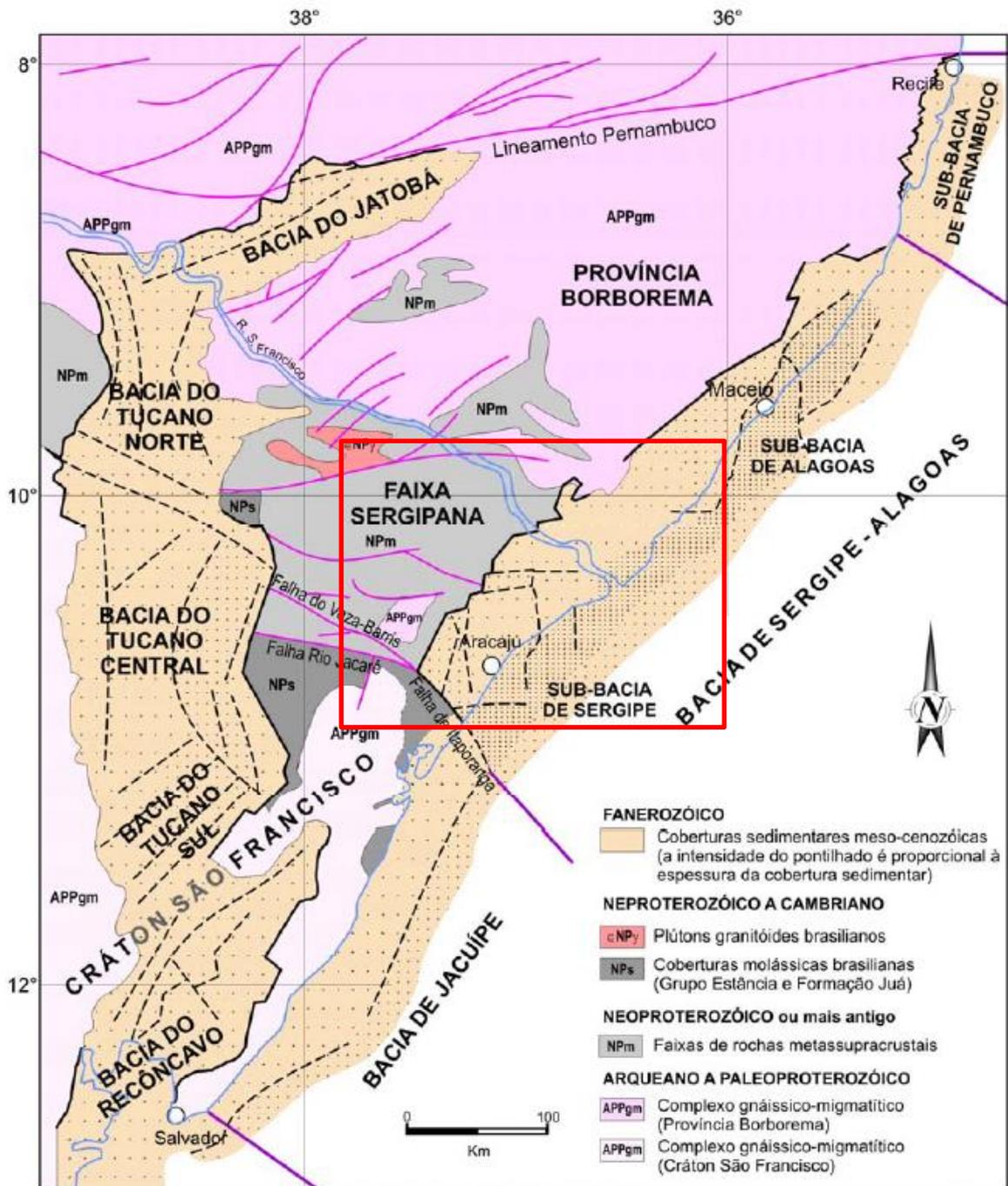


Figura 3. 32 Esboço geológico do embasamento Pré-cambriano e bacias cretáceas entre o Lineamento Pernambuco e a região nordeste do Cráton São Francisco (modificado de (Lana, 1990)), em vermelho área de trabalho. Fonte: retirado de Sá & Oliveira (2008).

Neste momento, cabe registrar apenas que, na Mina Taquari- Vassouras, as camadas do Membro Ibura (Formação Muribeca) exibem macrodobras suaves, com charneiras de direção NE. Internamente na camada, são bem desenvolvidas estruturas de dobras assiméticas, abertas

a apertadas, inclinadas a invertidas, que afetam o acamamento e superfícies de dissolução subparalelas ao mesmo. Também fazem parte desse conjunto estruturas de boudinage, fabric plano-linear e critérios cinemáticos associados, todas as quais, por estarem ausentes nas rochas sedimentares encaixantes, só podem ser explicadas como um processo halocínético, com fluxo em regime dúctil (plástico) ou dúctil-frágil (Figura 3.33).

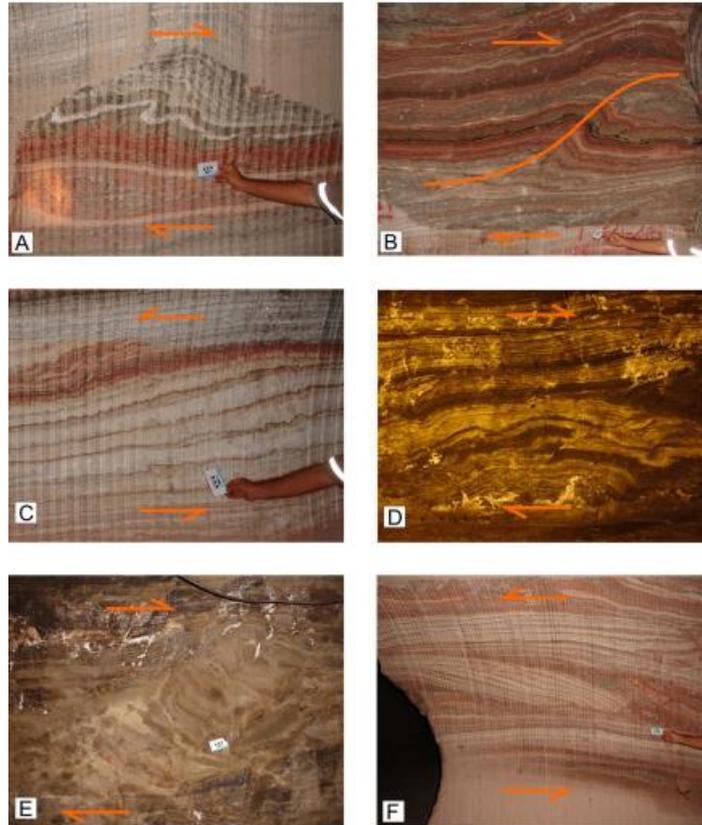


Figura 3. 33 Dobras e outras estruturas de fluxo dúctil-frágil nos evaporitos da Mina de Taquari-Vassouras (Mosaic, Rosário do Catete, SE). Em (A) e (B), observar a geometria curvilinear (sigmoidal em B) das superfícies de charneira (tracejadas), indicativas de gradientes de strain zonas de cisalhamento intra ou interestratais, associadas ao fluxo do sal. No detalhe em (C), as dobras assimétricas afetam o acamamento e superfícies de dissolução e soldamento subparalelas (estas últimas marcadas por picos estilolíticos e filmes escuros de material residual, insolúvel). Tais superfícies foram ativas durante o progressivo soterramento das camadas. Em (D), uma dobra assimétrica apresentando o flanco invertido falhado, indicando transição ao comportamento frágil. Essas condições transicionais se refletem em (E, rotação e faturamento distensional de um bloco acamadado) e (F, clastos entelhados e falhados) as setas indicam o sentido de cisalhamento aparente nas paredes das galerias. Fonte: Sá & Oliveira (2008)

3.5 Interpretação geofísica: sísmica aplicada à evaporitos

De acordo com Filho (2012), um dos pontos base da metodologia de interpretação sísmica é a integração e multidisciplinaridade, onde o trabalho do intérprete consiste em orientar e conduzir o processo exploratório.

“Estes produtos são apresentados na forma de mapas estruturais, mapas isópacos, seções geológicas e estratigráficas, entre outros, de maneira que, integrados, geram o modelo

geológico da área em análise. Os dados sísmicos constituem a base do processo de interpretação. Estes, entretanto, são integrados aos dados não sísmicos (gravimétricos e magnetométricos), dados de poços e paleontológicos. A geofísica de poços encarrega-se de fornecer as informações necessárias para que o intérprete possa ‘amarrar’ os dados de poços (perfis) ao dado sísmico. Os poços, por sua vez, são calibrados pela bioestratigrafia, de forma a conferir-lhes o caráter crono-estratigráfico. Desta forma, através da interpretação sísmica, integrada aos dados citados, são gerados os arcabouços estrutural e estratigráfico da bacia sedimentar em análise” afirma Filho (2012).

A aquisição de dados sísmicos em alto mar é feito por meio do uso de navios (figura 3.34) equipados com cabos (*streamers*), esses cabos possuem hidrofones e geofones, além disso, existem receptores à profundidades variáveis, que possibilitam adquirir dados com uma banda maior de frequências e consequentemente uma maior resolução.



Figura 3. 34 Navio de aquisição sísmica realizando levantamento de campo na Bacia de Santos. Fonte: SGBF (2012)

Uma vez que os dados sísmicos são adquiridos eles são processados e trabalhados e passam a serem chamados de *pós-stack*. Essa etapa de processamento envolve um grande

esforço computacional devido à aplicação de um modelo de velocidade aos dados, visando-se obter um modelo em tempo de retorno da onda. O processamento de dados sísmico e toda a formulação matemática inerente a esse processo foge ao objetivo desse trabalho, para tanto recomenda-se consultar os artigos da Sociedade brasileira de Geofísica (SBGF).

Com os dados pós-stack em mãos o intérprete inicia a construção de seu modelo, levando-se em conta o conhecimento geológico-estrutural prévio da área. Nesse trabalho será utilizado os softwares Kindgom e DUG.

Por meio do uso combinado de dados de poços perfurados (topos, perfis geofísicos, etc) o interprete irá gerar os topos de cada formação e posteriormente gerar esses horizontes, que servirão de base para a construção do modelo geológico subsequente.

3.6 Petrofísica aplicada à evaporitos

Neste trabalho enfocara-se três parâmetros petrofísicos: Gamma Ray (GR), densidade (RHOB) e velocidade sônica (DT). De maneira resumida explicar-se no decorrer deste tópico o significado físico da análise desses parâmetros no contexto geológico.

A curva petrofísica Gamma Ray (GR), de acordo com Stevanato (2011) mede a radioatividade natural emitida pelos elementos instáveis ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K , enquanto que o perfil espectral de raios gama mede os três elementos radioativos separadamente. Segundo Rider (2002), os raios gama são detectados por cintilômetros, câmara de ionização ou, mais raramente, por um contador Geiger-Müller, na qual estes instrumentos medem a radiação dentro de uns poucos decímetros da parede de um poço. A radioatividade medida geralmente é expressa por °API, definidas de acordo com um poço teste da Universidade de Houston.

A distinção dos diferentes tipos de rochas depende da quantidade de elementos radioativos (Figura 3.35). As rochas ígneas e metamórficas são mais radioativas do que as rochas sedimentares. As rochas com argilas são naturalmente mais radioativas que as demais rochas sedimentares devido à presença de Potássio, que está presente em minerais como illita, micas e feldspato potássicos, e Urânio e Tório.

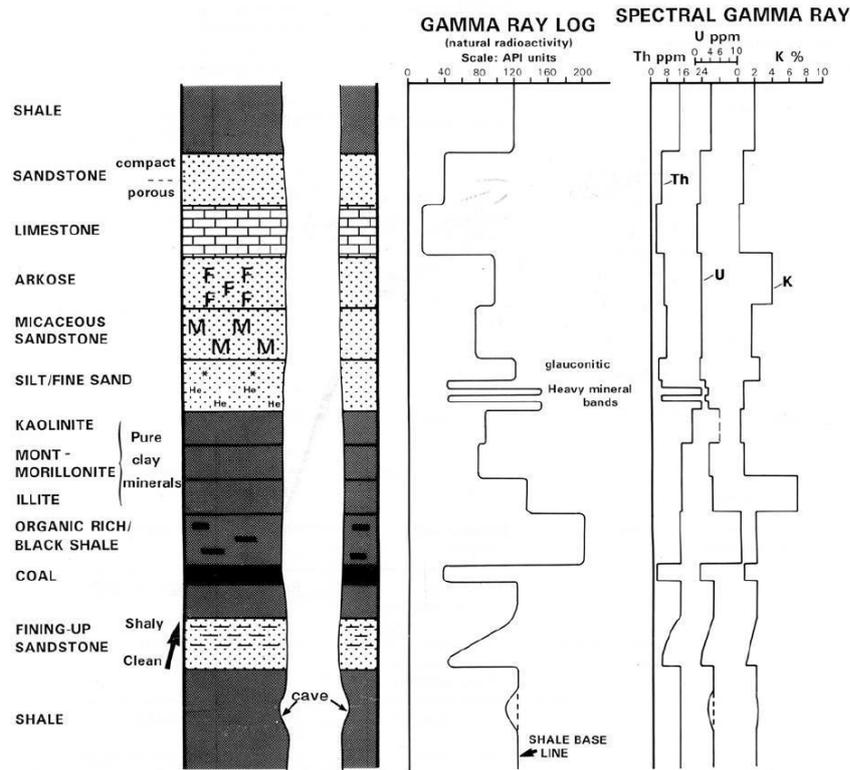


Figura 3. 35 Perfil de raios gama e perfil espectral de raios gama e algumas respostas típicas de diferentes litologias.
Fonte: Rider (2002)

Segundo Stevanato (2011), o perfil de densidade da formação (density log, RHOB) é um registro contínuo de toda a formação (bulk density, ρ_b). Geologicamente, essa densidade é uma função da densidade dos minerais formadores da rocha, ou seja, a matriz, e o fluido alojado nos poros.

A determinação do valor de densidade se dá através da colisão de raios gama artificiais, utilizando uma fonte de ^{60}Co ou ^{137}Cs , com os elétrons da formação, criando o fenômeno conhecido como espalhamento de Compton. Sendo assim, a densidade da formação é estimada com a medição da radiação gama que retorna para o detector, já que a quantidade de radiação gama dependerá da abundância de elétrons presentes, que por sua vez, é função da densidade de formação Keary *et Al.* (2009). A unidade de medida utilizada é de massa por volume, geralmente expressa em g/cm^3 . A figura 3.36 ilustra a resposta dos perfis RHOB para diferentes tipos de litologia.

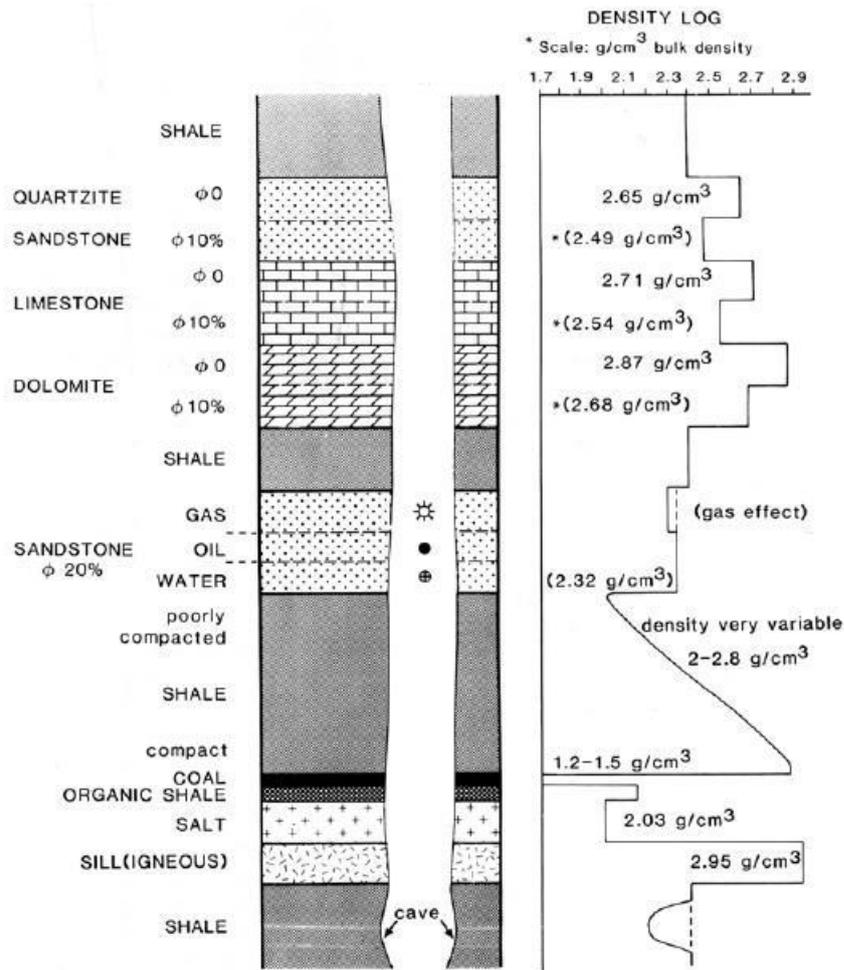


Figura 3.36 Algumas respostas típicas para o perfil de densidade. Fonte: Rider (2002).

Já os perfis sônicos ou perfis acústicos, fornecem os intervalos de tempo de trânsito da formação, ou seja, é a medida da capacidade da formação de transmitir ondas de som. Esta informação pode auxiliar na interpretação sísmica ao correlacionar velocidades da sísmica com as velocidades do perfil, com isso ajustando o tempo-profundidade.

Estes perfis têm como princípio básico uma fonte que emite pulsos, que são difundidos pela formação, e ativam os receptores acústicos, geralmente dois e distanciados cerca de 300 mm, que registram os sinais recebidos. A fonte gera pulsos ultrassônicos a uma frequência de 20-40 kHz. A unidade de medida é expressa em microssegundos por pé de formação, apresentada geralmente na escala de 140-40 μ s/ft (Keary, Brooks, & Hill, 2009).

Qualitativamente, o perfil sônico é utilizado para calcular a porosidade, e também auxilia na interpretação sísmica, fornecendo os intervalos de velocidade e o perfil de velocidade e pode ser calibrado com a seção sísmica. Qualitativamente, o perfil é sensível a mudanças texturais tanto em arenitos quanto em folhelhos, ajuda a identificar a litologia e pode auxiliar

na indicação da presença de falhas e fraturas. A figura 3.37 representa a variedade de velocidades e o intervalo de tempo de trânsito das principais litologias.

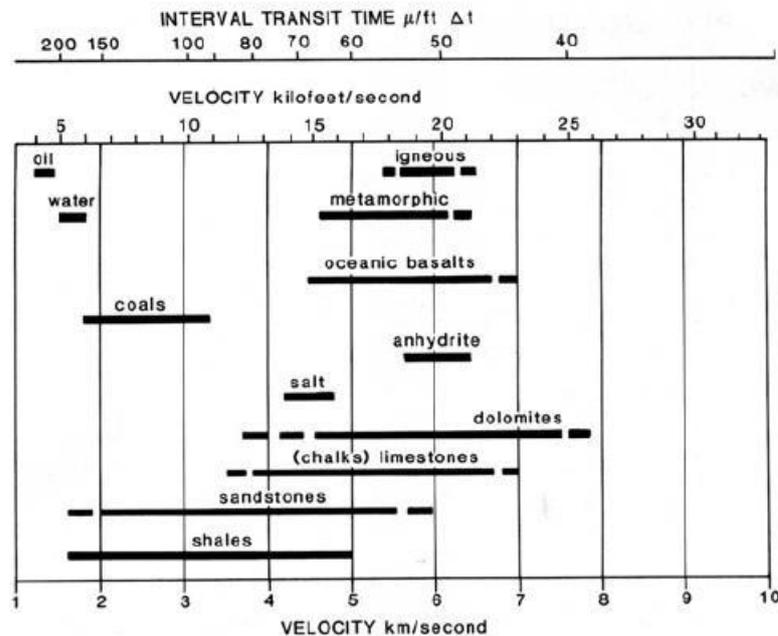


Figura 3.37. A variedade de velocidades e o intervalo de tempo de trânsito das principais litologias. Fonte: Rider (2002).

4. METODOLOGIA

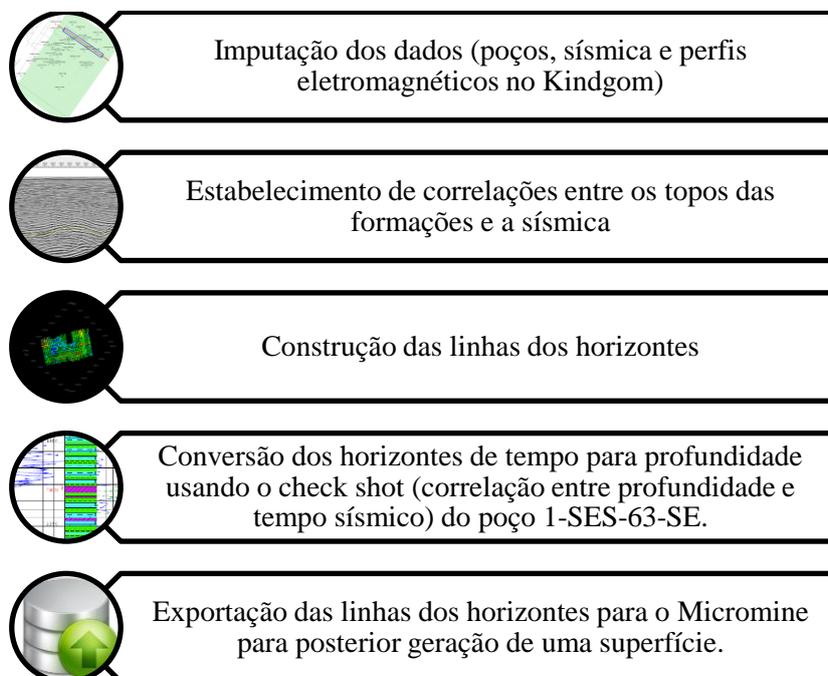
Como subsídio para execução deste trabalho, foi realizado uma pesquisa bibliográfica inicial buscando-se áreas onde existiam anomalias de sal de potássio mapeadas, porém que careciam de estudos complementares. Com isso, detectou-se uma área na costa sergipana onde existia uma anomalia de sal de potássio mapeada pela CPRM.

Posteriormente, realizou-se um estudo detalhado da área visando-se determinar todas as informações geológicas disponíveis. Foi realizado uma parceria científica entre ANP e UFMG onde a ANP disponibilizou dados de descrição de poços de petróleo, geofísica, gravimetria e perfilagem.

Tais dados foram trabalhados de maneira a se realizar um modelo geológico simplificado com o auxílio de softwares, como: Kingdom (IHS Markit), DUG e outros softwares geofísicos e Micromine, AutoCad para a parte de modelamento.

O projeto para correlação entre a sísmica, perfilagem geofísica e descrição de amostras de calhas dos poços de petróleo foi montado com o auxílio do software Kingdom, no fluxograma 4.1 é possível ver um passo a passo desse processo. Neste projeto duas sísmicas

foram imputadas: 0223_BAIXO_MOSQUEIRO_5A (3D) e 0068_SERGIPE_ALAGOAS_4ª (2D). Como a sísmica 3D abarcava praticamente toda a zona da anomalia, quase todas as interpretações foram feitas baseadas neste trabalho. Uma vez montando o projeto, o mesmo foi importado para o software DUG e algumas correlações entre os topos das formações foram feitas.



Fluxograma 4.1 Passo a passo do trabalho no Kindgom. Fonte: arquivo próprio (2020).

A figura 4.1 e 4.2, representa como é feito o mapeamento de um horizonte geológico através da combinação de sísmica e topos mapeados nos Perfis Compostos dos Poços fornecidos pela ANP. Para a conversão da sísmica de tempos para profundidades, foi utilizado *check shot* (pontos marcados durante a perfilagem dos poços, onde o tempo de viagem da onda é relacionado com a profundidade) que existiam em três poços: 1-SES-63-SE, 1-SES-66-SE e 3-SES-71-SE, logo foi possível transformar as profundidades dos topos em tempo e realizar o mapeamento em tempo dos horizontes, posteriormente esses horizontes foram convertidos de tempo para profundidade.

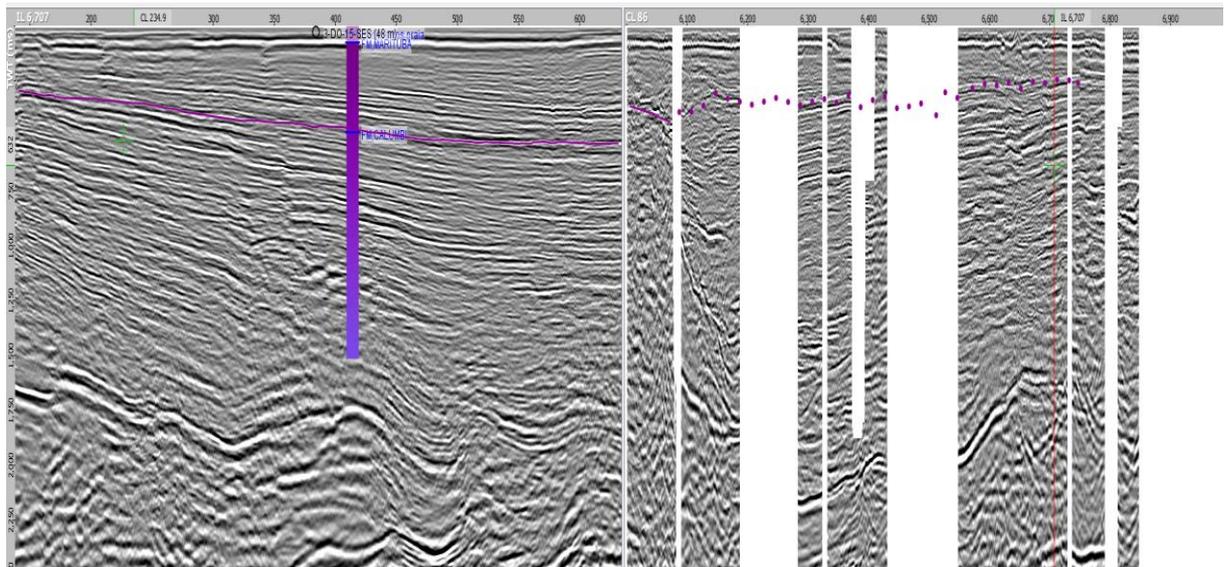


Figura 4. 1 Esquemático do processo de mapeamento de um horizonte no software DUG. Fonte: arquivo próprio - Dug Insight (2020)

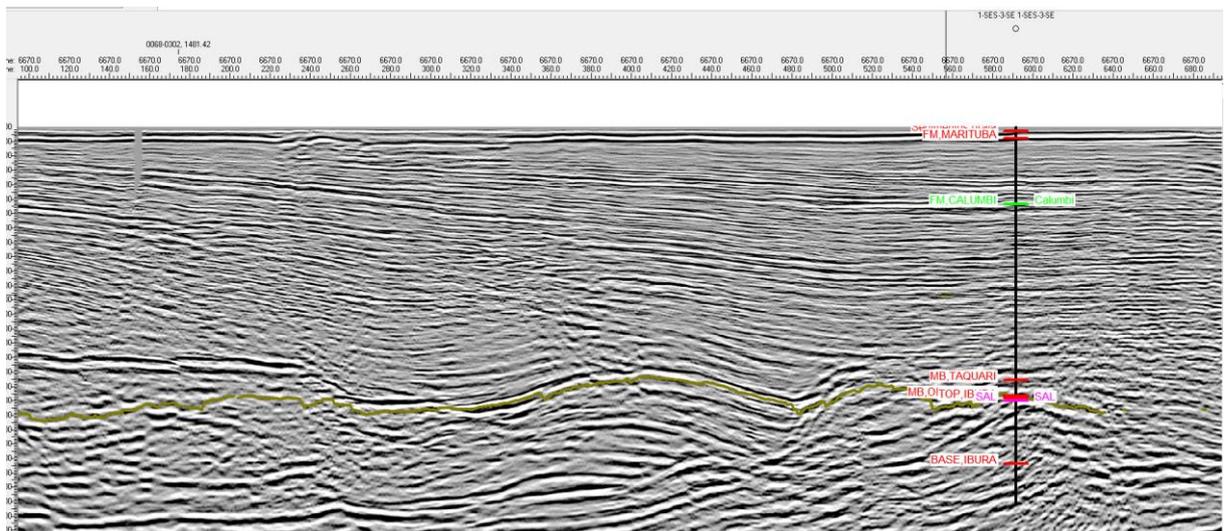


Figura 4. 2 Esquemático do processo de mapeamento do horizonte (Membro Ibura) no software Kindgom. Fonte: arquivo próprio - IHS Markit (2020)

Vale lembrar que, segundo Christopher *et al.* (2015), camadas de carnalitas de baixa velocidade sísmica (média de 3439 m/s) se comparado à velocidade típica dos demais sais, majoritariamente halita, cuja velocidade média é de 4500-5000 m/s, produzem reflexões negativas (anomalias escuras em sísmica).

Nesse trabalho não foi possível mapear somente a camada de sal dentro do membro Ibura, dado a baixa a resolução da sísmica à profundidade que se encontra o sal (de 2500 – 3200 m), lembrando que são camadas cujas potências variam de 1 a 10 metros o que é pouco para um estudo preciso de sísmica a essa profundidade, logo optou-se por mapear o membro onde ocorre o sal e, nesse caso usar o topo do sal detectado nos poços para se estabelecer horizontes

intermediários realizando-se aqui uma abstração necessária e assumindo que tanto a potência do membro quanto a potência do sal sempre vão obedecer a mesma proporção, em outras palavras se a potência do membro diminui a potência da camada salina diminui e vice versa.

Neste ponto do estudo optou-se por não criar uma superfície do horizonte diretamente no Kindgom ou DUG, as linhas sísmicas desenhadas foram exportadas para o Micromine (2020) e como esse é um software que detêm melhores ferramentas de interpolação a nível de corpo mineral, a superfície foi criada somente no Micromine (2020). Logo a figura 4.3 mostra o arquivo bruto exportado do Kindgom para o Micromine (2020).

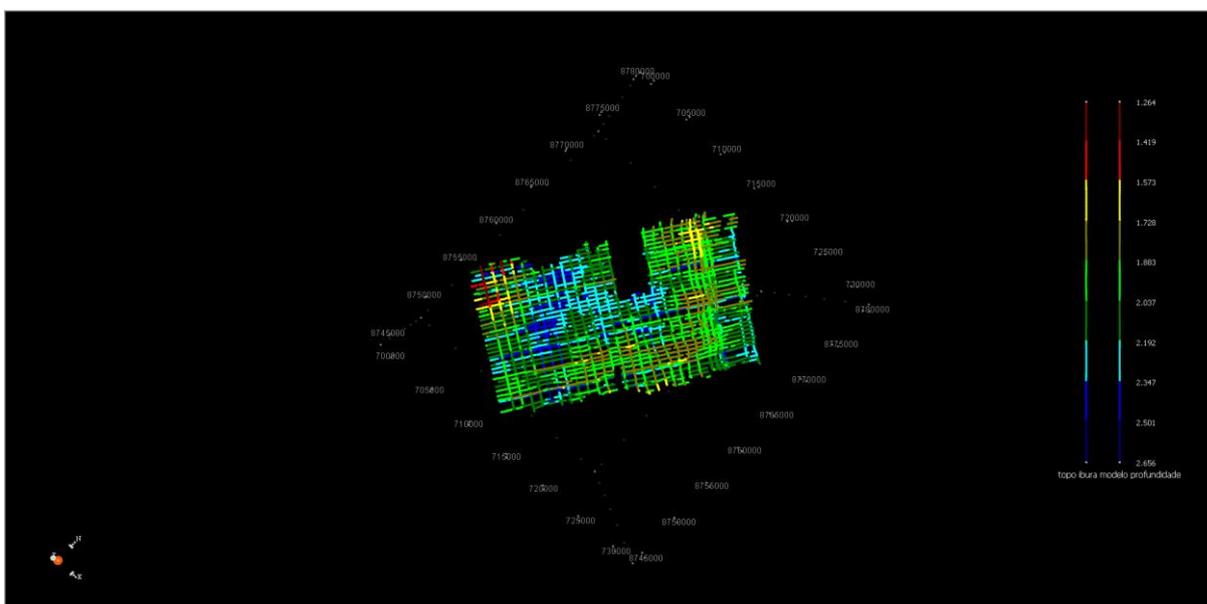


Figura 4. 3 Linhas do horizonte do topo do membro Iburá (modelo em profundidade) que foram exportadas do software Kindgom para o Micromine para posterior geração de superfície, por meio de métodos de interpolação. Fonte: IHS Markit (2020).

Uma vez que, cada um dos horizontes esteja mapeado, correlacionara-se os horizontes com os perfis dos poços (resistividade, gamma ray, Neutrons , etc) visando-se refinar o modelo e caracterizar da melhor maneira possível a anomalia de sal de potássio. Por fim, todo este projeto servirá de base para se construir um modelo geológico 3D a partir do qual será estimado o volume de recursos minerais.

5. RESULTADOS

5.1 Petrofísica e modelagem geológica

Aplicando-se os mesmos princípios utilizados em Christopher *et. al* (2015), no qual ele comparou três parâmetros petrofísicos Gamma Ray (GR), densidade (RHOB) e velocidade sônica (DT) para distinguir sais de potássio de outros sais, tal como ilustrado na figura 5.1. Foi construído com base no perfil composto dos poços um esquemático parecido para a anomalia em estudo. Como se observa na figura 5.1, nas regiões do perfil onde ocorre carnalita ou silvinita, tem-se uma menor densidade RHOB, maior velocidade sônica e maior Gamma Ray isso, porque, sais de potássio tem radiotiividade natural, logo a ferramenta de perfilagem irá ler o retorno da radiotiividade que ela emite somada a radiotiividade natural do sal de potássio, o retângulo vermelho no poço 369, por exemplo, destaca justamente esse comportamento das curvas. O uso combinado destes três parâmetros possibilitam uma melhor diferenciação dos sais de potássio de outros sais.

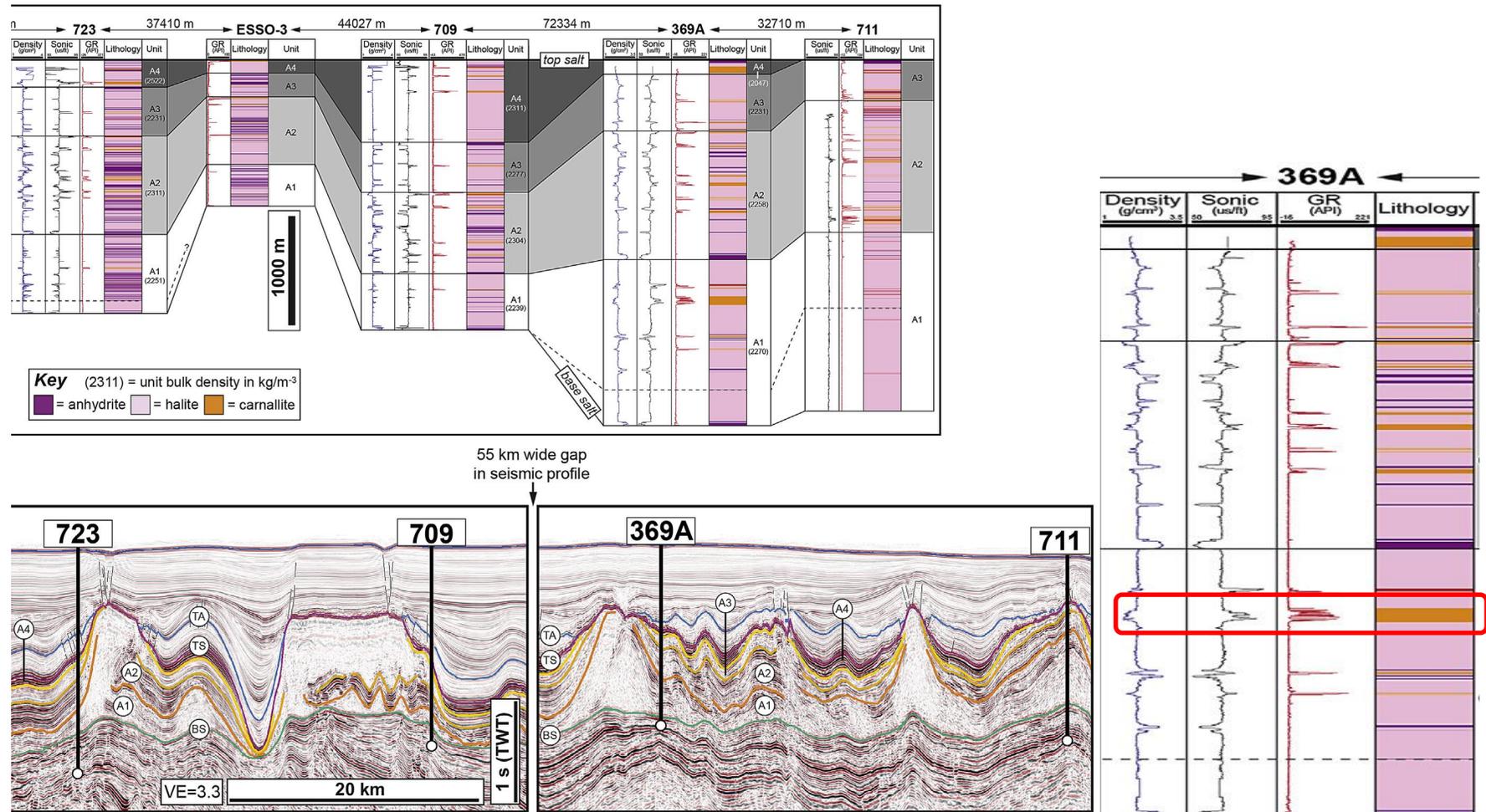


Figura 5. 1 Painel estratigráfico ilustrativo mostrando o comportamento dos perfis geofísicos numa formação salina. O retângulo vermelho destaca o comportamento das curvas de densidade, sônico e Gamma Ray diante da ocorrência de sal de potássio. Fonte: Christopher *et Al.* (2015)

Nas figuras: 5.2, 5.3 e 5.4 são apresentados esquemáticos para os três poços (1-SES-3-SE; 1-SES-8-SE e 1-SES-1A-SE) que cortaram o corpo salino, vale lembrar que apesar de se dispor de mais poços na área em estudo, a grande maioria não atingiu a profundidade do corpo mineral já que foram perfurados buscando-se óleo e gás.

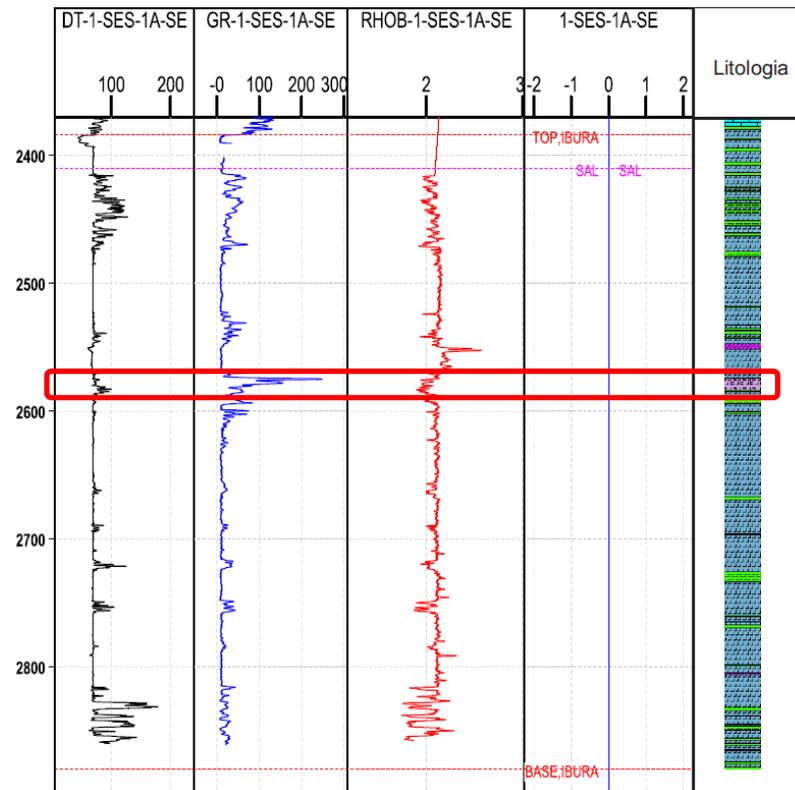


Figura 5. 2 Esquemático perfilagem do poço 1-SES-1A-SE, mostrando o comportamento das curvas sônica (DT), gamma ray (GR) e densidade (RHOB) na presença de corpos de sais de potássio. Fonte: autoria própria (2020)

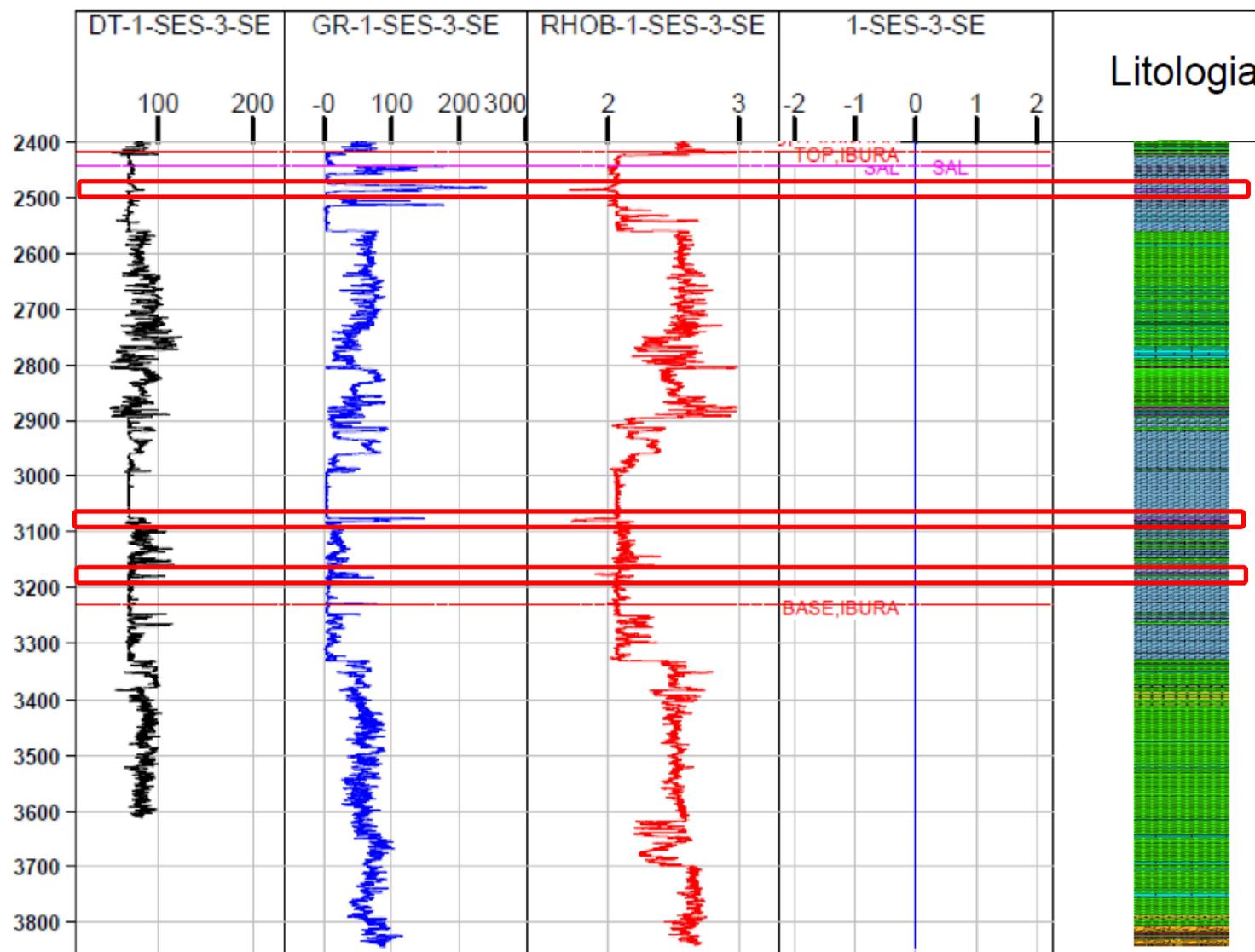


Figura 5. 3 Esquemático perfilagem do poço 1-SES-3-SE, mostrando o comportamento das curvas sônica (DT), gamma ray (GR) e densidade (RHO) na presença de corpos de sais de potássio. Fonte: autoria própria (2020)

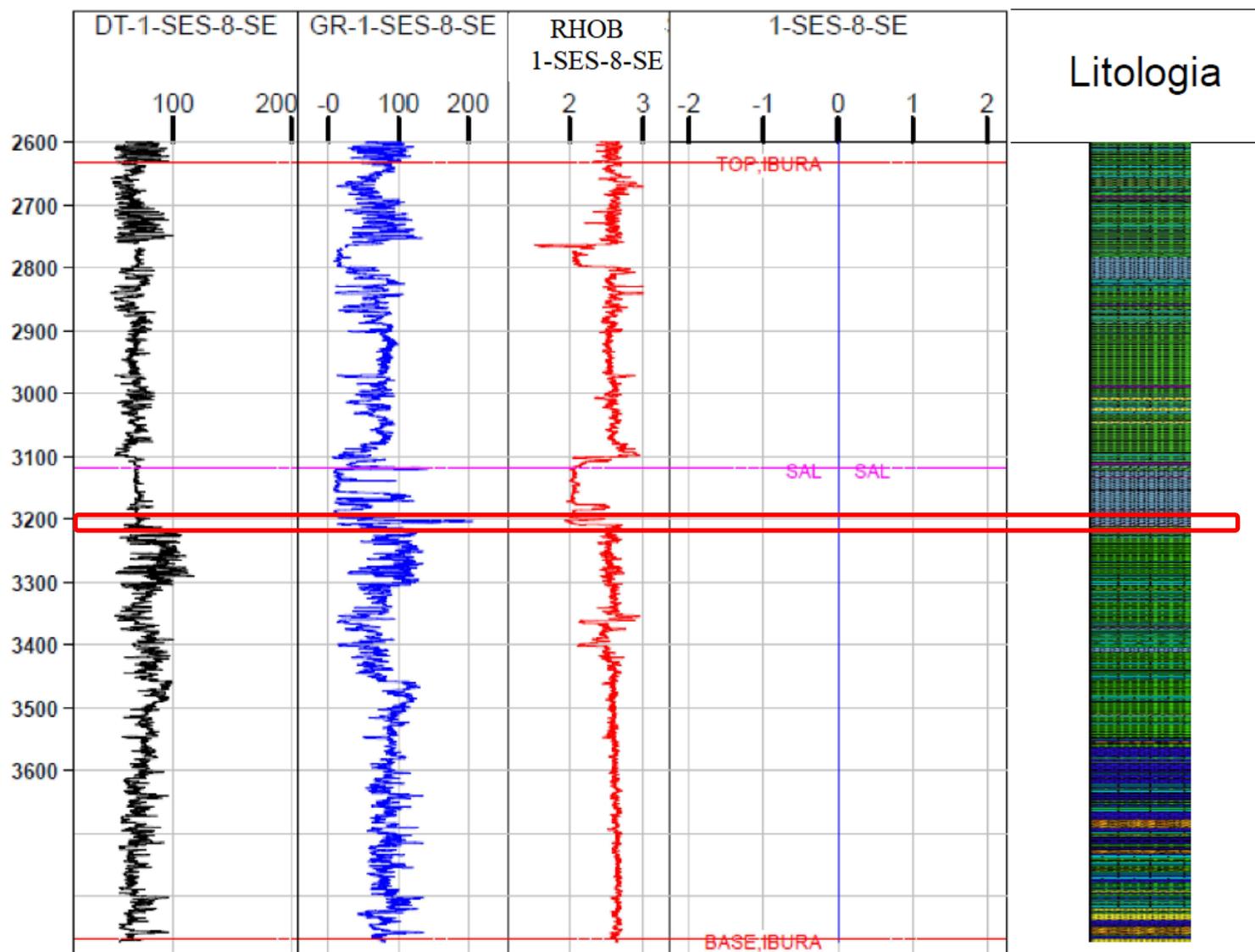


Figura 5. 4 Esquemático perfilagem do poço 1-SES-8-SE, mostrando o comportamento das curvas sônica (DT), gamma ray (GR) e densidade (RHOB) na presença de corpos de sais de potássio. Fonte: autoria própria (2020)

Com os horizontes criados, esses foram exportados para o software Micromine (2020) onde foi iniciada a modelagem geológica do corpo e posteriormente estimou-se o volume de mineral existente, somente a nível exploratório inicial, ou seja, realizando abstrações necessárias.

As figuras 5.5 e 5.6 ilustram o modelo geológico gerado com o auxílio do software Micromine:

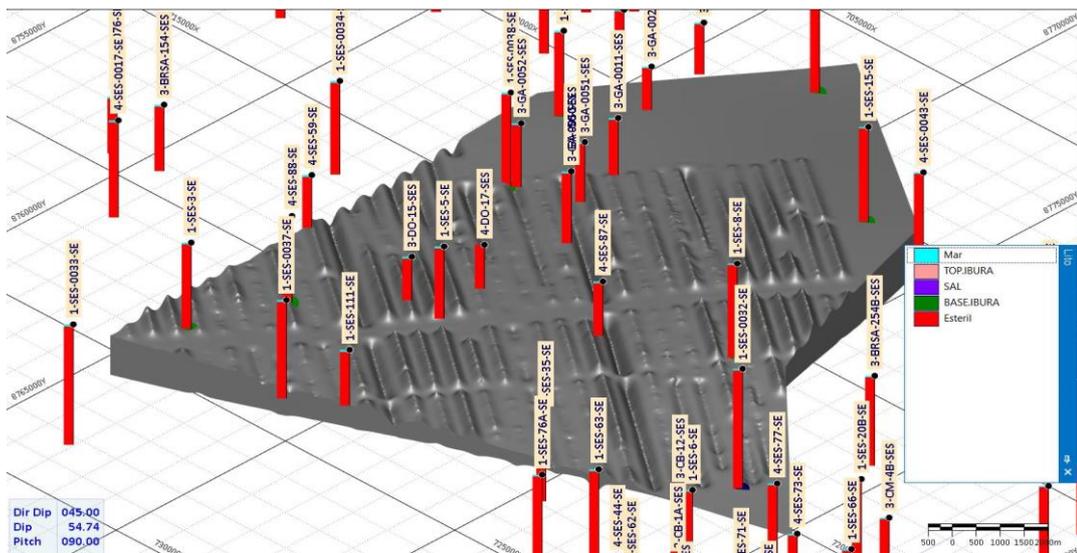


Figura 5.5 Modelo geológico do Membro Ibura com litologia cortada pelos poços (Vista 45° SW). Fonte: (Micromine, 2020)

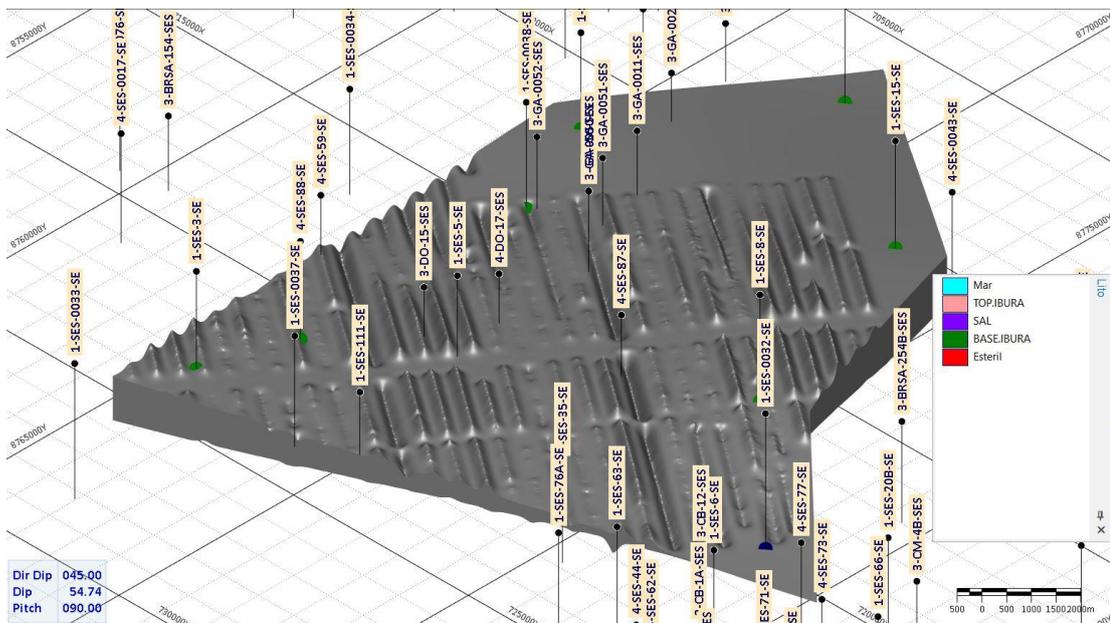


Figura 5.6 Modelo geológico do Membro Ibura (Vista 45° SW). Fonte: (Micromine, 2020)

Percebe-se pelas figuras 5.5 e 5.6 a disposição em estratos das camadas do Membro Ibura (halita + sais de potássio + intercalações de sedimentos) praticamente horizontalizada, com a ocorrência de alguns domos, que provavelmente foram formados a partir de falhas que cortaram o estrato salino e como o sal tem um comportamento viscoplástico este migrou através desta descontinuidade gerando domos.

Nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9 são apresentadas algumas seções do corpo geológico.

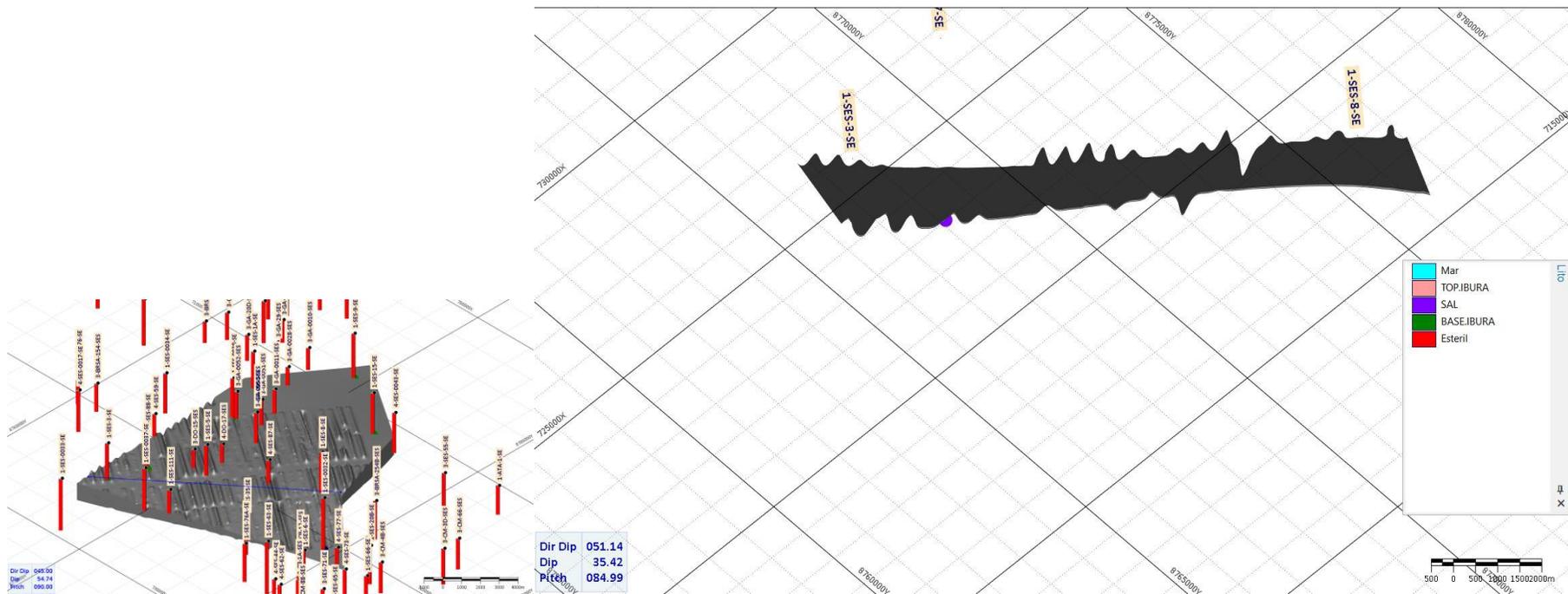


Figura 5.7 Seção do Modelo geológico cortando os poços 1-SES-3-SE e 1-SES-8-SE (Linha azul representa o corte da seção). Fonte: (Micromine, 2020)

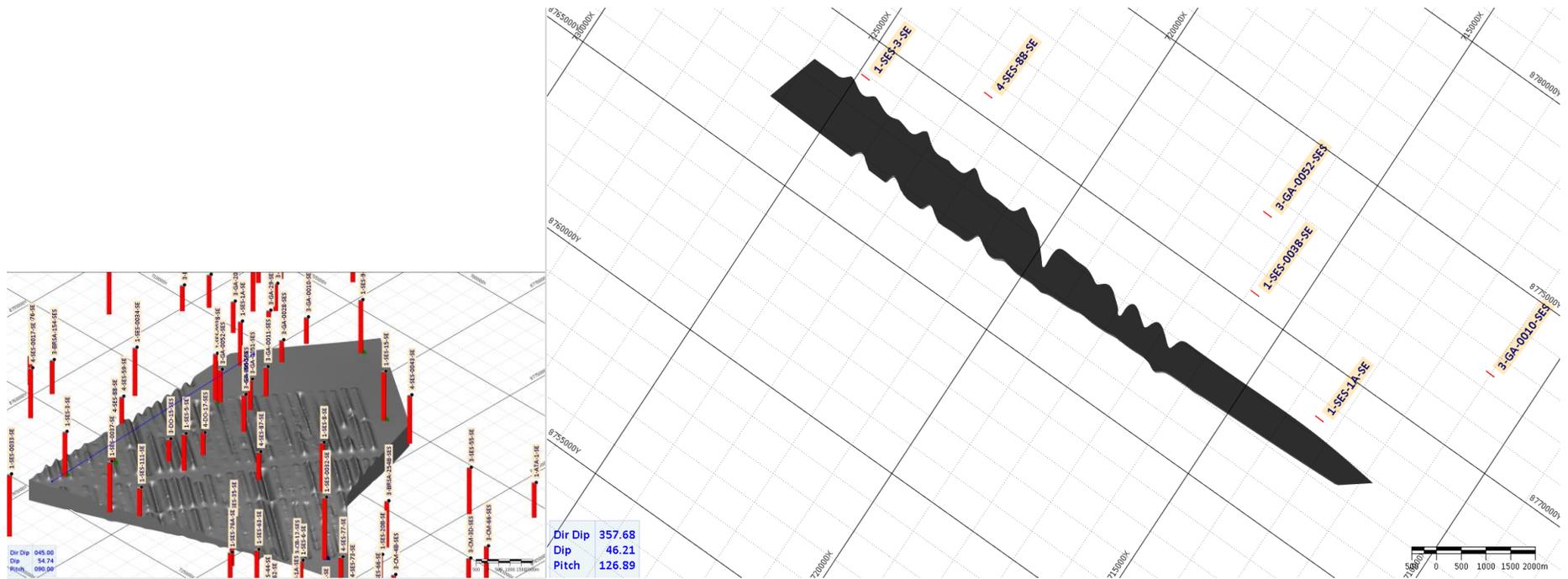


Figura 5. 8 Seção do Modelo geológico cortando os poços 1-SES-3-SE e 1-SES-1A-SE (Linha azul representa o corte da seção). Fonte: (Micromine, 2020)



Figura 5.9 Seção do Modelo geológico cortando os poços 1-SES-1A-SE e 1-SES-8-SE (Linha azul representa o corte da seção). Fonte: (Micromine, 2020)

A Tabela 5.1 mostra os dados gerais, número de furos de sondagem, comprimento total perfurado e comprimento médio perfurado.

Tabela 5. 1 Informações gerais do furo.

Informações dos furos	
Nº total de furos	66
Comprimento total perfurado (m)	157.262,7
Profundidade media dos furos (m)	2.382,8

Fonte: Nader (2021).

A Tabela 5.2 mostra as informações sobre o nível do mar e a profundidade da boca do furo a partir do nível do mar e do leito rochoso.

Tabela 5. 2 Informações gerais a partir do nível do mar.

	Profundidade do mar	Profundidade do furo desde o o leito rochoso	Profundidade do furo desde o nível do mar
Profundidade mínima (m)	9	991,8	1013,8
Profundidade máxima (m)	38	4258	4270
Profundidade média (m)	22,6	2364,98	2382,77

Fonte: Nader (2021).

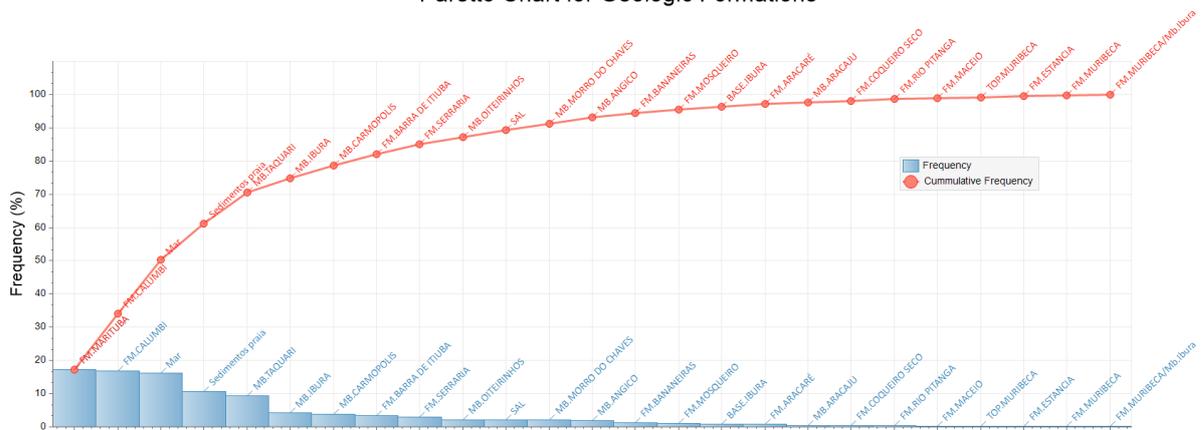
Tabela 5. 3 Distribuição de frequência de ocorrência por Unidade Geológica.

Formação geológica	Frequência (%)	Frequência acumulada (%)
FM.MARITUBA	17.3	17.3
FM.CALUMBI	16.8	34.1
Mar	16.3	50.4
Sedimentos praia	10.8	61.2
MB.TAQUARI	9.4	70.6
MB.IBURA	4.2	74.8
MB.CARMOPOLIS	3.9	78.7
FM.BARRA DE ITIUBA	3.4	82.2
FM.SERRARIA	2.9	85.0
MB.OITEIRINHOS	2.1	87.1
SAL	2.1	89.2
MB.MORRO DO CHAVES	2.1	91.3

MB.ANGICO	1.8	93.2
FM.BANANEIRAS	1.3	94.5
FM.MOSQUEIRO	1.0	95.5
BASE.IBURA	0.8	96.3
FM.ARACARÉ	0.8	97.1
MB.ARACAJU	0.5	97.6
FM.COQUEIRO SECO	0.5	98.2
FM.RIO PITANGA	0.5	98.7
FM.MACEIO	0.3	99.0
TOP.MURIBECA	0.3	99.2
FM.ESTANCIA	0.3	99.5
FM.MURIBECA	0.3	99.7
FM.MURIBECA/Mb.Ibura	0.3	100.0

Fonte: Nader (2021)

Pareto Chart for Geologic Formations



Geologic Formation

Gráfico 5.1 Diagrama de Pareto (frequência cumulativa de ocorrência por Formação / Unidades geológicas). Fonte: Nader (2021).

Tabela 5. 4 Caracterização de estéril e minério

Formação geológica	Reclassificação
Mar	Mar
Sal	Sal
Mb. Ibura	Mb. Ibura
Base. Ibura	Base Ibura
Fm. Marituba	Estéril
Fm. Calumbi	
Sendimentos de praia	
Mb. Taquari	
Mb. Carmópolis	
Fm. Barra de Itiuba	
Fm. Serraria	
Mb. Oiteirinhos	
Sal	
Mb. Morro do Chaves	
Mb. Angico	
Fm. Bananeiras	
Fm. Mosqueiro	
Fm. Aracaju	
Fm. Coqueiro Seco	
Fm. Rio Pitanga	
Fm. Maceio	
Fm. Estancia	

Fonte: Nader (2021)

A Figura 5.10 à esquerda mostra uma vista superior da localização dos furos usados nesta pesquisa, enquanto a direita mostra uma visão geral detalhada dos poços com litologias reclassificadas.

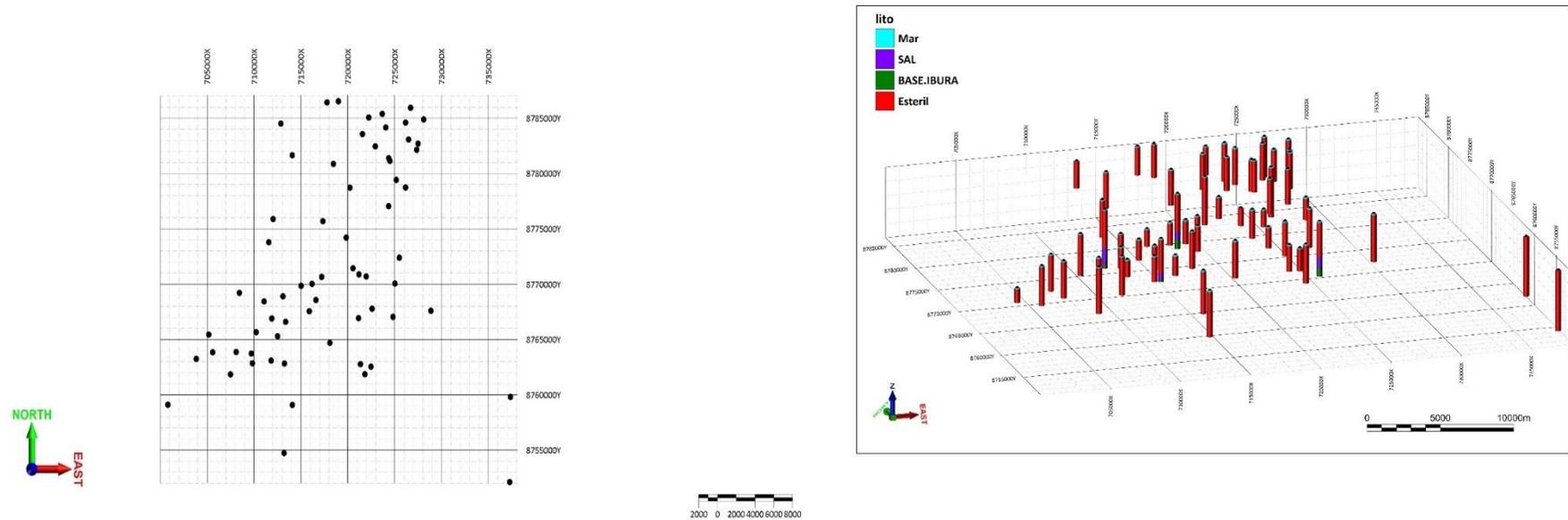


Figura 5. 10 Mapa de localização do poço. Fonte: Nader (2021)

Para a construção do modelo geológico, as linhas interpretadas da sísmica 3D foram importadas para o Micromine (2021), as quais foram processadas com o auxílio do software Kindgom. No Micromine, as linhas foram interpoladas utilizando o algoritmo de menor curvatura, conforme descrito em Birhanu (2014), considerando sua facilidade computacional, além disso, o algoritmo em si não é um algoritmo exato, mas possui uma boa

representação da tendência estrutural comprovada por geofísica. O uso do algoritmo permitiu que a potência da camada fosse honrada no modelo geológico. Os produtos gerados foram o topo e a base do Membro Ibura, conforme ilustrado nas Figuras 5.11 e 5.12.

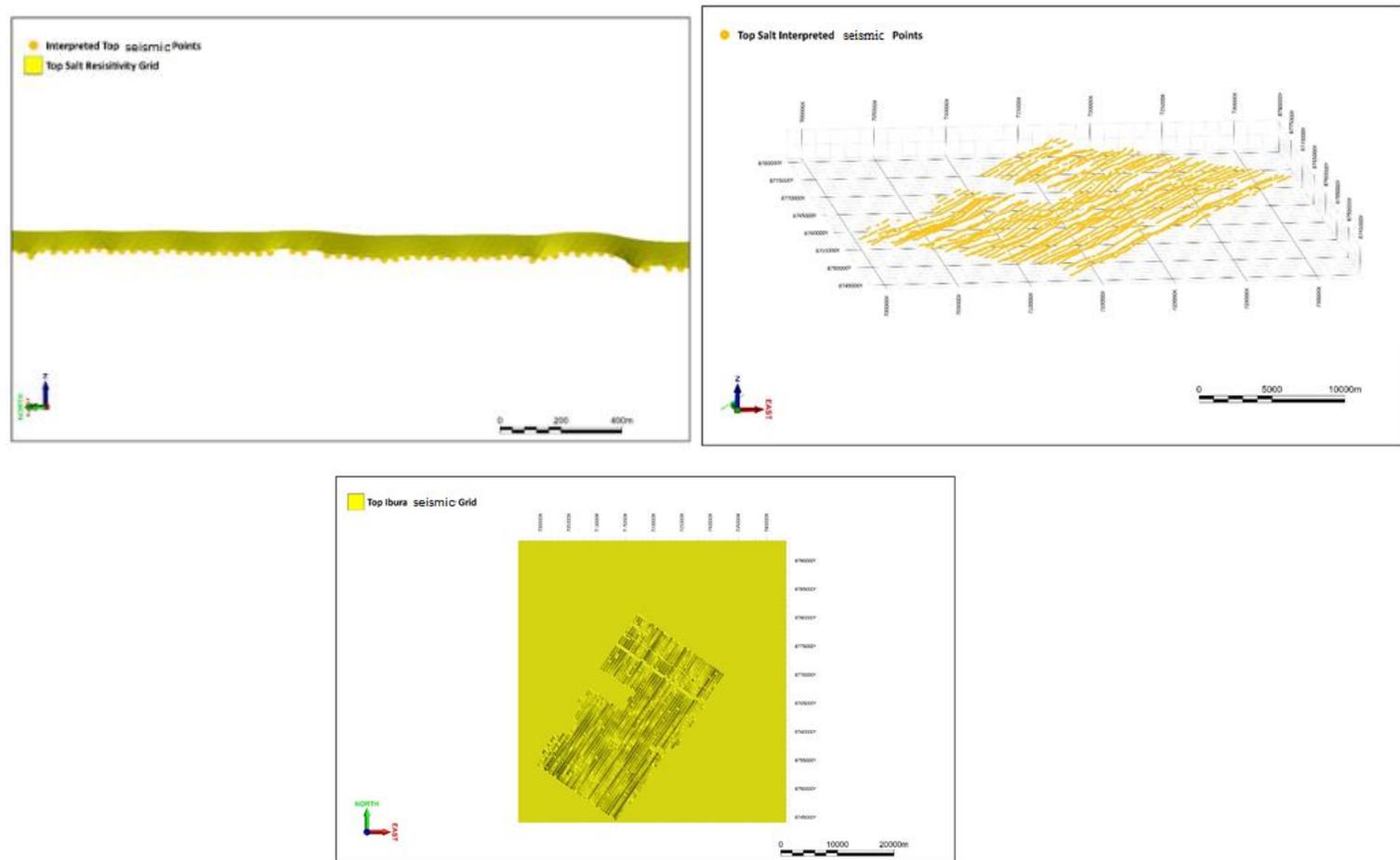


Figura 5. 11 Grid sísmica do topo do Membro Ibura. Fonte: Nader (2021).

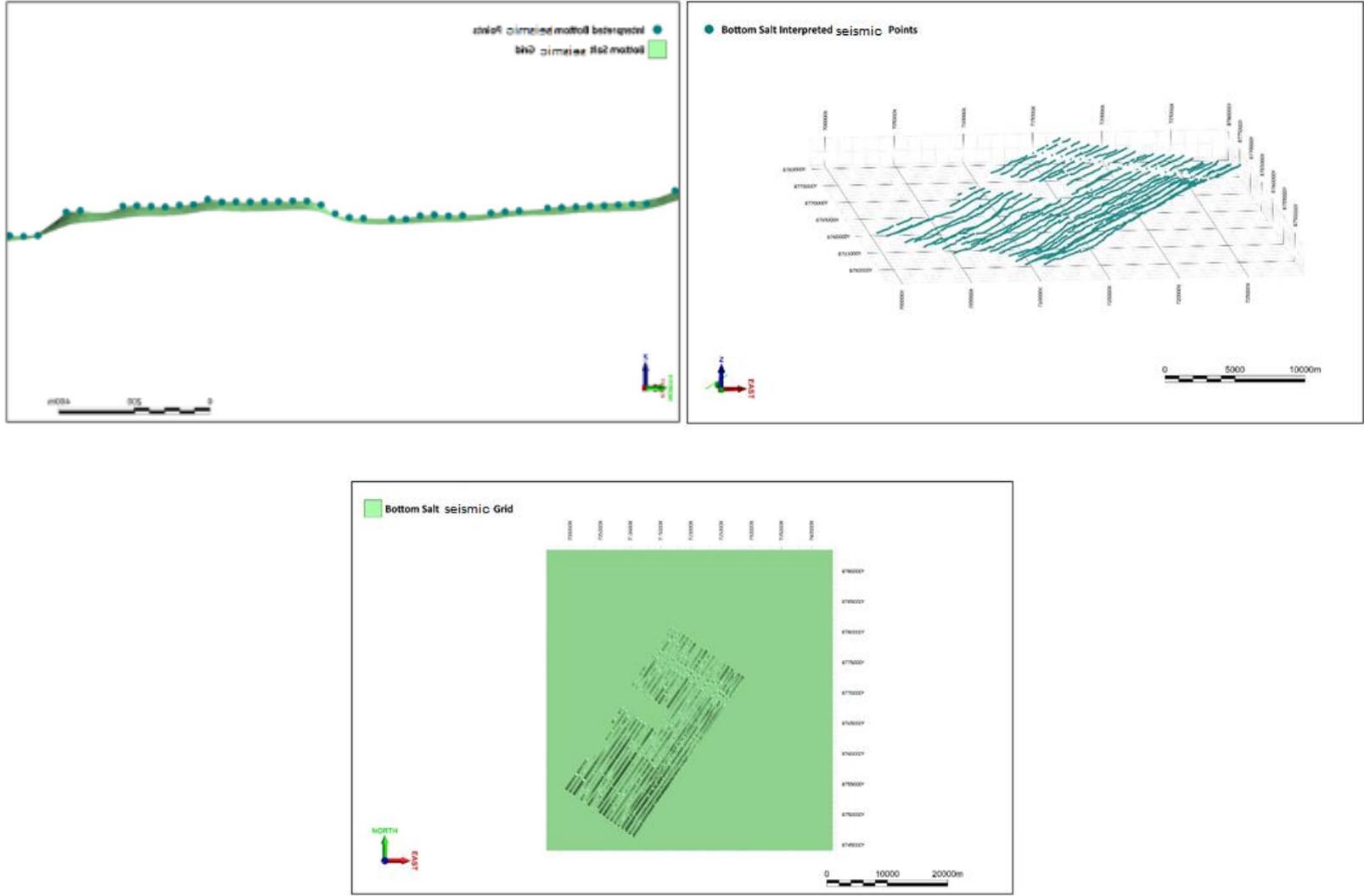


Figura 5. 12 Membro Ibura interpretado da sísmica. Fonte: Nader (2021).

A Figura 5.13 ilustra os pontos de controle usados para criar a superfície de topo da camada, uma vez que a maioria dos poços não cortou o Membro Ibura, que é onde ocorre a anomalia do sal de potássio.

$$D_T = Z_S - Z_P$$

D_T = distância até o topo em metros;

Z_S = Coordenada Z do ponto rebatido na superfície de topo;

Z_P = coordenada Z real do ponto.

Com os dados de D_T , foi criada uma superfície usando um algoritmo de interpolação exato, neste caso a *thin plate*, que usa funções multi-quadradas para interpolar uma superfície que, além de respeitar as informações de entrada, gera uma superfície suavizada. As superfícies topo e base foram criadas por meio de operações entre as superfícies, neste caso, uma operação de subtração entre o grid de sísmica e o grid D_T . Para cada célula interpolada no grid, as posições x e y de ambas as superfícies (grid de sísmica e distancia interpolada) coincidem, sendo a única diferença em Z.

$$Z_R = Z_S - Z_T$$

Z_R = coordenada Z de topo ou base resultante;

Z_S = coordenada Z do grid de sísmica;

Z_T = coordenada Z do grid de distância;

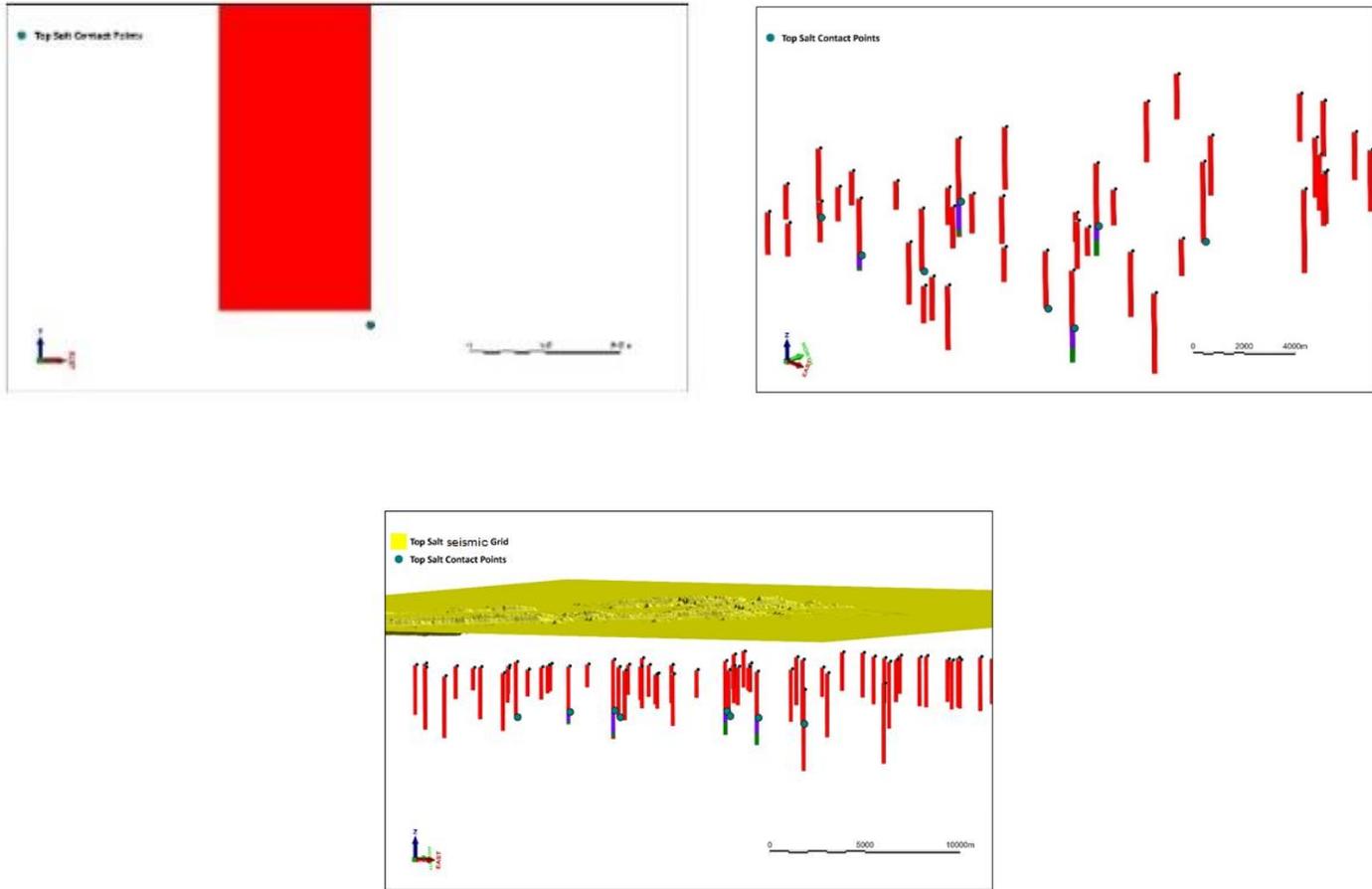


Figura 5. 13 Pontos de controle do sal. Fonte: Nader (2021).

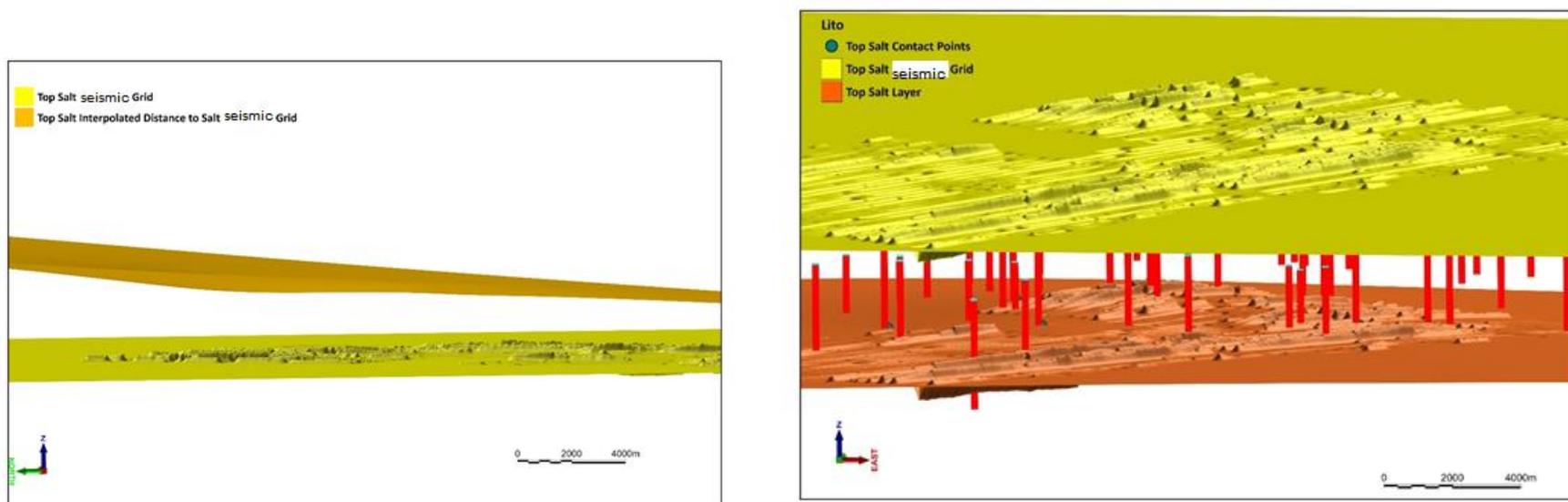


Figura 5. 14 Topo de sísmica interpretado e topo da camada salina. Fonte: Nader (2021).

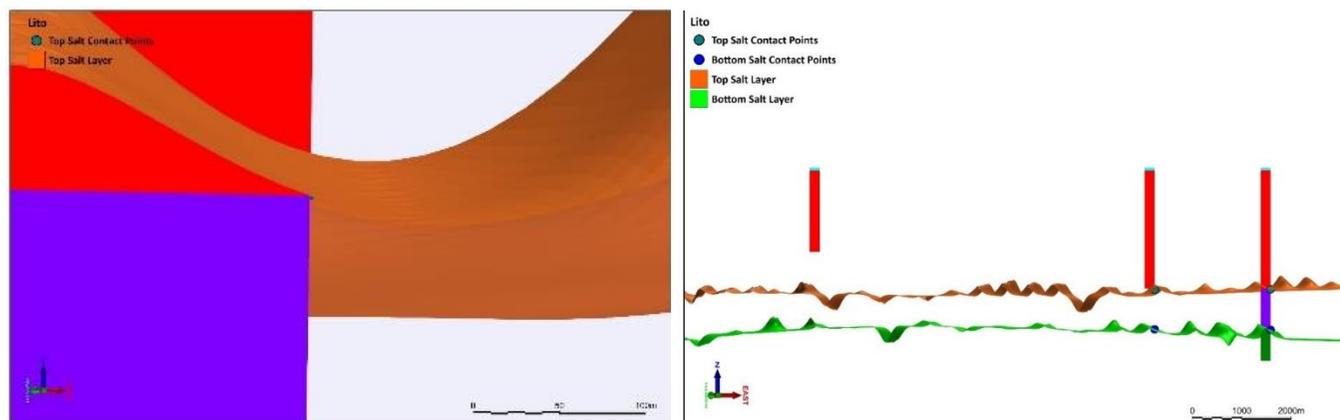


Figura 5. 15 Linha de interpretação sísmica, topo e base do contato de sal. Fonte: Nader (2021).

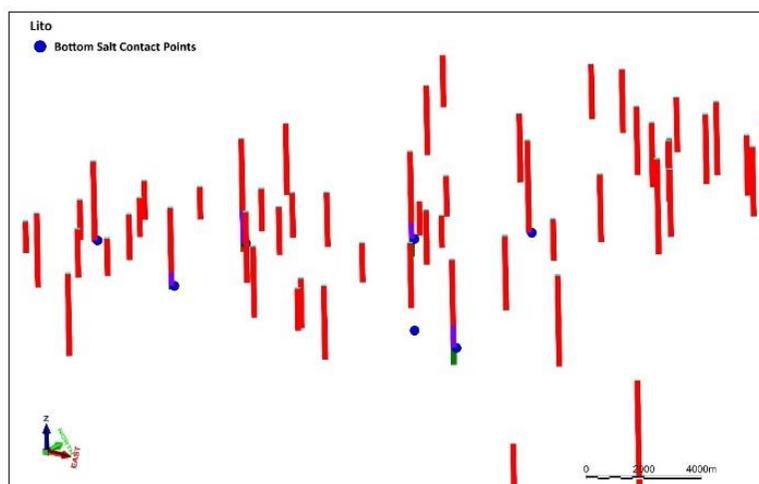


Figura 5. 16 Pontos de controle da base do sal. Fonte: Nader (2021).

Se a diferença entre o Z superior e o Z inferior for maior ou igual a 5 m, então o Z original da base permanece. Caso contrário, para cada célula base joga-se o Z igual ao Z superior e subtraio 5 metros. Isso garante que a parte superior e inferior não se sobreponha e que a espessura mínima entre a parte superior e inferior do Membro Ibura seja de 5 m.

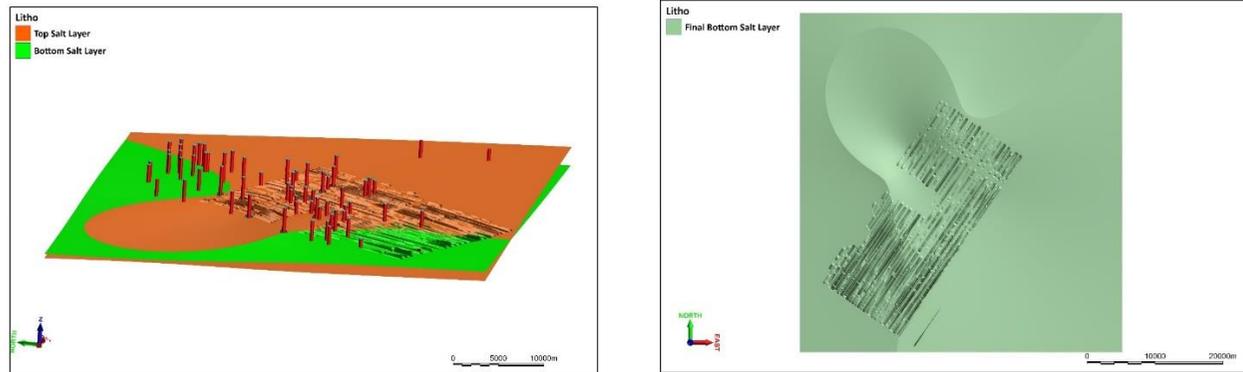


Figura 5. 17 Horizonte final da base do sal criado. Fonte: Nader (2021).

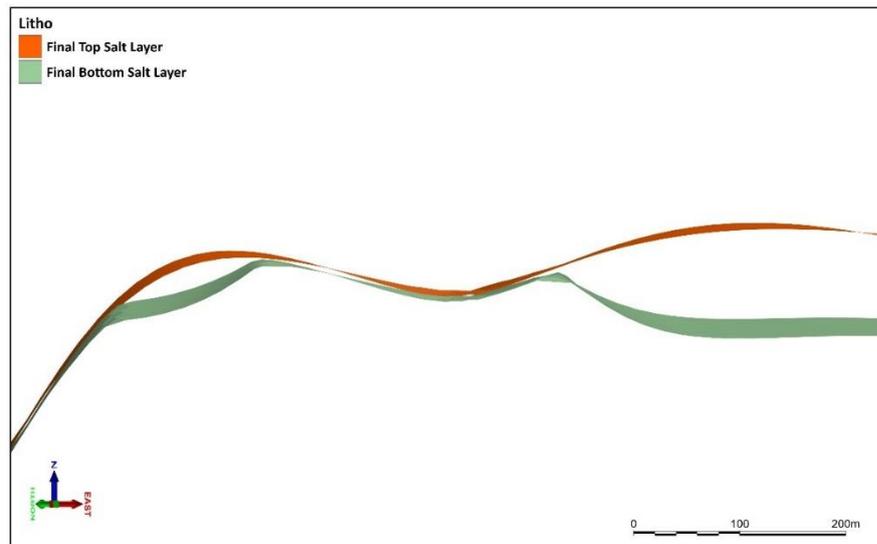


Figura 5. 18 Perfis de topo e base do sal gerado. Fonte: Nader (2021).

Com os horizontes superior e inferior do Membro Ibura criados, o alcance máximo da anomalia foi definido com base nos poços que interceptam o Membro Ibura, linha azul clara na Figura 5.19. Estabelecido a extensão, foi criado um sólido entre a parte superior e inferior do Membro Ibura e foi estimado o volume de material rochoso presente no Membro. Este volume foi utilizado abaixo para estimar o volume de sal de potássio presente no Membro, conforme premissas que serão discutidas no referido item deste trabalho.

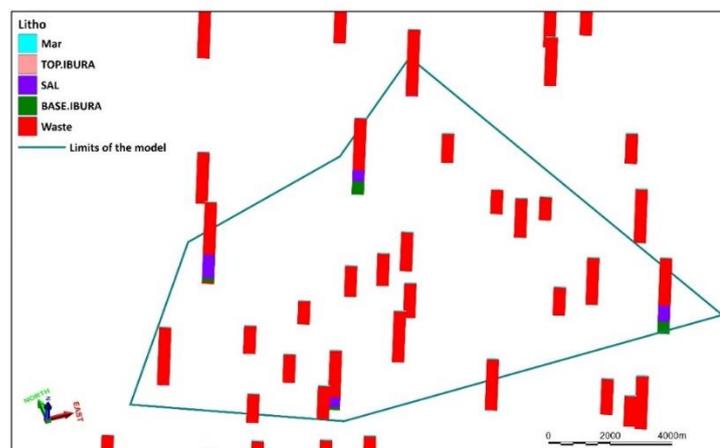


Figura 5. 19 Linha azul representando o limite do modelo para estimativa de recursos. Fonte: Nader (2021).

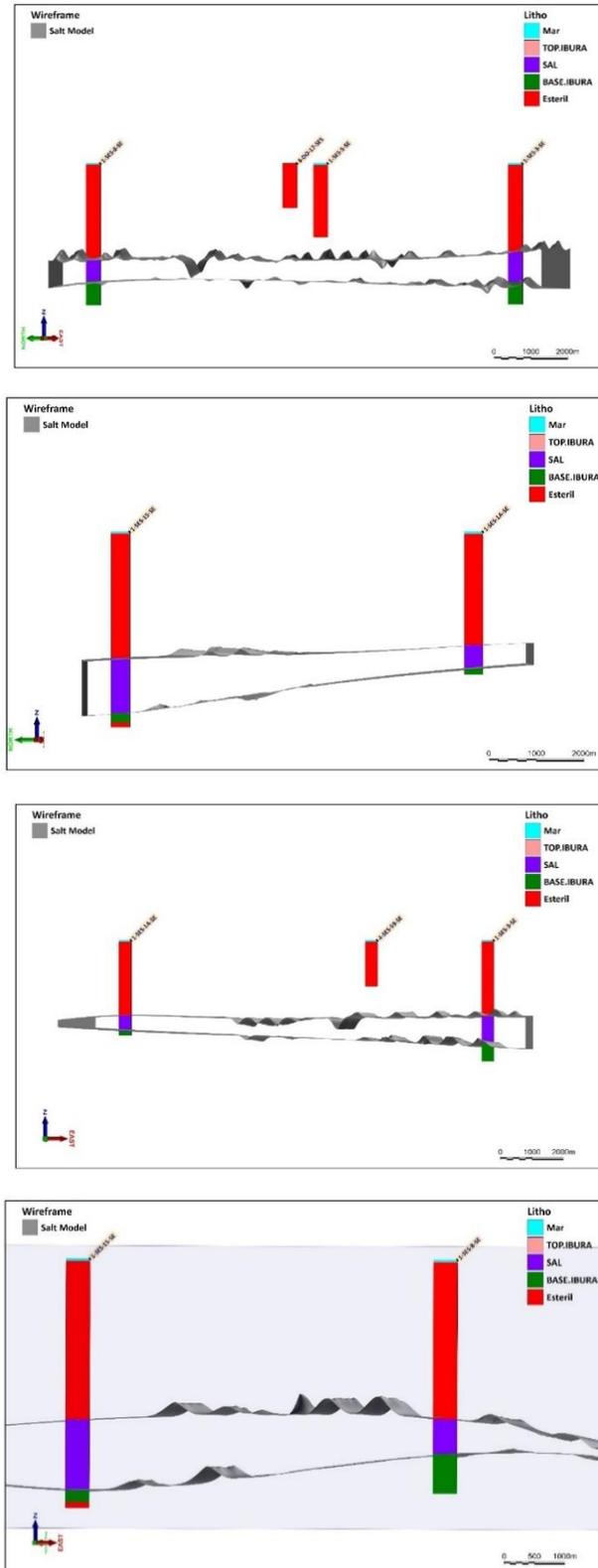


Figura 5. 20 As seções de perfil do modelo mostram que a parte superior e a inferior respeitam os contatos. Fonte: Nader (2021).

A tabela 5.5 ilustra os reportes de material (estéril + minério + ganga) presente no Membro Ibura, o volume total do Membro Ibura é 100.018.165.754 m³.

Tabela 5.5 Reporte Micromine, volume Membro Ibura

Estrato	Volume (m³)
Membro Ibura	100018165755
Sal de potássio (silvinita ou carnalita)	1913221088
Ganga (sedimentos argilo-arenosos + halita)	815274474
Estrato	Massa (Mt)
Sal de potássio (silvinita ou carnalita)	3711,648911
Ganga (sedimentos argilo-arenosos + halita)	1769,145608

Fonte: (Micromine, 2020)

Por se tratar de dados de exploração de poços de petróleo e gás, não existe dados de teores mineralógicos ou elementares. Porém, têm-se as seguintes informações: potências das camadas de sais de potássio (silvinita e carnalita) e densidade do sal nesta zona da anomalia. Para uma primeira aproximação do volume e tonelagem de minério *in-situ*, sem a pretensão de utilizar este valor em nenhum tipo de declaração de recursos e reservas, como JORC ou NI-43-101, visto que, tais dados carecem de maior rigor científico, sendo necessário pesquisas adicionais para sua correta apreciação. Realizou-se as seguintes abstrações:

- Fez-se um cálculo da porcentagem total do volume do estrato salino correspondente à fração de sais de potássio (aqui não se realizou diferenciação entre silvinita e carnalita), para tanto, dividiu-se o somatório das potências dos corpos de sais de potássio pela potência total do estrato salino descrita no perfil composto dos 3 poços (1-SES-1A-SE, 1-SES-3-SE e 1-SES-8-SE) que cortaram sais de potássio. A tabela 5.6 expõe os resultados encontrados, percebe-se que 97,27% desse volume não corresponde a sal de potássio:

Tabela 5.6 Cálculo da fração volumétrica em % de sais de potássio no estrato salino

Poço	Somatório das potências dos corpos de sais de potássio (m)	Potência total do estrato salino (m)	% da fração volumétrica de sais de potássio no estrato salino	Observação
1-SES-1A-SE	10	470	2,128%	Puramente Silvinita
1-SES-3-SE	31	790	3,924%	1,27% Silvinita + 2,66% Carnalita
1-SES-8-SE	16	750,5	2,132%	Puramente Silvinita
		Média	2,728%	
		Desvio padrão	1,036%	

Fonte: elaborado pelo autor com base nos perfis compostos dos poços.

- Construiu-se uma inferência dos teores dos corpos de silvinita e carnalita com base na densidade determinada pelo perfil RHOB dos poços (1-SES-1A-SE, 1-SES-3-SE e 1-SES-8-SE) ilustrados nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4. Para tanto, utilizou-se as densidades da tabela 3.2 como densidades ideais, ou seja, um sal puro de halita teria densidade de 2,17 g/cm³, um sal puro de Silvita tem densidade média de 1,998 g/cm³. No perfil composto foi descrito silvinita, que é uma mistura de Halita + Silvita, logo a densidade média do perfil RHOB deve ser algo entre 1,998 g/cm³ e 2,170 g/cm³. Já a densidade de um sal puro de carnalita é de 1,57 g/cm³;
- Assim, realizando a abstração que a principal impureza (mineral de ganga) que estará associado aos sais de potássio é halita, dado a sua solubilidade parecida aos sais de potássio, com base na densidade média encontrada nos perfis RHOB, somente das zonas de ocorrências de sais de potássio, pode-se estimar o teor do sal de potássio no corpo da seguinte forma: se a densidade média do perfil RHOB da zona onde foi descrito o sal de potássio for 1,998 g/cm³ e o sal descrito for silvinita, poder-se inferir que o corpo contém 100% de silvita, se a densidade média for 2,015 g/cm³ pelo perfil RHOB, o corpo deve ter algo em torno de 50% de silvita e 50% halita, posto que, a densidade média da mistura em partes iguais teria uma densidade em torno deste valor. A tabela 5.7 descreve os teores encontrados segundo a metodologia citada:

Tabela 5. 7 Teor médio ponderado do sal de potássio.

Poço	Minério descrito	Profundidade (m)		Densidade laboratório (g/cm ³)	Densidade perfil RHOB (g/cm ³)	Sal de potássio teor %
1-SES-1A-SE	Silvinita	2573,7	2583,7	1,988	2,000	93,41%
1-SES-3-SE	Silvinita	2442	2444	1,988	2,040	71,43%
1-SES-3-SE	Silvinita	2450	2452	1,988	2,040	71,43%
1-SES-3-SE	Silvinita	2457	2458	1,988	2,040	71,43%
1-SES-3-SE	Carnalita	2480	2489	1,570	1,750	70,00%
1-SES-3-SE	Silvinita	2504	2506	1,988	2,100	38,46%
1-SES-3-SE	Silvinita	2511	2513	1,988	2,110	32,97%
1-SES-3-SE	Carnalita	3075	3083	1,570	1,750	70,00%
1-SES-3-SE	Carnalita	3177	3181	1,570	1,850	53,33%
1-SES-3-SE	Silvinita	3231	3232	1,988	2,100	38,46%
1-SES-8-SE	Silvinita	3118,5	3121,5	1,988	2,120	27,47%
1-SES-8-SE	Silvinita	3138,5	3139,5	1,988	2,100	38,46%
1-SES-8-SE	Silvinita	3170,5	3172,5	1,988	2,050	65,93%
1-SES-8-SE	Silvinita	3194,5	3198,5	1,988	2,030	76,92%
1-SES-8-SE	Silvinita	3201,5	3207,5	1,988	2,000	93,41%
Teor médio ponderado pela potência da camada de sal de potássio						70,12%
Moda						71,43%
Densidade ponderada pela potência g/cm ³						1,94

Fonte: autoria própria (2020)

Percebe-se pela tabela 5.7 que o teor médio de sais de potássio ponderado pela potência dos estratos é de 70,12% e que o teor em termos de moda é de 71,43% (aqui usaremos o valor médio, tendo em vista a proximidade da moda e da média e pelo fato que a média é um pouco mais conservadora), ou seja, em cada corpo descrito como sal de potássio (silvinita ou

carnalita), segundo a metodologia descrita anteriormente, existe 70,12% de sal de potássio e 29,88% de halita ou outras impurezas. Logo, para uma cubicagem inicial de recursos, somente à nível de estimativa, aplicara-se o fator de fração volumétrico descrito na tabela 5.6 igual à 2,728% e o teor médio de sal de potássio de 70,12% para se estimar o volume de recursos de sais de potássio. A fórmula utilizada é a seguinte:

$$V_{potássio} = V_{total\ sal} * 2,728\% * 70,12\%$$

Onde:

$V_{potássio}$: é o volume em m³ de potássio do corpo mineral;

V_{total} : é o volume total do estrato que se chamou de Membro Ibura exportado do Micromine (100.018.165.754 m³);

Logo o volume total obtido foi de 1.913.221.088 m³, considerando que a densidade média do corpo mineral ponderado pela potência de cada corpo é de 1,94 g/cm³ ou 1,94 t/m³, têm-se 3.711.648.911 t ou 3.711,65 Mt de sal de potássio no corpo. A quantidade total de mineral de ganga, majoritariamente halita que será lavrada juntamente com o minério corresponde à 815.274.474 m³ ou 1.769.145.608 t ou 1769,14 Mt.

5.2 Layout de lavra

Tendo como princípios as características geomecânicas já discutidas no capítulo 3 para rochas evaporíticas, sendo a mais importante o comportamento de fluência que induz uma resposta viscoplástica quando o material é submetido a uma alteração no estado de tensões, as figuras 5.21 e 5.22 ilustram layouts possíveis de lavra construídos com o auxílio do software AutoCad (2020).

Tais layouts foram construídos tomando-se como premissa uma área quadrada de 1 km², logo foram comparados na mesma base, em termos de recuperação e número de furos totais, variando-se somente a distância entre os furos.

Vale lembrar que, conforme discutido no item 3.2.2, o diâmetro limite da cavidade oriunda da lavra por dissolução, segundo Bartlett (2007), é de 150 m, logo para o layout cilíndrico esse foi o diâmetro utilizado, já para o elíptico o diâmetro menor foi de 150 m, já o maior por se tratar de um furo horizontalizado essa distância depende unicamente do comprimento da área que deseja-se canhonear respeitando premissas geomecânicas visando a estabilidade da escavação, assim neste estudo considerou-se o diâmetro maior igual a 300 m que é o dobro do menor. Nessa estimativa variou-se o tamanho dos pilares aleatoriamente, haja

vista que o modelamento requer o software FLAC 3D, porém a subsidiência se existir vai ser pequena em função da coluna de rocha sobrejacente à escavação de 2500 a 3000 m.

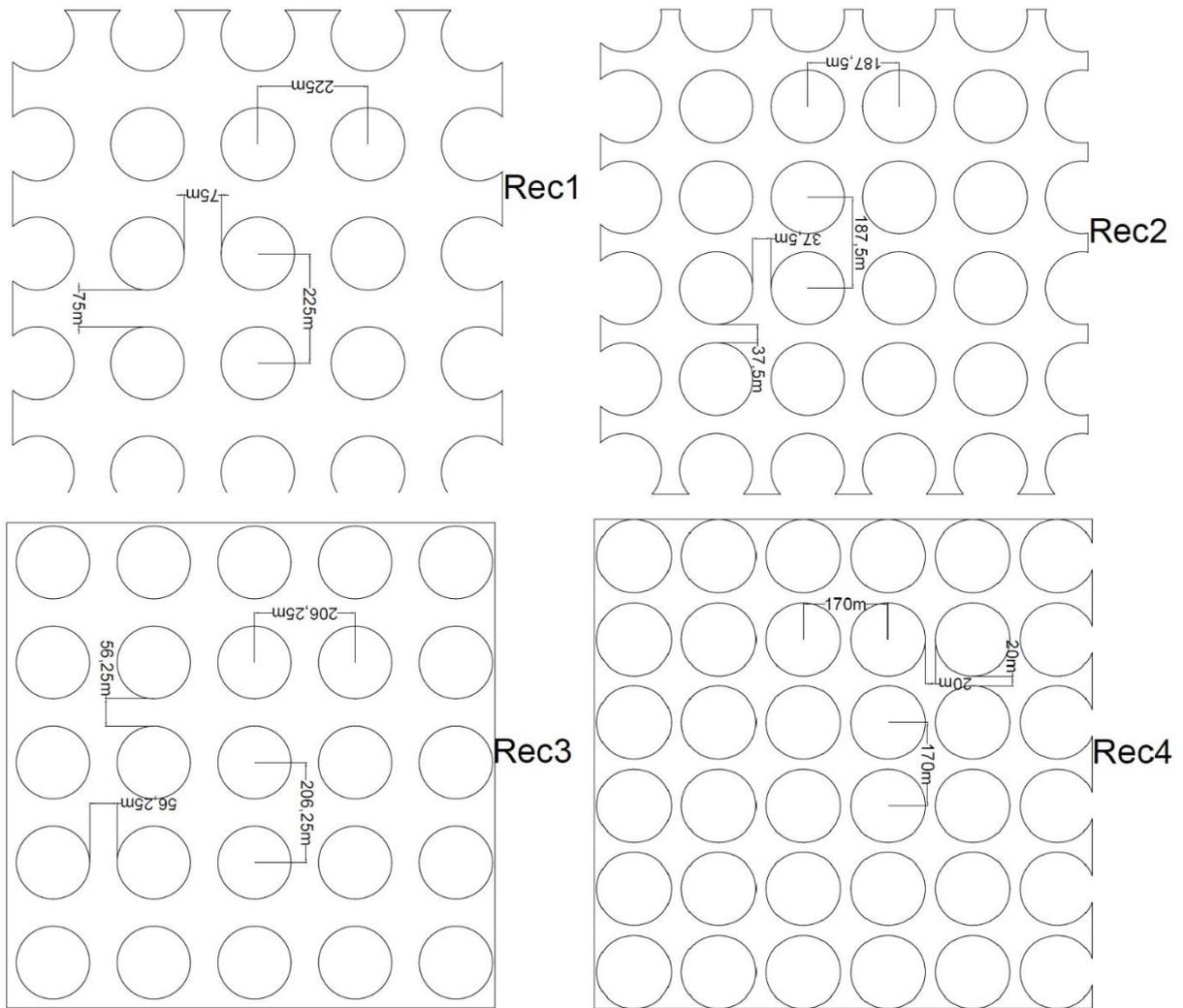


Figura 5. 21 Layouts de lavra, realce cilíndrico. Modelo obtido variando-se a distância entre os realces, ou seja, o tamanho do pilar. Rec 1 distância entre realce de 75 m, Rec 2 distância entre realces de 37,5 m, Rec 3 distância entre realces de 56,25 m e Rec 4 distância entre realces de 20 m. Lembrando que os furos foram feitos todos em uma área de 1 km². Fonte: AutoCad (2020).

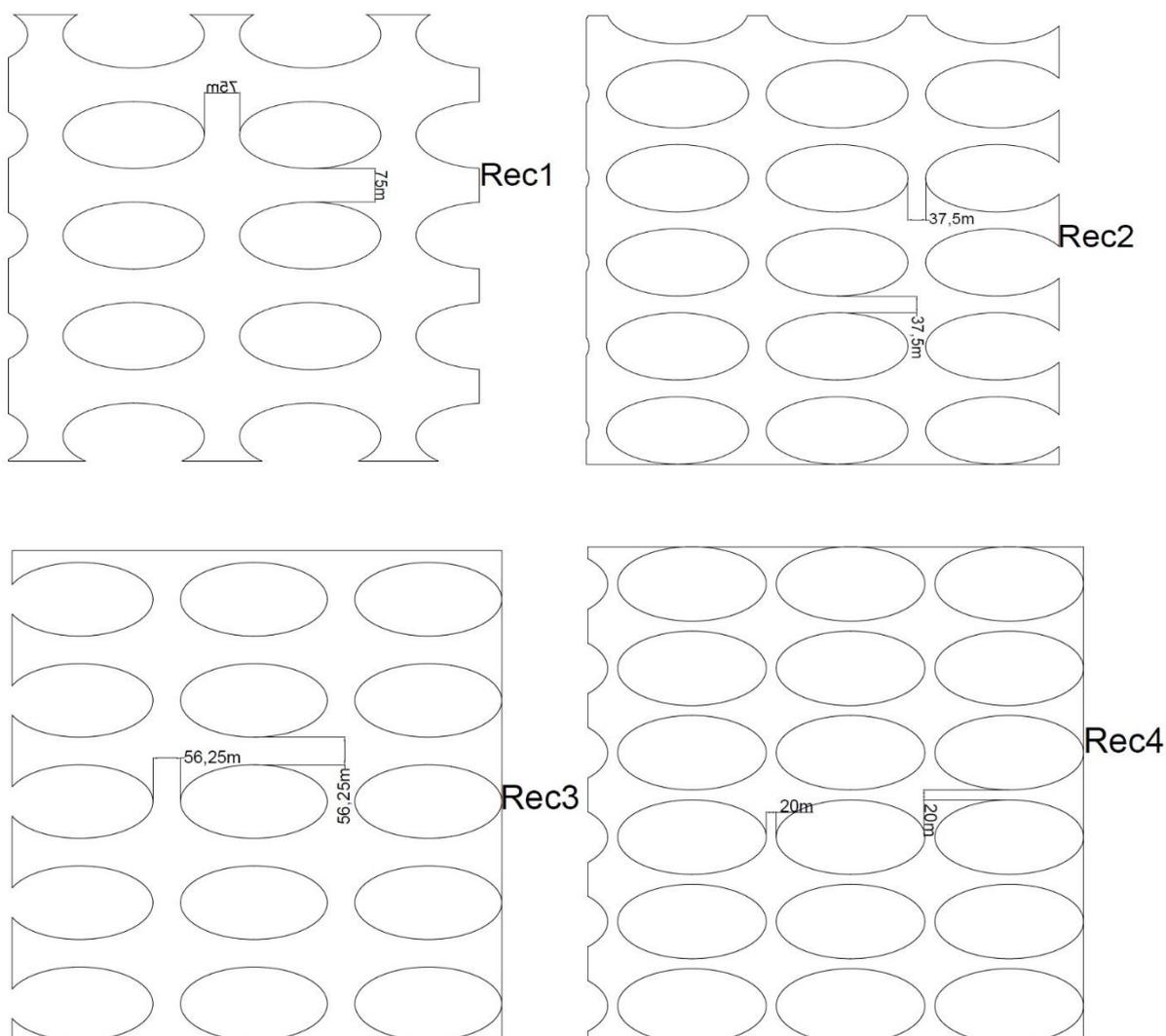


Figura 5. 22 Layouts de lavra, realce elíptico. Modelo obtido variando-se a distância entre os realces, ou seja, o tamanho do pilar. Rec 1 distância entre realce de 75 m, Rec 2 distância entre realces de 37,5 m, Rec 3 distância entre realces de 56,25 m e Rec 4 distância entre realces de 20 m. Lembrando que os furos foram feitos todos em uma área de 1 km². Fonte: AutoCad (2020).

Com os resultados obtidos montou-se o gráfico 5.2. A recuperação volumétrica média para o layout cilíndrico foi de 50,33% e de 54,36% para o layout elíptico, percebe-se que são valores alto de recuperação, sobretudo, se comparado ao método de câmaras e pilares que também é largamente utilizado na exploração de sais de potássio, para a melhor definição do valor de recuperação estudos adicionais de geomecânica devem ser realizado com o auxílio do FLAC 3D.. Há de se considerar que para se construir o layout elíptico pressupõe-se o uso de perfuração direcional por maiores trechos, o que encarece muito o projeto e o ganho de recuperação médio de 4,03% não pagaria esse incremento de custo. A diluição é controlada fazendo-se uso do *blanket fluid* (nível de fluido/óleo) e pelo controle do teor médio da salmoura,

com isso o método é bastante seletivo e dada a ausência de dados na literatura ira-se assumir praticamente desprezível essa diluição.

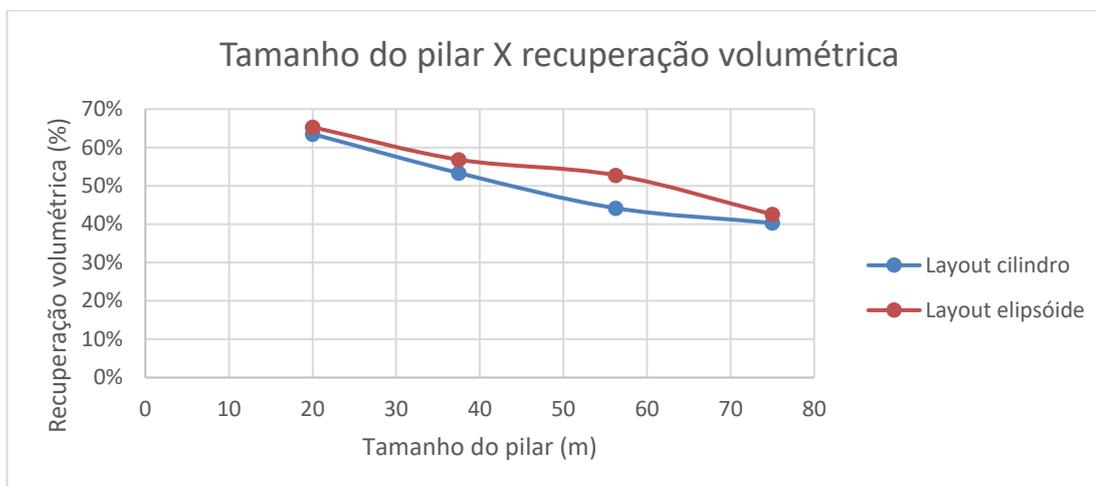


Gráfico 5. 2 Tamanho do pilar X recuperação volumétrica. Fonte: autoria própria (2020)

Considerando-se ainda a curva de solubilidade do cloreto de potássio em função da temperatura, ilustrada na Figura 5.23, percebe-se que a solubilidade do sal de potássio em água cresce com o aumento da temperatura, portanto, testes adicionais devem ser realizados no sentido de se estudar o ganho de recuperação mássica com o incremento da temperatura e se esse ganho de recuperação, compensa o aumento do custo operacional devido ao gasto energético para se aquecer a água.

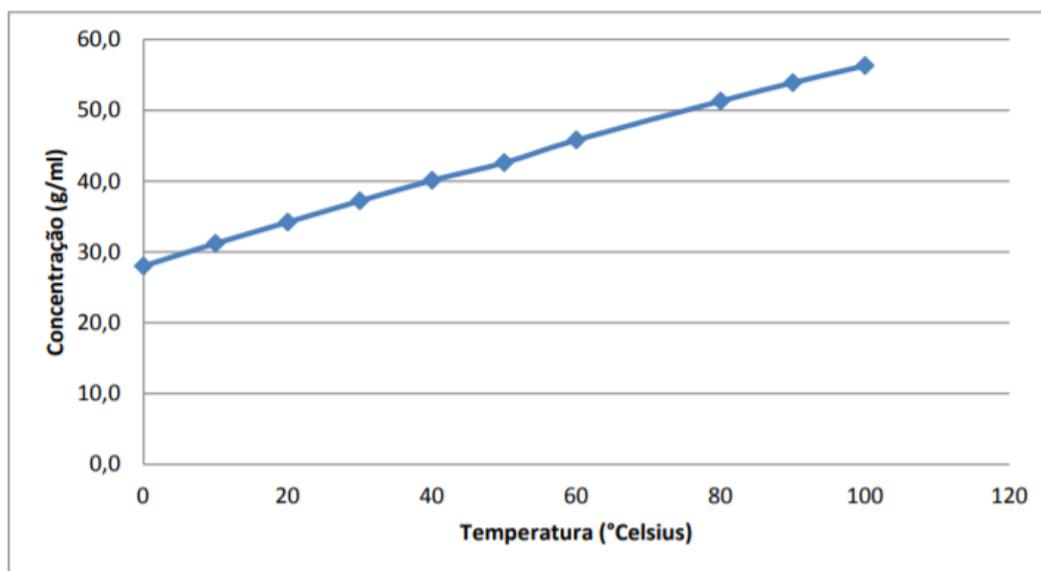


Figura 5. 23 Curva de solubilidade do cloreto de potássio (KCl). Fonte: IUPAC (2020).

Vale lembrar que a água de mar não está saturada em sal de potássio, portanto, como este estudo situa-se num ambiente *offshore* não há disponibilidade de água doce, assim, a água do mar deverá ser usada como uma fonte nova de solvente e como trata-se de um circuito fechado parte da água utilizada no processo irá recircular e a água do mar compensará as perdas (por evaporação, etc.).

Quanto às instalações de beneficiamento mineral um fato relevante a se considerar é a distância do centro da anomalia à costa igual à 20,09 km, ver Figura 5.24, estando muito cerca da capital Aracaju. Sendo assim, existem pelo menos três possibilidades de layout de construção das instalações de superfície, que são:

- Construção de uma usina de beneficiamento sobre uma plataforma fixa em alto mar, o concentrado salino seguiria para seu destino final em navio que atracaria na plataforma.
- Construção de uma mini plataforma fixa, com espaço somente para se operar e perfurar novos poços desde esta plataforma, poderia também se realizar uma concentração prévia (grosseira) do minério separando a fração sólida (sedimentos: areia, silte, argila, etc) da fração solúvel;
- Construção de todas as instalações de superfície e beneficiamento em terra, sendo a salmoura bombeada ao longo de 20,09 km até a costa Sergipana.



Figura 5. 24 Distância do centro da anomalia à costa sergipana. Fonte: Google (2020)

Com base na profundidade da ocorrência do corpo salino (de 2500 a 3200 m), na potência dos estratos de sal de potássio (de 0 a 10 m) e nas próprias propriedades de cura ou cicatrização do sal, que tende a fechar fraturas ou cavidades nele aberta, é razoável pressupor que a subsidência na superfície se existir será mínima.

Quanto ao CAPEX oriundo da perfuração dos poços, este será maior quanto menor foi o tamanho do pilar deixado, dado que, quanto menor o pilar mais furos terão que ser feito por m².

6. CONCLUSÕES

Findo este trabalho percebe-se que alguns trabalhos complementares devem ser feitos para se detalhar a viabilidade técnica da exploração de sais de potássio no ambiente marinho, por meio de lavra por dissolução, através de parcerias técnico-científica entre companhias petrolíferas e mineradoras, visando-se assim minimizar o risco e maximizar o retorno. Sobretudo no que concerne a parte de levantamento superficial de fluidos (bombas e completação de poços), geomecânica (dimensionamento de pilares _ modelamento com o FLAC 3D®), estudos ambientais e econômicos de viabilidade, tais tópicos não foram detalhadamente abordados nesse trabalho dado a dimensão que tais estudos tomariam.

Os resultados encontrados, vale ressaltar que são meramente uma estimativa inicial de volume a nível de um trabalho inicial exploratório, foram: teor médio de sal de potássio de 70,12%, volume de sal de potássio de 1.913.221.088 m³ e toneladas de sal de potássio de 3.711.648.911 t, recuperação média de 50,33% layout cilíndrico e 54,36% layout esférico (são valores alto de recuperação se comparado com o método de câmaras e pilares que também é largamente utilizado na exploração salina, estudos geomecânicos adicionais devem ser feito conforme mencionado anteriormente para a melhor determinação desse valor de recuperação), aqui não é possível falar de diluição, posto que, essa depende da morfologia do corpo e do método de lavra utilizado e não foi encontrado dado de diluição em situações similares na bibliografia, permitem supor que a ocorrência mineral do ponto de vista unicamente de tonelagem é bastante interessante.

Do ponto de vista meramente técnico, o uso combinado de técnicas de levantamento superficial de fluidos, como injeção de gás, bombeio a alta pressão, etc. pode aumentar a recuperação do minério a ser lavrado. O único limitante é o custo operacional desse bombeio. Como o uso de uma ou outra técnica depende muito da morfologia do corpo de minério, para cada depósito mineral faz-se necessário um estudo detalhado visando-se determinar quais técnicas surtiram os melhores resultados.

De maneira geral, este trabalho concluiu seu objetivo que era propor uma alternativa econômica para a exploração de depósitos minerais que seriam inviáveis de serem explotados por meio de métodos convencionais de lavra a céu aberto e subterrânea, neste caso a solução encontrada foi por meio do uso de lavra por dissolução. Além disso, vale ressaltar que esse objetivo foi atingido fazendo-se uso de ferramentas e dados poucos usuais no ambiente da

mineração (sísmica, petrofísica, descrição geológica de poços de petróleo, etc.), logo por si só é inovador ao propor uma nova abordagem para exploração mineral de evaporitos.

REFERÊNCIAS

- 911 Metallurgist. (09 de Novembro de 2019). *Potash Flotation*. Fonte: 911 Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/blog/potash-flotation>
- Alaska Department of Natural Resources (Division of Oil & Gas). (30 de janeiro de 2017). *Directional and Extended-Reach Drilling*. Fonte: Alaska Gov: http://dog.dnr.alaska.gov/Leasing/Documents/BIF/Beaufort_Sea/BeaufortSea_FinalBIF_AppC_DirDrill.pdf
- ANM. (2019). *Informe mineral 1º/2019*. Brasília : Agência Nacional de Mineração.
- ANM. (20 de Outubro de 2019). *Sigmine - DNPM*. Fonte: <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>
- ANP - Agência Nacional do Petróleo . (2012). *RESOLUÇÃO ANP Nº 37, DE 19.11.2012 - DOU*. Brasília .
- API - American Petroleum Institute. (2018). *Direcional Drilling*. API.
- Asmus, H., & Porto, R. (1980). Diferenças nos estágios iniciais da evolução tectônica da margem continental leste brasileira: possíveis causas e implicações. *Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 225-239). Camboriú: SBG.
- AutoCad. (15 de Setembro de 2020). *AutoDesk*. Fonte: <https://www.autodesk.com.br/>
- Azambuja Filho, N., L.M., A., & G, C. F. (1998). Guidebook to the rift-drift Sergipe-Alagoas passive margin basin, Brazil. *AAPG International Conference & Exhibition* (p. 113). Rio de Janeiro: AAPG/PETROBRAS.
- Azambuja, N. C., Abreu, C., Horschuts, P., Cândido, A., & Ramos, E. (1980). Estudo sedimentológico, faciológico e diagenético dos conglomerados do campo petrolífero de Carmópolis. *Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 240-253). Camboriú: SBG.
- Azambuja, N. F., Souza-Lima, W., & Ferreira, J. (2004). *Guidebook to the Rift-Drift Sergipe-Alagoas Basin*. Rio de Janeiro: PETROBRAS/STATOIL field trip.
- Baar, C. (1977). *Applied Salt Rock Mechanics*. Amsterdam: Elsevier Scientific.
- Bacelar, P., & Costa, M. (1993). Expressão sísmica da discordância pré-neo-Alagoas - porção nordeste da sub-bacia terrestre de Alagoas. *Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, 3 (pp. 163-167). Rio de Janeiro: SBGF.
- Bartlett, R. W. (2007). *Solution Mining: Leaching and fluid recovery of materials*. New York: Routledge .

- BBC Brasil. (22 de Março de 2020). *Brasil obtém permissão da ONU para explorar minério em fundo do oceano.* Fonte: BBC: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/07/140723_mineracao_submarina_brasil_rb
- Birhanu, Y. (11 de Fevereiro de 2014). *Producing a Realistic Weathering Profile Using Leapfrog Mining.* Fonte: OREFIND: http://www.orefind.com/blog/orefind_blog/2014/02/11/producing-a-realistic-weathering-profile-using-leapfrog-mining
- Bosworth, S., Saad, H., Ismail, G., Ohmer, H., Stracke, M., West, C., & Renato, A. (15 de Setembro de 2016). *Key Issues in Multilateral Technology.* Fonte: Schlumberger: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors98/win98/key.pdf
- Bosworth, S., Saad, H., Ismail, G., Ohmer, H., Stracke, M., West, C., & Retnanto, A. (2000). *Key Issues in Multilateral Technology. Oilfield Review*, 1-15.
- Bosworth, S., Saad, H., Ismail, G., Ohmer, H., Stracke, M., West, C., & Retnato, A. (15 de Setembro de 2016). *Key Issues in Multilateral Technology.* Fonte: SLB: SLB: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors98/win98/key.pdf
- Botelho, F. V. (15 de Janeiro de 2017). *Fundamentos da geomecânica das rochas salinas.* Fonte: MAXWELL -PUC RIO: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/23909/23909_3.PDF
- C., C., & Mohriak, W. (1998). *Geology of Atlantic Eastern Brazilian Basins. AAPG International Conference & Exhibition.* Rio de Janeiro: AAPG/PETROBRAS, 67p. (Short Course).
- CEPEA. (21 de Março de 2020). *PIB DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO.* Fonte: Nota técnica sobre ajustes metodológicos: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>
- Christopher, A., Jackson, L., Martin, P., Michael, R., & Clara, R. (27 de Janeiro de 2015). *Enigmatic structures within salt walls of the Santos Basin Part 1: Geometry and kinematics from 3D seismic reflection and well data. Journal of Structural Geology*, pp. 135-162.
- CPRM _Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. (01 de Junho de 2019). *Geologia Marinha.* Fonte: Mapoteca CPRM: <http://mapoteca.cprm.gov.br/programas/template.php>
- Cruz, E. (2003). *Modelagem numérica de escavações subterrâneas em evaporitos da Sub-Bacia de Taquari-Vassouras.* Belo Horizonte - MG.

- DNPM e USGS: Mineral Commodity Summaries. (2014). *Pótassio*. Fonte: DNPM: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/potassio-sumario-mineral-2014>
- Downton, G., Skei, T., Hendricks, A., & Pafitis, D. (14 de Setembro de 2016). *Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional*. Fonte: Schlumberger: https://www.slb.com/~//media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/sum00/p20_31.pdf
- Ducan, E., & Lajtai, E. (1972). *The creep potash salt rocks from Saskatchewan*. Trans Tech Publications.
- Dug Insight. (26 de Janeiro de 2020). *DUG*. Fonte: <https://dug.com/dug-insight/download-resources/>
- Estrella, G. (1972). O estágio Rift nas bacias marginais do Leste brasileiro. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 26, (pp. 29-34). Belém: SBG.
- Falkenheim, F. (1986). *Análise da Bacia Sergipe-Alagoas*. Rio de Janeiro: CENPES/DEPEX/PETROBRAS, Relatório interno, 210 p.
- Feijó, F. J. (1979). *Estudo dos carbonatos Muribeca e Riachuelo no Alto de Aracaju - Bacia Sergipe Alagoas - Nordeste do Brasil*. Rio de Janeiro: DIREX/ RPNE/PETROBRAS, Relatório Interno, 27 p.
- Feijó, F. J. (1994). Bacias de Sergipe e Alagoas. . Em F. J. Feijó, *Boletim de Geociências da Petrobras n°8* (pp. 149-161). Rio de Janeiro: Petrobras.
- Felczak, E., Torre, A., Godwin, N., Mantle, K., Naganathan, S., & Hawkins, R. (17 de Setembro de 2016). *Lo mejor de ambos mundos: un sistema rotativo direccional híbrido*. Fonte: Schlumberger: https://www.slb.com/~//media/Files/resources/oilfield_review/spanish11/win11/04_hybrid.pdf
- Filho, C. P. (1 de Abril de 2012). *Boletim Sociedade Brasileira de Geofísica*. Fonte: SBGF: <https://sbgf.org.br/noticias/images/Boletim-4-2012.pdf>
- Fonseca, J. C. (1972). Evaporitos de Sergipe. *Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 185-246). Belém : SBG.
- Frost, H., & Ashby, M. (1982). *Deformation Mechanism Maps*. New York: Pergamon Press.
- Goodman, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*.
- Google. (21 de Setembro de 2020). Google Earth. Belo Horizonte.
- Guimarães, F. B. (2012). *SEBRAE*. Fonte: Ideias de negócios : <http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ideias/como-montar-uma-fabrica-de-telhas-de-ceramica,00e87a51b9105410VgnVCM1000003b74010aRCRD>

- Hale, D., Hill, N., & Stefani, J. (1992). *Imaging salt with turning seismic waves: Geophysics*. 57, page 1453–1462.
- Hartman, H., & Mutmanský, J. (2002). *Introductory mining engineering*. United States of America.
- IBP- Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. (11 de Dezembro de 2016). *IBP*. Fonte: <http://www.ibp.org.br>
- IHS Markit. (20 de Abril de 2020). *Kingdom*. Fonte: IHS Markit: <https://ihsmarkit.com/products/kingdom-seismic-geological-interpretation-software.html>
- INDEX MUNDI. (22 de Julho de 2020). *Potassium Chloride Monthly Price - US Dollars per Metric Ton*. Fonte: Index Mundi: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=potassium-chloride&months=180>
- Iramina, W. (04 de Agosto de 2016). *INTRODUÇÃO À ENGENHARIA DE PERFURAÇÃO*. Fonte: Edisciplinas USP: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1749775/mod_resource/content/1/Aula%201b.pdf
- IUPAC. (15 de Setembro de 2020). *International Union of Pure and Applied Chemistry*. Fonte: www.iupac.org
- Jeremic, M. (1994). *Rock Mechanics in Salt Mining*.
- Keary, P., Brooks, M., & Hill, I. (2009). *Geofísica de Prospeção*. São Paulo: Oficina de textos.
- Lana, M. C. (1990). *Bacia de Sergipe-Alagoas: uma hipótese de evolução tectono-sedimentar*. In: G.P.R. Gabaglia & E.J. Milani (eds.) *Origem e Evolução das Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro: Petrobras.
- LIKER, J. K., & MEIER, D. (2007). *O modelo Toyota: manual de aplicação*. Porto Alegre: Bookman.
- Mansano, R. (05 de Agosto de 2004). *Engenharia de perfuração e completação em poços de petróleo*. Fonte: Petroleo UFSC: http://www.petroleo.ufsc.br/palestras/2004_08_05.pdf
- Mark, H. F. (1964). *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2nd Edition*. New York: J. Wiley & Sons.
- Menzel, W., & Schreiner, W. (1977). *Zum geomechanischen Verhalten vom Steinsalz verschiedener Lagertatten der ddr*.
- Micromine. (13 de Agosto de 2020). Fonte: Micromine: <https://micromine.com/>

- Mohriak, W., Szartmari, P., & Anjos, S. (2009). *Sal: Geologia e tectônica*. Campinas - SP: Terra e didática.
- Morais, J. M. (2013). *Petróleo em águas profundas*. Brasília: IPEA/PETROBRAS.
- Munson, D., & Dawson, P. (1981). *Salt Constitutive Modeling Using Mechanism Maps: In: 1st CONF. on the mechanical behavior of salt*. Pennsylvania: Pennsylvania State University, University Park, PA.
- Nader, P. A. (2021). Consultor Micromine - Brasil. Belo Horizonte: Micromine.
- Oliver, F. (1997). *Estudo dos paleoambientes durante a sedimentação evaporítica da Formação Muribeca - Bacia de Sergipe/Alagoas*. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha, UFF, 145 p.
- Petri, S. (1962). *Foraminíferos cretáceos de Sergipe*. São Paulo: Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, vol. 265.
- Petroleum Services Association of Canada (PSAC). (15 de Setembro de 2016). *Well cost Study*. Fonte: PSAC: http://www.pzac.ca/wp-content/uploads/wcs_sample.pdf
- Pinto, C. (1995). *Longwall Mining in Boulby Potash Mine: A numerical study*. USA: Colorado School of Mines.
- Potássio do Brasil. (28 de Março de 2020). *Potássio do Brasil*. Fonte: <http://www.potassiodobrasil.com.br/o-que-fazemos>
- PUC RIO. Rio de Janeiro. (12 de Outubro de 2016). *Planos de Desenvolvimento com Poços Multilaterais*. Fonte: MAXWELL: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14734/14734_3.PDF
- Quinteiro, C. R. (1992). *Numerical modeling of time dependent ground behavior around a deep potash mine in preparation for layout design*. . USA: Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines.
- Raj, R., & Ashby, M. (1971). *Grain Boundary sliding and diffusional creep*.
- Rider, M. (2002). *The Geological Interpretation of Well Logs*. Scotland: Rider-French Consulting Ltd, Sutherland.
- Sá, E., & Oliveira, R. (2008). Revisão Geológica e Reavaliação dos sistemas petrolíferos da Bacia Sergipe Alagoas. Natal: PPGG/UFRN.
- Salamon, M. (1962). The influence of strata movement and control on mining development and design. *Ph.D. Thesis*. University of Durham.
- Salamon, M. (1970). The technology and potential of tunnelling. *South Africa Tunnelling Conference. Vol. I*. South Africa.

- Santos, S. (30 de Julho de 2017). *Uso da perfuração direcional combinada à fraturação hidráulica na exploração de jazidas de rochas evaporíticas na plataforma continental brasileira e áreas adjacentes*. Fonte: Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/318506176_USO_DA_PERFURACAO_DIRECIONAL_COMBINADA_A_FRATURACAO_HIDRAULICA_NA_EXPLOTACAO_DE_JAZIDAS_DE_ROCHAS_EVAPORITICAS_NA_PLATAFORMA_CONTINENTAL_BRASILEIRA_E_AREAS_ADJACENTES
- SBGF. (01 de Fevereiro de 2012). *Sísmica marinha: Aquisição*. Fonte: Sociedade Brasileira de geofísica : <https://sbgf.org.br/noticias/images/Boletim-2-2012.pdf>
- Scalabrin, R., & Sznclwar, J. J. (Agosto de 2009). *MME (Ministério de Minas e Energia)*. Fonte: MME: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P50_RT76_Perfil_de_Cadeia_Minero-Quxmica.pdf/6fb0a077-dd5d-4e9b-92cc-67272b6704b0
- Schaller, H. (1970). *Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe/Alagoas*. Rio de Janeiro: Boletim Técnico da Petrobras, 12.
- Schlitt, W., & Larson, W. (1985). *Salts & Brines*, 85. Littleton, CO.: Society of Mining Engineers.
- Seleme, R. (2012). *Métodos e Tempos: Racionalizando a produção de bens e serviços*. Curitiba : InterSaberes.
- Serata, S., & Schultz, W. (1972). Application of stress control in deep potash mines. . *Mining Congress Journal*, pp. pp. 36-42.
- Silva, M., Charlotte, B., & Santos , C. (02 de Agosto de 2001). *Evaporitos como recursos minerais*. Fonte: <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v18n3/a11v18n3.pdf>
- Smith, G. (1979). Subsurface stratigraphy and geochemistry of late quaternary evaporites, Searles Lake, California. *USGS Professional Paper*.
- Souza, K. G. (2010). *Ciência e cultura*. Fonte: O futuro da exploração mineral em águas brasileiras e internacionais: <http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v62n3/a10v62n3.pdf>
- Souza, K., Martins, L., Cavalcanti, V., Pereira, C., & Borges, L. (10 de Dezembro de 2017). *Recursos Não-Vivos da Plataforma Continental Brasileira e áreas Oceânicas adjacentes*. Fonte: UFRGS: http://www.ufrgs.br/gravel/SI/2009/Gravel_EE.pdf
- Souza, R. (1989). *Litofácies e diagênese do Membro Carmópolis, Formação Muribeca (Cretáceo), Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil*. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UFRJ.

- Souza-Lima, W. (2005). *Evolução tectono-sedimentar da bacia de Sergipe-Alagoas*. Phoenix. Rio de Janeiro: Phoenix.
- Stevanato, A. C. (2011). *ANÁLISE PETROFÍSICA DE RESERVATÓRIOS*. Campinas.
- USGS. (2019). *MINERAL COMMODITY SUMMARIES* . Virginia : U.S. Department of the Interior.
- USP. (15 de Março de 2020). Fonte: Nota técnica sobre os ajustes metodológicos do PIB do Agronegócio do Brasil.: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>
- W.U, M. (1997). Observações sobre a carta estratigráfica e a evolução tectono-sedimentar das bacias de Sergipe e Alagoas. Em M. W.U, *Boletim de Geociências da Petrobras* (pp. 84-115). Rio de Janeiro: Petrobras.
- Wister, W. (Março de 2019). *Aerial view of Searles Lake, a salt lake in California*. Fonte: Pinterest : California
- Yancoal Canada. (29 de Abril de 2016). *Southey Potash Project*. Fonte: You Tube: https://www.youtube.com/watch?v=EHZ_iRjWGPU