

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Caracterização Textural e Mineralógica dos Evaporitos da
Formação Muribeca, Bacia de Sergipe-Alagoas**

Daniela Leonel Borges

Orientador: Prof. Dr. André Oliveira Sawakuchi

TRABALHO DE FORMATURA

(TF- 12/11)

SÃO PAULO

2012

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à VALE – Unidade Operacional Taquari-Vassouras, ao geólogo Afonso Carvalho Júnior e ao Erivanaldo Costa pela realização dos trabalhos de campo e fornecimento das amostras que serviram de base para a realização deste trabalho de formatura. Ao geólogo Jackson Passos pelo apoio e auxílio durante a redação da monografia.

Ao orientador professor André Oliveira Sawakuchi, pela orientação, paciência e apoio desde os tempos mais primórdios.

À Paula Amaral, geóloga e Bonita que me disse certa vez: -Vai que dá pé!

Ao Laboratório de Estudos Cársticos pelo uso dos equipamentos de laminação, Nicolás Strikis e James Apaéstegui pelo apoio no desenvolvimento das técnicas de produção das lâminas delgadas e acompanhamento das atividades dentro e fora do Instituto de Geociências. Ao pessoal da seção de laminação do Instituto de Geociências, pelas sugestões e pela produção das lâminas.

Gostaria também de agradecer às pessoas que estiveram presentes durante esse caminho cheio de pedras que foi a graduação:

À tia Clotilde, porque sem ela essa estrada teria muito menos ternura e chá preto. À tia Astrid e Maria Alice que me ensinaram que mais que tons de cinza entre preto e branco há uma gama de cores tão grande quanto se consiga enxergar. À dona Maria Dantas e Alexandre Hidalgo que botaram mais um prato na mesa e mais um filho no coração. Ao Rodrigo Dantas Hidalgo pela amizade, ternura e pela caixa de lápis de cor de 36. À dona Magali que tantas vezes fez a vida parecer mais doce com afeto e bolo de fubá.

À minha mãe que me preparou para o caminho com todas as pedras que estivessem por vir e que costurou todos os fundos de calças de campo. Sem jamais perder a ternura.

Às minhas irmãs Denise e Mayara, a quem eu tanto amo.

À Orieta Bittencourt e Waldiney Giacomelli que me disse: ` -Vai nessa, mulher!` quando eu ainda era menina.

Aos meus amigos João Endrigo Rodrigues e Juliana Olívia Macedo por serem reais. À minha amiga Talita Sebrian por ser real. À minha amiga Michelle Tizuka por ser real. Ao Lucas Fahham e Maria Jordão pelas sugestões de leitura, músicas de tão bom gosto, pelos Anos Novos e por serem reais.

Ao Drummond, o homem atrás do bigode tão citado neste mundo vasto mundo da geologia, que falou da pedra no meio do caminho e que sabe como a Lua às vezes bota a gente comovido como o diabo.

Aos meus colegas e amigos geólogos de graduação: Diego Fróes e Souza e Diego Marra, Laísa Batista e Patrícia Magon, presentes nas discussões intermináveis sobre fases de deformação, paragêneses, modelagem de depósitos e assuntos que não se acham em livros texto como as coisas da vida. Também aos colegas de banco da geologia, que não caberiam em uma só leva nem nos bancos nem nesta seção de agradecimentos. Ao Gustavo Saka pelas conversas sobre experimentos antropológicos e pela sugestão do tema deste projeto. Ao Elton Trindade por tentar mostrar sempre o lado bom da vida. Ao Caio Arthur pelas discussões metodológicas e sertanejas durante o desenvolvimento deste trabalho de formatura. Ao Fernando Uchidomari pelas tardes fagueiras e cafés com leite na FAU. Ao Leonardo Aguiar pelas sugestões, por renovar os ânimos com cookies, bolos de rolo e hinos nacionais de países da Tríplice Aliança.

À Karina Solis, Luján Florentin e Raul Meloni pelo apoio moral sincero, por terem ajudado a manter a sanidade, sobretudo na etapa final da redação dessa monografia. Aos companheiros e amigos André Lima, Cauê Ranzeiro e Luiz André Barreta por partilharem o café e a birita. Ao Daniel Mata pelas seresta e sensibilidade paradoxal, pela ampulheta e pelas sucaritas.

Ao carbono que faz diamantes, pessoas e coisas bonitas como grafites 2B para que se escrevam cartas.

Aos números primos.

Ao Rodrigo Amarante, que me acompanhou no sufoco e no sossego. Sempre.

Ao Iuri Bispo que me ensinou integrar, derivar, trocar pneus de bicicleta, levar a casa numa sacola e a não ter medo do mundo. Por quem eu tenho admiração, muito orgulho e respeito. Pela inspiração e pelo apoio, para que um dia finalmente houvesse uma seção de agradecimentos.

*“E a mulher de Ló olhou para trás e ficou
convertida numa estátua de sal.”*

Gênesis 19:26

Caracterização Textural e Mineralógica dos Evaporitos da Formação Muribeca, Bacia de
Sergipe-Alagoas
TF-2012/11

Daniela Leonel Borges
André Oliveira Sawakuchi

Das bacias da margem continental, a Bacia Sergipe-Alagoas é a mais completa em termos crono-estratigráficos, onde se reconhecem as sequências pré-rifte, sinrifte, transicional e pós-rifte. É na sequência pós-rifte, durante o Neo-Aptiano, que se iniciam as primeiras incursões marinhas responsáveis pela deposição da Formação Muribeca.

As características texturais de minerais de halita e silvinita (silvita+halita), do Membro Ibura da Formação Muribeca, bem como suas assembléias de inclusões fluidas indicam eventos de deformação e migração de fluidos em diferentes fases da bacia. O Membro Ibura é constituído por carbonatos e sulfatos na base, seguidos por halita e intercalações de halita e silvita (silvinita), carnalita e taquidrita.

Formações salíferas registram modificações na taxa de salinidade em sua estratigrafia através de *ciclos de salinidade*, que resultam em uma sequência deposicional que segue a ordem de solubilidade dos elementos presentes em água: dos menos solúveis na base para os mais solúveis no topo.

A entrada de água no sistema após o estabelecimento do pacote evaporítico pode promover a dissolução de rochas já depositadas e com isso um rearranjo composicional: A silvita presente no Ciclo VII do Membro Ibura é um mineral secundário cristalizado à partir da dissolução de carnalita primária ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$), depositada singeneticamente a partir de salmouras altamente concentradas. A percolação de fluidos carregados em íons provenientes da dissolução de carnalita promoveu a reação e precipitação de silvita (KCl) secundária nos interstícios de cristais de halita.

Há portanto uma evidente diferença textural de cristais de halita em rochas de halita pura e silvinita: onde houve estabelecimento tardio de silvita, os cristais de halita são relativamente menores (de 2 a 8 mm de comprimento) e têm contatos intergranulares côncavo-convexos. As halitas puras se mostram em cristais centimétricos (de 1 a 3,5 de comprimento) e seus contatos intergranulares são predominantemente planares seguindo as faces do cristal. A passagem de fluidos pelos estratos evaporíticos é registrada por diferentes gerações de inclusões fluidas, que encerram fluidos de heranças compostionais distintas.

Textural and Mineralogical Characterization of Evaporites from the Muribeca Formation,
Sergipe-Alagoas Basin
TF-2012/11

Daniela Leonel Borges
André Oliveira Sawakuchi

The Sergipe-Alagoas Basin is the most complete basin in terms of chronostratigraphy in comparison to the other basins located at the Brazilian continental margin, where it is possible to recognize pre-rift, sin-rift, transitional and post-rift sequences. It is during the post-rift sequence, during the Neo-Aptian, that the first marine incursions, responsible for the deposition of the Muribeca Formation, take place.

Textural features and fluid inclusion assemblages in halite and sylvinitic (halite + sylvite), from Ibura Member, Muribeca Formation, indicate deformational events and fluid migration in different phases of the basin evolution. The Ibura Member is formed by carbonate rocks and sulfides at the bottom followed by halite and intercalations of halite and sylvite (sylvinitic), carnallite and tachydryte.

Salt formations keep features of changes of salinity levels through 'salinity cycles' responsible for a certain depositional sequence that follows the order of solubility of the elements present in the water: from less soluble at the bottom to more soluble at the top.

When there is a late water supply in the system, after the settling of an evaporite sequence, the rocks can go through dissolution and it will result in a compositional rearrangement: The sylvite from the Cycle VII of Ibura Member is a secondary mineral, crystallized from carnallite ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$), the primary mineral, syngenetically deposited from highly concentrated brines. The percolation of fluids, highly saturated with ions from the carnallite previously formed has promoted border reaction and precipitation of sylvite around halite crystals.

There are substantial textural differences between halite crystals from monomineralic-halite rocks and sylvinitic: halite crystals are smaller when there is sylvite (from 2 to 8 mm wide) and the borders have concave-convex contact types. Halite crystals in pure-halite rocks tend to be bigger (from 1 to 3.5 cm wide) and present planar boundaries. The fluid migration through the evaporite rock layers can be noticed by the different fluid inclusion generations that enclose fluids from different compositional sources.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	2
2.	OBJETIVOS	2
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	3
3.1	OBTENÇÃO DE AMOSTRAS.....	3
3.2	CONFECÇÃO DE LÂMINAS DELGADAS	4
3.3	SERRA DE FIO DIAMANTADO	4
3.4	NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS	6
3.5	ANÁLISE MICROSCÓPICA	6
3.6	FLUORESCÊNCIA POR LUZ ULTRA VIOLETA E HIDROCARBONETOS	6
4.	ÁREA DE ESTUDO	8
4.1	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA.....	8
4.2	MINA SUBTERRÂNEA E ATIVIDADES DE OPERAÇÃO.....	8
4.3	GEOLOGIA REGIONAL	11
4.4	EVAPORITOS	15
4.5	MINERAIS E ROCHAS EVAPORÍTICOS.....	15
4.6	SEDIMENTAÇÃO DE EVAPORITOS.....	17
4.7	SUCESSÃO DE DEPOSIÇÃO	18
4.8	ORIGEM DE FLUIDOS	19
4.9	INCLUSÕES FLUIDAS.....	19
4.10	FORMAÇÃO DE FASES FILHAS (DAUGHTER PHASES)	20
4.11	DETERMINAÇÃO DE AMBIENTES DIAGENÉTICOS.....	21
5.	RESULTADOS	24
5.1	DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA.....	24
5.2	MICROGRAFIA E INCLUSÕES FLUIDAS.....	34
6.	DISCUSSÃO.....	43
7.	CONCLUSÃO.....	44

1. INTRODUÇÃO

Esta monografia de trabalho de formatura apresenta um estudo petrográfico de evaporitos da Formação Muribeca, Bacia de Sergipe-Alagoas, com descrições de amostras de testemunhos de halita e silvinita e a análise de suas feições microscópicas observadas em lâmina delgada. As propriedades de rochas evaporíticas são grandemente discutidas na literatura científica e industrial. A capacidade selante deste material bem como seu papel na evolução de bacias sedimentares, problemas industriais na perfuração, a possibilidade do uso de minas de sal no descarte de rejeitos radioativos e a mineração de sais tornam o tema de extrema importância e enfatizam a necessidade de que se aprofunde o estudo de evaporitos, de suas propriedades compostionais, mecânicas e deformacionais na natureza (Schléder, 2006). A interpretação e compreensão de microestruturas presentes em rochas salinas são elementos chave para a interpretação das condições de deformação e reologia a que foram submetidas (Van Gent *et al.* 2010).

A análise micrográfica de evaporitos pode ser portanto de grande valia na compreensão da evolução das bacias, interpretação de eventos deformacionais e de migração de hidrocarbonetos.

2. OBJETIVOS

A compreensão de características microestruturais de sais é de grande valia para o entendimento do estabelecimento das rochas em questão, diferentes fases de cristalização de minerais e seu comportamento estrutural. Sal é também utilizado como material análogo para a compreensão de processos microestruturais e texturais em rochas silicáticas (Drury & Urai, 1990).

Neste estudo utilizou-se lâminas delgadas para se verificar relações entre os minerais de halita e silvita: ordem de cristalização, forma e tamanho de grãos e presença de inclusões fluidas.

Este trabalho apresentará, por meio de aspectos texturais e microestruturais evidências de deformação e suas consequências na diagênese dos minerais. De posse das amostras de testemunhos e das lâminas delgadas produzidas a partir deles, busca-se compreender as relações temporais relativas de cristalização de tipos texturais de halita e silvita nos evaporitos da Mina Taquari-Vassouras.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 OBTENÇÃO DE AMOSTRAS

As amostras foram obtidas em duas etapas de trabalho de campo na Unidade Operacional Taquari-Vassouras (UOTV) de 03 a 05 de abril e de 18 a 20 de julho de 2012, com visita à mina subterrânea e acompanhamento das atividades de operação e sondagem. Seções dos testemunhos de sondagem foram escolhidas na mesa de descrição, respeitando um limite inferior de 10 cm de comprimento para cada amostra (Fig. 1).



Fig. 1: Testemunhos de sondagem dispostos continuamente na mesa de descrição. Os testemunhos expostos têm diâmetro de 4cm.

Os cilindros foram identificados e embalados em filme de PVC para transporte (Fig. 2). Das amostras obtidas selecionou-se 5 exemplares de silvita e 4 de halita para a confecção das lâminas delgadas.

3.2 CONFECÇÃO DE LÂMINAS DELGADAS

A confecção de lâminas delgadas de rochas evaporíticas requer um conjunto de procedimentos que garantam condições de baixa umidade já que estas são facilmente solúveis dado que a umidade do ar pode provocar dissolução e recristalização dos minerais e com isso modificar características texturais originais da rocha.

Os procedimentos de laminação foram realizados com base nos métodos descritos por Schléder (2006) na verificação de estruturas de deformação em lâminas de halita. O método descreve o corte das amostras por uma serra diamantada, utilizando uma pequena quantidade de água para evitar a ocorrência de microfraturas. Na descrição as fatias são desbastadas a seco até uma espessura de aproximadamente 20 µm e então rapidamente banhadas em solução de água saturada em NaCl. A espessura das lâminas descritas nesta monografia foram definidas manualmente, de acordo com a transparência dos minerais e a acurácia na visualização de inclusões fluidas em lupa.

3.3 SERRA DE FIO DIAMANTADO

Para o corte de amostras utilizou-se a serra de fio diamantado (Serra Well) do Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental (GSA) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP) (Fig. 3): O equipamento consiste de um fio diamantado (diâmetro de 0,7 mm) movimentado com velocidade pré definida ao longo de uma roldana (carretel). O uso de água neste tipo de corte é facultativo.

A utilização de uma pequena quantidade de água demonstrou no entanto ser mais eficaz que o corte a seco (produção de superfícies de corte mais regulares, prevenção de fraturamento artificial de amostras e diminuição do tempo de operação).

A fatia obtida do corte é então ligeiramente desbastada e polida, utilizando-se carbeto de silício em uma de suas faces para a colagem na lâmina, para a uniformização e remoção de possíveis camadas de mineral recristalizado durante o corte. Em seguida desbasta-se a superfície exposta com lixa d'água e carbeto de silício cuidadosamente para que se mantenha a integridade da peça. A finalização é feita com solução de água e NaCl conforme o método descrito por Schléder (2006) e então se recobre o exemplar com uma camada fina de esmalte ou Entelan.



Fig. 2: Seções de testemunhos de sondagem embaladas para transporte. (Diâmetro dos clindros: 4 cm)

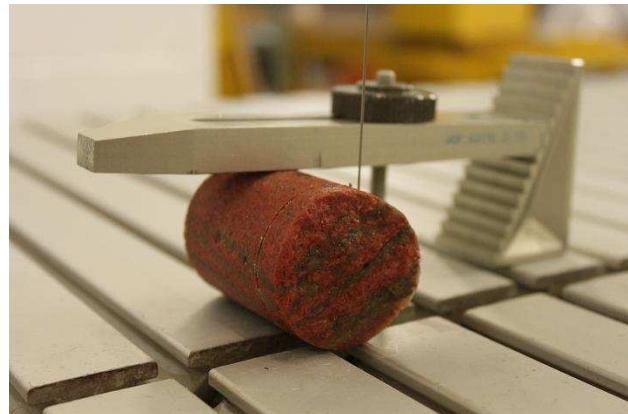


Fig. 3: Amostra de silvinita sendo preparada para laminação com fio diamantado (Serra Well).

As peças devem ser mantidas em ambiente de umidade controlada porque a cobertura esmaltada retarda a deterioração mas não assegura integridade da lâmina. Houve deterioração de exemplares durante a fase de análise microscópica e neste caso as lâminas foram novamente polidas, conforme necessidade, com lixa e carbeto de silício até que houvesse exposição de superfície fresca.

3.4 NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS

As amostras de mão foram nomeadas através do seguinte critério:

As duas letras definem o litotipo (S=silvinita, H=halita) e uma característica pertinente de classificação (V=vermelha, B=branca, F=fina, G=grossa), seguindo a nomenclatura utilizada pela UOTV. As amostras foram numeradas sequencialmente com números arábicos. A atribuição de números não indica no entanto qualquer ordem de localização já que os exemplares foram coletados das mesas de descrição e suas informações de *locus* e malha de sondagem não são divulgados.

As lâminas petrográficas seguem a mesma nomenclatura mas são precedidas por um número romano que define a etapa de laminação: I e II para seções delgadas obtidas na primeira e segunda fase de laminação respectivamente. Esta informação é pertinente porque a primeira etapa foi considerada fase teste dos métodos e técnicas, o que é importante na consideração da qualidade da lâmina. Uma mesma amostra pode ter originado mais de uma lâmina delgada. A relação de amostras segue na tabela anexa Tab. A01.

3.5 ANÁLISE MICROSCÓPICA

As análises foram realizadas no Laboratório de Petrologia Sedimentar do IGc-USP (LabPetro) com o microscópio luz polarizada Zeiss Axioplan equipado com câmera e sistema de fluorescência com luz ultra violeta, útil na detecção de hidrocarbonetos líquidos em inclusões fluidas e compostos orgânicos sólidos.

3.6 FLUORESCÊNCIA POR LUZ ULTRA VIOLETA E HIDROCARBONETOS

Segundo Roedder (1984) poucos fluidos orgânicos são fluorescentes sob iluminação UV, mas sua utilização pode ser extremamente útil, embora não definitiva, na determinação da existência de hidrocarbonetos porque estes tendem ser fluorescentes e se destacam em meio ao cristal, que no caso da halita se mostra completamente extinto.

A cola utilizada durante a preparação da lâmina delgada pode se assemelhar a uma inclusão e apresentar fluorescência. É necessário então atentar-se ao formato e disposição da feição na lâmina para que não se confundam feições de cristalização com feições artefato (Fig. 4).

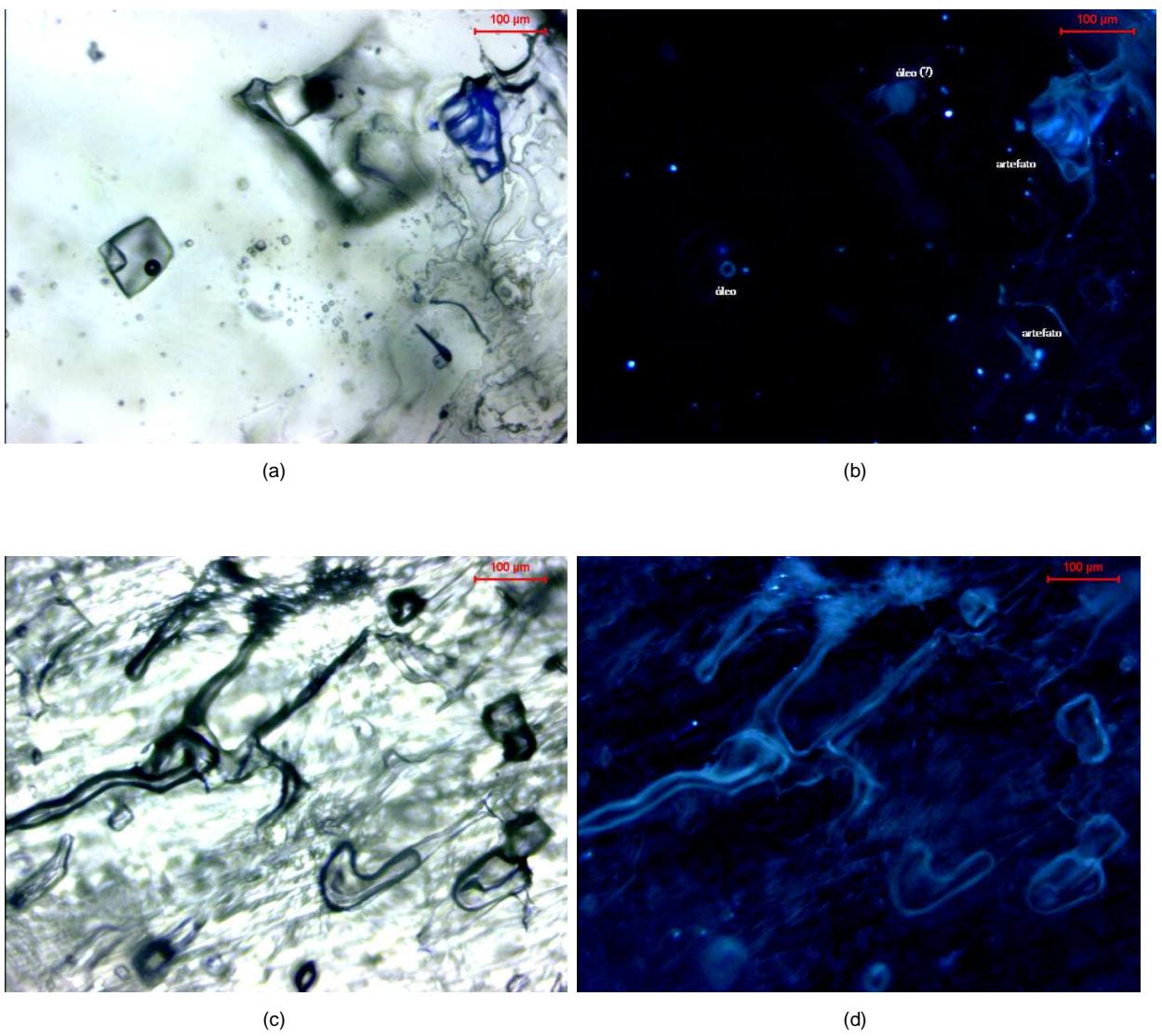


Fig. 4: Feições alheias à rocha produzindo fluorescência – (a) e (b) Inclusão fluida à esquerda com fase fluorescente (b): possível presença de óleo. À direita observa-se estrutura disforme fluorescente (cola) proveniente da laminação. Em (c) e (d) pode-se observar feições disformes (excesso de cola) e fluorescência produzida.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O projeto foi desenvolvido na área de exploração de potássio da Vale, na Unidade de Operação Taquari Vassouras, localizada no município de Rosário do Catete, Estado de Sergipe. A UOTV se localiza às margens da Rodovia BR-101 no nordeste do Estado de Sergipe, a 45 Km da capital Aracaju, próximo ao entroncamento com a Rodovia SE - 206 (Fig. 6).

4.2 MINA SUBTERRÂNEA E ATIVIDADES DE OPERAÇÃO

A Unidade de Operação compreende a mina subterrânea e a planta de beneficiamento do minério de potássio em superfície.

O acesso à mina é feito através de dois poços verticais com 5m de diâmetro e 455m de profundidade cada (Fontes, 2003). Um dos poços é utilizado para o transporte de funcionários e maquinário (elevador com capacidade para 60 pessoas) e o segundo é responsável pelo transporte do minério para a superfície. O transporte no interior da mina é realizado por carros devido à sua elevada extensão (Fig. 5).



Fig. 5: Mina subterrânea de Taquari-Vassouras: Transporte até as frentes de lavra por carros à partir do elevador. As frentes de lavra alcançam profundidades superiores a 700m.

MAPA DE LOCALIZAÇÃO E ACESSO MINA TAQUARI-VASSOURAS

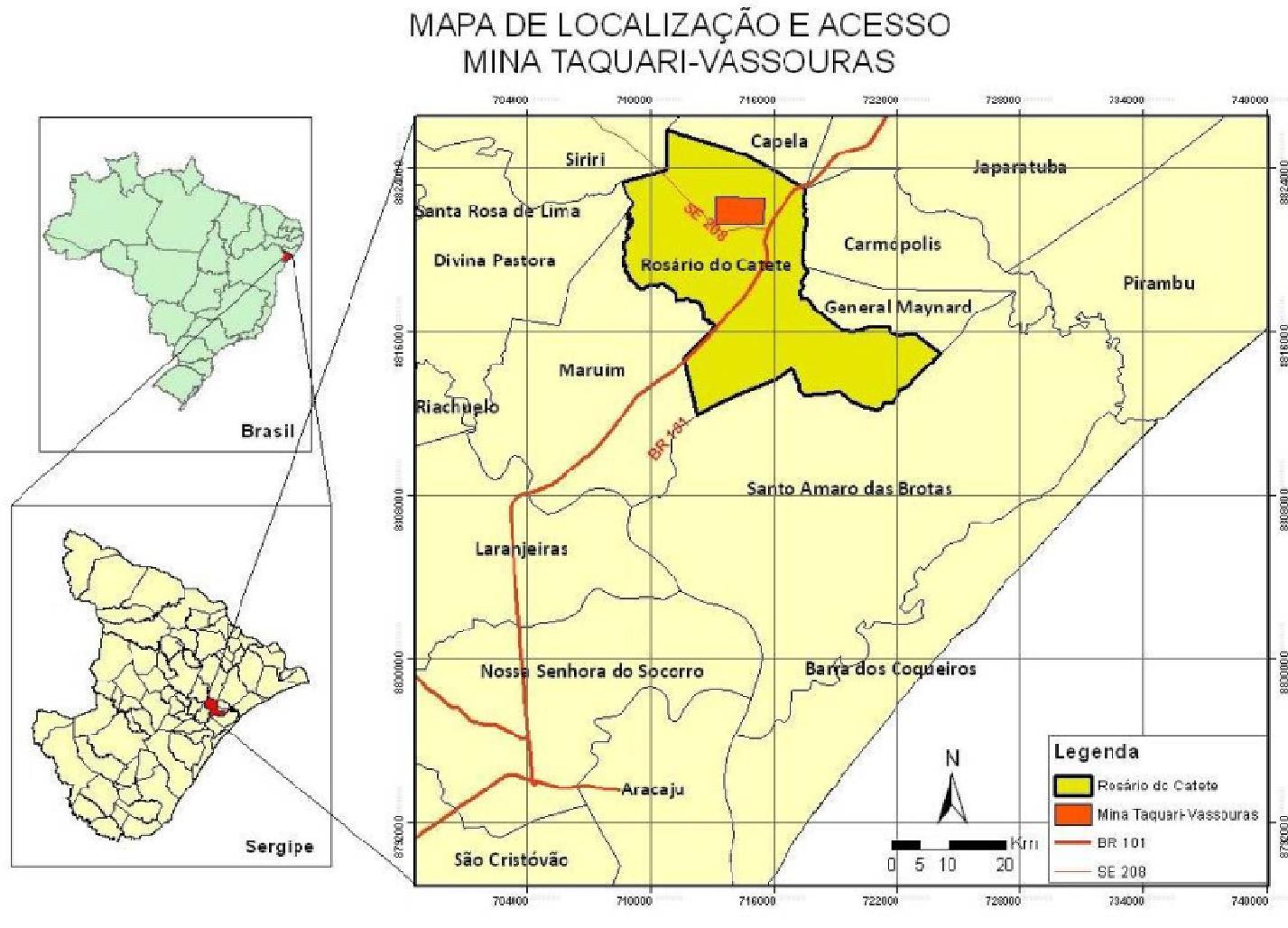


Fig. 6: Mapa de localização e acesso à mina Taquari-Vassouras: No detalhe o município de Rosário do Catete e a localização da área da mina.(Passos, 2012)

A mina é dimensionada seguindo o modelo de câmaras e pilares (Fig. 7) e utiliza mineradores do tipo Alpine e Marietta (Fig. 8).

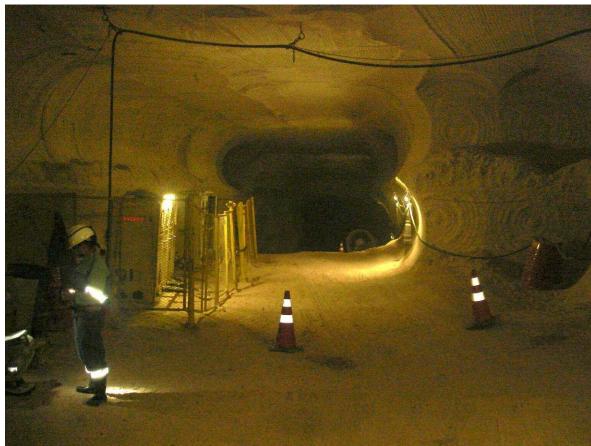


Fig. 7: Acesso aos painéis de avanço da frente de lavra.



Fig. 8: Minerador Marietta: Rotores de 1,80m de diâmetro.

(Fontes, 2003)

O minério é transportado até as correias, britado e trazido à superfície. A separação do cloreto de potássio (KCl) do cloreto de sódio (NaCl) a partir da silvinita se dá por separação gravitacional: O minério é misturado em água na planta de beneficiamento e com isso o mineral de interesse, KCl , se concentra por flotação.

4.3 GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia Sergipe-Alagoas situa-se na margem continental do nordeste brasileiro tendo uma porção terrestre de aproximadamente 13.000 Km² e porção submersa de cerca de 40.000 Km² (Milani *et al.*, 2007). É limitada a nordeste com a Bacia Pernambuco-Paraíba pelo Alto de Maragogi e a sudoeste com a Bacia do Jacuípe, de limite indiviso (Campos Neto *et al.*, 2007). O embasamento da Bacia Sergipe-Alagoas é constituído por rochas do Cráton São Francisco e da Província Borborema (Maciço Pernambuco-Alagoas e Faixa de Dobramentos Sergipana) (Rancan *et al.*, 2009).

Das bacias da margem continental, esta é a mais completa em termos crono-estratigráficos (Petri & Fulfaro, 1983) onde se reconhecem as sequências pré-rifte, sinrifte, transicional e pós-rifte (Cainelli & Mohriak, 1998).

Os evaporitos neo-aptianos foram profundamente estudados na Bacia de Sergipe-Alagoas (Fig. 9) e Espírito Santo durante os programas exploratórios da extinta PETROBRAS Mineração (PETROMISA) nas décadas de 1960 e 1970 com estudos sedimentológicos e estratigráficos de detalhe (Dias, 2008) que serviram de base para os trabalhos pioneiros de Szatmari *et al.* (1974).

A sequência evaporítica do Neo-Aptiano representa uma grande extensão na costa leste brasileira, indo do Alto de Florianópolis ao sul até a região de Sergipe-Alagoas (Fig. 10). Esta sequência é do tipo sequência de bacia de subsidênciam interior (sinéclise) interpretada como parte da fase pós rifte.

É durante a fase transicional que iniciam as primeiras incursões marinhas na Bacia de Sergipe-Alagoas (Dias, 2008) onde se depositam as três sequências da Formação Muribeca: Membro Carmópolis, Membro Ibura, onde se localiza a área do estudo em questão, e Membro Oiteirinhos (Souza-Lima, 2008) (Fig. 11 e Fig. 12). A variedade litológica dos evaporitos Ibura os difere de outros eventos evaporíticos da bacia, constituídos essencialmente por halita (Machado & Mohriak, 2008).

O Membro Carmópolis, situado na base da Formação Muribeca, é constituído principalmente por conglomerados polimíticos, arenitos, calcilutitos, siltitos, folhelhos e margas (Souza-Lima, 2008). O Membro Ibura é constituído por carbonatos e sulfatos na base, seguidos por halita e intercalações de halita e silvita (silvinita) além de sais extremamente solúveis como carnalita e taquidrita depositados em fases de extrema aridez (Szatmari *et al.*, 1974). Szatmari *et al.* (1974) dividiram este evento em nove ciclos evaporíticos, sendo os níveis de I a VI de alta salinidade e os ciclos VII a IX de baixa salinidade: a Zona Potassífera, e a área de estudo, se insere no Ciclo VII (Fig. 11 e Fig. 12). O Membro Oiteirinhos é constituído pela alternância de folhelhos e calcilutitos no topo da sequência (Souza-Lima, 2008).

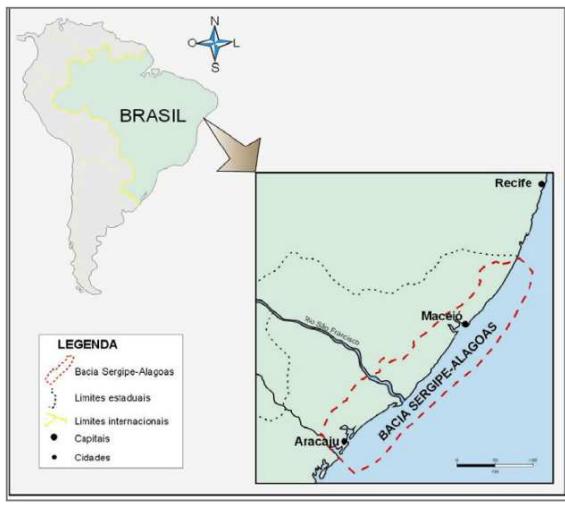


Fig. 9: Mapa de localização da Bacia Sergipe-Alagoas.(Passos, 2012)



Fig. 10: Reconstrução paleogeográfica do Neo-Aptiano. Na figura pode-se observar a Dorsal São Paulo, que possibilitou a deposição dos evaporitos Ibura.(Dias, 2009)

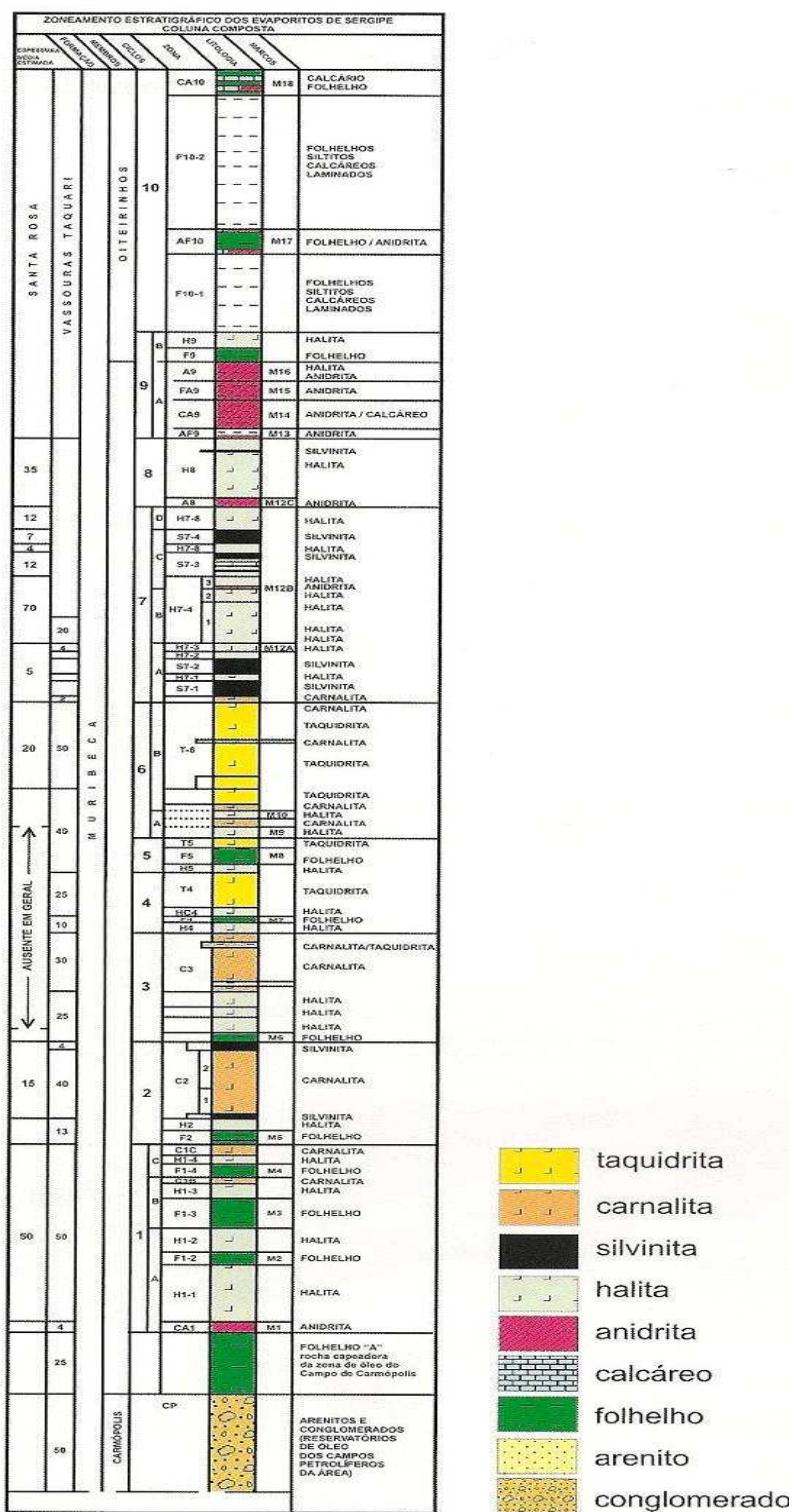


Fig. 11: Sequências evaporíticas de Sergipe com a relação dos ciclos estratigráficos. Ciclo VII – Zona Potassífera (Machado & Mohriak, 2008).

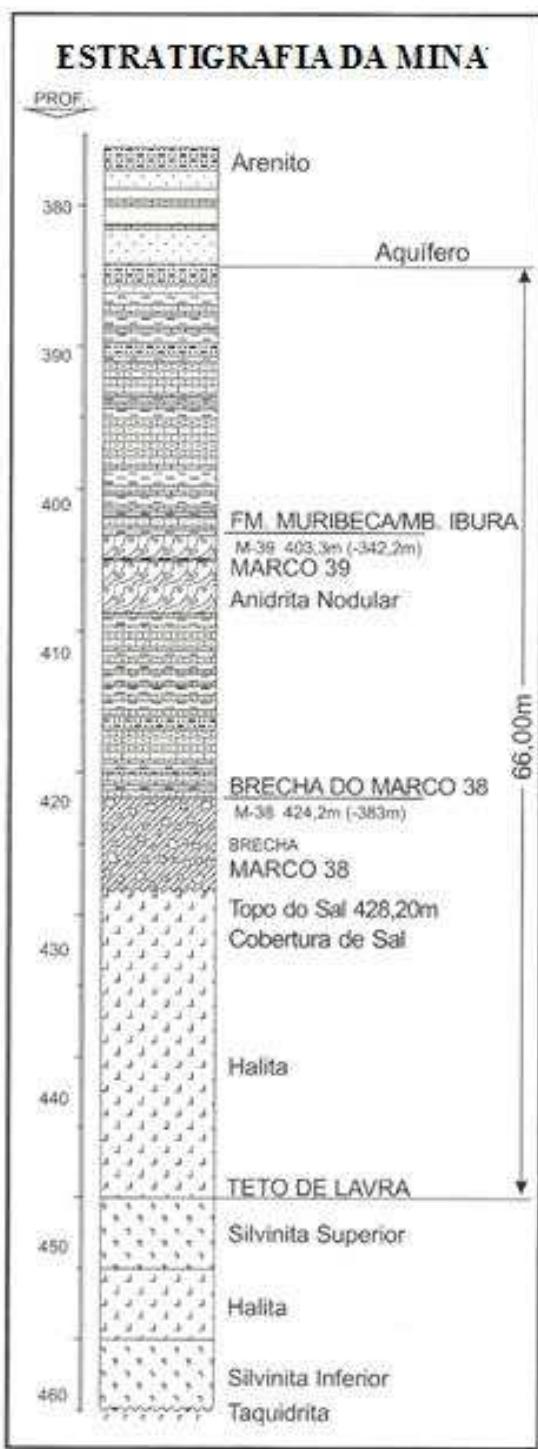


Fig. 12: Zona de operação da mina Taquari-Vassouras, encerrada entre o estrato de halita imediatamente inferior ao MARCO 38 (limite superior) e a camada de taquidrita(limite inferior). O avanço na zona de taquidrita pode inviabilizar a galeria por fechamento do conduto (Carvalho Junior & Alves, 2000).

4.4 EVAPORITOS

Segundo Mohriak & Szatmari (2008) o termo ‘evaporito’ é designado para precipitados químicos a partir de soluções aquosas com grandes concentrações de íons de sal (< 100 g/l), em uma sequência que abrange carbonatos, sulfatos e cloretos.

Rochas evaporíticas podem ser interpretadas como depósitos de precipitação química e por isso apresentam características distintas de rochas sedimentares terrígenas. Evaporitos têm em sua constituição elementos com baixo potencial iônico (Na, Cl, K) o que explica sua grande solubilidade e mobilidade física frente a esforços (Passos, 2012).

Rochas desta natureza são formadas em zonas onde há baixo aporte de sedimentos terrígenos, principalmente em condições de mar restrito onde o influxo de água é inferior à taxa de evaporação (Mohriak & Szatmari, 2008).

4.5 MINERAIS E ROCHAS EVAPORÍTICOS

Os principais minerais evaporíticos apresentam composição química formada pelos íons mais comuns na água do mar: Na^{1+} , K^{1+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^{1-} , Br^{1-} , SO_4^{2-} , CO_3^{1-} (Tab. A02). Na Mina Taquari-Vassouras ocorrem alguns destes minerais, apresentados a seguir (suas propriedades estão detalhadas na tabela anexa Tab. A03):

- **Anidrita (CaSO_4)**

Sulfato de cálcio anidro, ou seja, corresponde ao mineral formado após a desidratação da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Este processo reduz em até 60% o volume do mineral inicialmente hidratado (gipsita). A palavra anidrita provém do grego e significa 'sem água'.

- **Halita (NaCl)**

É o mineral evaporítico mais abundante em depósitos salinos e dissolvido na água do mar (Schléder, 2006). A halita começa precipitar quando sua concentração na solução alcança 27% (Mohriak & Szatmari, 2008). Sua facilidade à deformação se dá devido à sua estrutura cristalina cúbica, pequena valência de seus íons e grande raio iônico.

- **Silvita (KCl)**

A silvita é a principal fonte de compostos de potássio. Seu nome é proveniente do sal digestivus Silvii, designado pela química antiga para a denominação da família do cloreto de potássio. Ocorre sempre associado a halita.

- **Taquidrita ($2(\text{MgCl})\cdot\text{CaCl}_2\cdot12\text{H}_2\text{O}$)**

Nome de origem grega que significa 'água rápida', em alusão à grande capacidade deste mineral de se dissolver na presença de umidade. É extremamente higroscópico e apresenta alta fluidez e baixa resistência a esforços. Precipita-se nas fases finais de ciclos evaporíticos.

- **Carnalita ($\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot6\text{H}_2\text{O}$)**

Cloreto de potássio e magnésio hidratado. A carnalita precipita-se a partir de salmouras altamente concentradas e é depositada singeneticamente. Pode se transformar em silvita a partir da dissolução do cloreto de magnésio (MgCl_2).

4.6 SEDIMENTAÇÃO DE EVAPORITOS

Evaporitos podem ser encontrados desde o Proterozóico até o Recente. Segundo Mohriak *et al.*, (2008) a deposição de sal é resultado da aridez climática, ausência ou diminuição do aporte de água por restrição de mar, redução da precipitação meteórica ou pela ausência de drenagens e pode se dar em ambientes marinhos (golfos, ambientes de mar restrito) ou em porções continentais (sabkhas, lagos salgados, lagunas).

A deposição de sal depende no entanto da evaporação de grandes volumes de água. Nas condições presentes é necessário que se evapore um volume de água do mar correspondente a 60 vezes o volume de sal precipitado (Mohriak *et al.*, 2008).

Depósitos Recentes são escassos e volumetricamente menos expressivos que exemplos passados. Os principais exemplos de ambientes deposicionais evaporíticos Holocênicos são o Mar Vermelho, Mar Morto, Golfo Pérsico, Afar, Região do Kara-Bogaz e Mar Cáspio.

Há mais de uma interpretação acerca de grandes eventos deposicionais evaporíticos: A consideração de parâmetros atuais de salinidade no mar, taxas de evaporação e solubilidade da água sobretudo implicariam em volumes muito grandes de água do mar para que a deposição de camadas de centenas de metros de sal pudessem se formar (Mohriak *et al.*, 2008).

Para explicar os grandes depósitos evaporíticos Aptianos do Oceano Atlântico, depósitos no Mediterrâneo e Mar do Norte propõe-se então diferentes modelos: Os modelos baseados no Uniformitarismo partem de condições climáticas similares às atuais, mantendo parâmetros de evaporação por energia solar e mudanças tectônicas para explicar a deposição. Mudanças drásticas de ambiente sedimentar podem também justificar a ocorrência da deposição de sal em grandes áreas. Há, no entanto, modelos mais complexos que consideram que fechamentos de bacia e evaporação somente não seriam suficientes para provocar desequilíbrios de magnitude tais a ponto de gerar depósitos de centenas de metros de espessura: Considera-se então que outros fatores, como vulcanismos por exemplo, possam ter provocado desequilíbrio na capacidade de dissolução de sais na água do mar devido a um aumento brusco de temperatura (Hovland *et al.*, 2006).

A hipótese mais aceita atualmente considera que espessas camadas de evaporitos são formadas em bacias sedimentares isoladas por barreiras naturais, que agiriam no impedimento do fluxo livre das salmouras (Mohriak *et al.*, 2008) e tem aplicações em bacias modernas e antigas. Segundo Taylor (1985). O modelo apresenta alguns princípios quais sejam:

- 1) Facies evaporíticas obedecem a uma ordem de precipitação de acordo com a solubilidade de diferentes sais;
- 2) Uma bacia evaporítica sofre vários e sucessivos influxos das águas salgadas do oceano;

- 3) Influxo e refluxo são controlados principalmente pela variação do mar principal, que se comunica com a laguna, que é isolada do mar por uma barreira.

Essa ordem de precipitação por solubilidade explica a sucessão estratigráfica de diferentes sais (Tab. 1).

4.7 SUCESSÃO DE DEPOSIÇÃO

A entrada e saída de água destes sistemas deposicionais são controladas por mudanças ambientais como aridez climática e aporte de água na bacia. Os ‘ciclos de salinidade’ resultam numa sequência deposicional que segue a ordem de solubilidade dos elementos presentes em água. A base de cada ciclo é marcada pela deposição de matéria orgânica (folhelhos negros, tomados como marcos estratigráficos (Fig. 12) e encerradas no topo pela deposição dos sais mais solúveis, como sais de magnésio e potássio (Mohriak & Szatmari, 2008) como a silvinita).

A sequência de deposição é apresentada na tabela (Tab. 1) a seguir:

Tab. 1: Componentes genéticos das rochas de sal e sequência numerada de deposição correspondente (Mohriak & Szatmari, 2008)

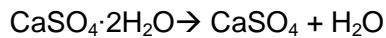
ZONA	Mineral Primário formador da Rocha	Minerais Secundários e minerais associados (diagenéticos e epigenéticos)	
BISCHOFITA	Borato Eutônico Bischofita Sulfato de Magnésio Carnalita Halita Gipsita	Boracita Kieserita Anidrita	6
CARNALITA	Carnalita Sulfato de Magnésio Kainita Halita	Kieserita Langbeinita Kainita Anidrita	5
SILVITA	Silvita Hexahidrita Epsomita Polihalita Halita	Kieserita Langbeinita Kainita Polihalita Anidrita	4
SULFATO DE MAGNÉSIO	Epsomita Hexahidrita Polihalita Halita	Kainita Langbeinita Kieserita Polihalita	3
HALITA	Halita Gipsita	Anidrita Polihalita	2
Gipsita-Anidrita	Gipsita	Anidrita	1

4.8 ORIGEM DE FLUIDOS

A mudança do gradiente termal pode levar à migração de fluidos através de poros e sistemas de fraturas. Estes fluidos podem ser aprisionados durante a cristalização ou cicatrização de fraturas em minerais. Cristais de sal são um bom exemplo deste processo já que evaporitos são facilmente deformáveis quando sujeitos a mudanças de pressão e temperatura em relação a outras rochas (Roedder, 1984). O conhecimento das taxas de fluidez e parâmetros de mudanças de temperatura na migração fluidos é de grande valia na consideração do uso de formações salíferas na disposição de resíduos radioativos (Roedder, 1984; Schléder, 2006).

Os fluido que permeia as rochas salinas não é necessariamente sinsedimentar: os fluidos podem surgir de estratos inferiores ou da percolação tardia de água meteórica das vizinhanças (Brochet & Muir, 1964 *apud* Schléder, 2006).

Segundo Brochet & Muir, 1964 *apud* Schléder, 2006, fluidos podem também ser gerados dentro do corpo salino, um exemplo disso é a conversão de gipso para anidrita (se o gipso foi depositado primeiro) seguindo a seguinte reação:



Essa reação pode resultar na liberação de até 40% de água estrutural que esteja saturada com CaSO_4 . Esta conversão é dependente de vários parâmetros como salinidade e pressão de poros e ocorre entre 70-105º C em profundidades que podem ir de poucos metros a poucos quilômetros (Schléder, 2006). Há indicações de que fluidos possam ser retidos durante a deposição e expelido durante a halocinese (Schmatz *et al*, 2011).

Pode haver liberação de água estrutural também durante a transição entre minerais de potássio (carnalita para silvita) através da seguinte reação:



Neste processo, no entanto, é necessário a entrada de água para que se faça a reação (Schléder, 2006).

4.9 INCLUSÕES FLUIDAS

Microfraturas e outras feições de deformação podem ser formadas durante o crescimento de um cristal. Inclusões fluidas podem se estabelecer durante processos de formação dos cristais e da sutura dessas microfraturas (Goldstein & Reynolds, 1994).

Cristais podem então encerrar amostras de fluidos em seus interiores e essa relíquia pode indicar composição e condições no momento de formação da rocha. Quando o fluido corresponde ao fluido presente durante a formação do cristal a inclusão é denominada *primária* enquanto inclusões formadas após a cristalização do mineral são denominadas *secundárias*.

A maioria das inclusões fluidas não mantém o mesmo formato que tinham no momento em que foram formadas. A área das inclusões no momento de formação é geralmente maior do que a área que se mantém. Se o mineral primário é solúvel no fluido pode haver recristalização e com isso a diminuição da área da inclusão mais primitiva que vai sendo 'estrangulada' e seccionada através de um processo chamado '*necking down*'. Ao passo que a recristalização progride o cristal vai sendo suturado e a estrutura reliquiar obtida é dada por cavidades menores onde uma ou mais fases podem coexistir. Por essa cristalização tardia o volume e formato da inclusão primária serão modificados invariavelmente. A Fig. 13 mostra a evolução e sutura a partir de uma inclusão primária através do processo de *necking down* e formação de inclusões secundárias.

As estruturas tendem ficar cada vez menos irregulares durante o *necking down* assumindo formas esféricas e globulares ou ainda na forma de cristais negativos. Isso se dá porque o equilíbrio tende a acontecer com a diminuição de superfície específica (inclusões globulares) ou a diminuição da energia de superfície, o que explica a abundância de cristais negativos cúbicos nos exemplares de halita (Roedder, 1984).

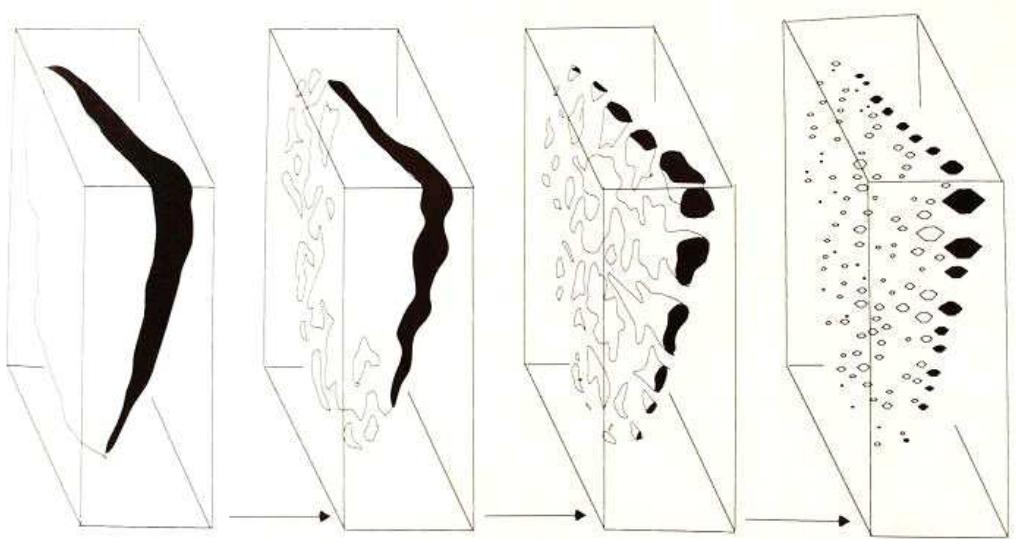


Fig. 13: Necking Down: Diagrama esquemático que demonstra os estágios de sutura de microfraturas em quartzo. No estágio final as inclusões tomam as formas do cristal (forma de cristal negativo). Geralmente as inclusões evoluem de maneira a assumir tais formas já que este é o estado mais estável (menor energia livre de superfície). (Roedder, 1984)

4.10 FORMAÇÃO DE FASES FILHAS (DAUGHTER PHASES)

Depois de um determinado volume de fluido ter sido aprisionado dentro de um cristal ele pode sofrer mudanças tanto de fase quanto do caráter físico de constituição da inclusão (Roedder, 1984). O fluido tende ser monofásico nas condições de temperatura e pressão em que foi aprisionado, a mudança dessas condições no entanto pode provocar o reequilíbrio e portanto o

aparecimento e coexistência de diferentes fases. As novas fases são denominadas ‘fases filhas’ (*daughter phases*) e caso sejam fases cristalinas ‘sólidos de saturação’ (*daughter crystals*). Segundo Roedder (1984) a maior parte das inclusões aquosas contendo minerais secundários como a halita contêm somente um cristal. Isso pode ser explicado principalmente porque a maioria das amostras demoram muito para resfriar da temperatura de aprisionamento à temperatura ambiente.

4.11 DETERMINAÇÃO DE AMBIENTES DIAGENÉTICOS

Muitas conclusões acerca do ambientes de formação podem ser tiradas através de feições reliquias mantidas em inclusões fluidas. O fluido é mais sensível e susceptível a mudanças no sistema (variação de temperatura e pressão) e pode se reequilibrar dando origem a novas fases. Uma inclusão fluida pode apresentar fases líquida, sólida e gasosa e a análise dessas feições pode indicar processos diagenéticos.

Goldstein & Reynolds (1994) apresenta uma série de diagramas com exemplos de reequilíbrio e remontagem do ambiente de formação à partir da interpretação de coexistência entre fases líquida e gasosa em inclusões fluidas (Fig. 14, Fig. 15 e Fig. 16).

		VADOSA	CONCLUSÃO
A	Reequilíbrio Térmico ↓		Vadosa; $T < 50^\circ C$; não sofreu aquecimento ($P = 1 \text{ atm}$)
B			Vadosa; $T < 50^\circ C$; aquecido ($P = 1 \text{ atm}$; vácuo ou alta)
C			Vadosa; $T < 50^\circ C$; aquecido ($P = 1 \text{ atm}$; vácuo ou alta)

Fig. 14: Distribuição das razões entre fases líquida e vapor dentro de uma inclusão fluida de zona vadosa. O tamanho e formatos são esquemáticos e podem variar. A) Assembléia anterior a qualquer reequilíbrio térmico. B) Assembléia posterior a reequilíbrio térmico moderado. C) Assembléia posterior a reequilíbrio térmico significativo (Goldstein & Reynolds, 1994).

		FREÁTICO – BAIXA TEMPERATURA	CONCLUSÃO
A	Reequilíbrio Térmico ↓		Freático -Baixa temperatura; $T < 50^\circ C$
B			Freático -Baixa temperatura; $T < 50^\circ C$; aquecido (P vácuo ou alta)
C			Freático -Baixa temperatura reequilibrado ou alta temperatura reequilibrado; (P vácuo ou alta)

Fig. 15: Distribuição das razões entre fases líquida e vapor dentro de uma inclusão fluida de zona saturada de baixa temperatura. O tamanho e formatos são esquemáticos e podem variar. A) Assembléia anterior a qualquer reequilíbrio térmico. B) Assembléia posterior a reequilíbrio térmico moderado. C) Assembléia posterior a reequilíbrio térmico significativo (Goldstein & Reynolds, 1994).

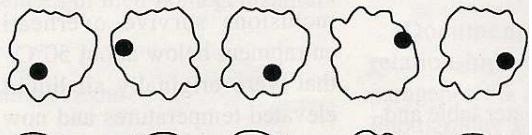
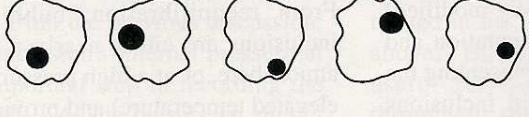
		SATURADA - TEMPERATURA ELEVADA	CONCLUSÃO
A	Reequilíbrio Térmico		T>50° C (90% é homogeneizado entre 10 e 15° C) ; (P vácuo ou alta)
B			Temperatura alta reequilibrada ou freático de baixa temperatura reequilibrado; (P vácuo ou alta)

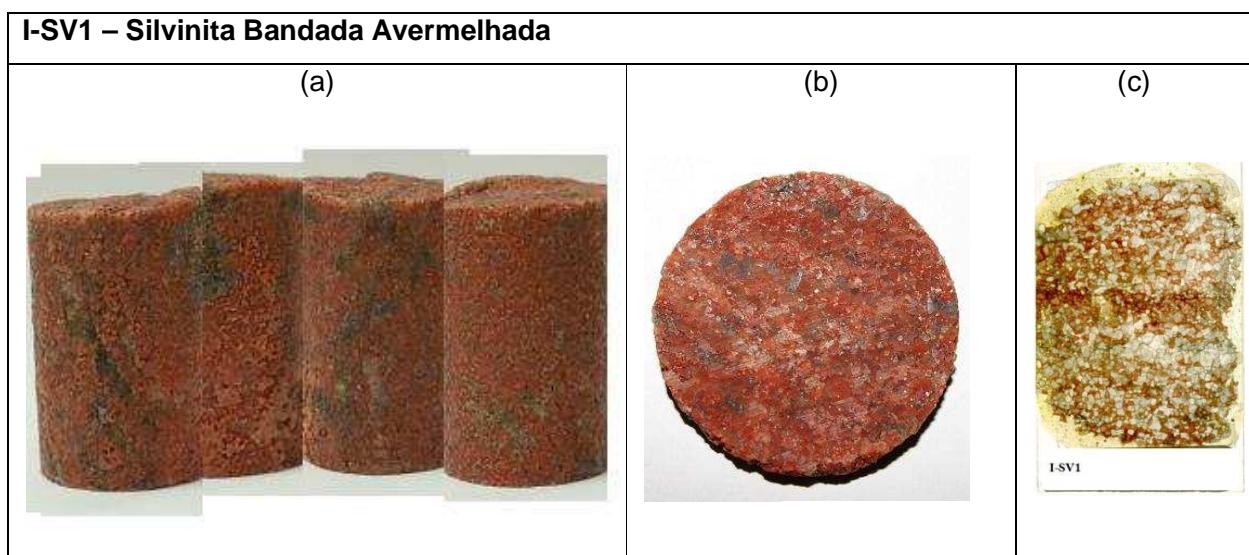
Fig. 16: Distribuição das razões entre fases líquida e vapor dentro de uma inclusão fluida de zona saturada de temperatura elevada. O tamanho e formatos são esquemáticos e podem variar. A) Assembléia anterior a qualquer reequilíbrio térmico. B) Assembléia posterior a reequilíbrio térmico(Goldstein & Reynolds, 1994).

5. RESULTADOS

5.1 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA

A descrição macroscópica das amostras de testemunhos é apresentada a seguir. Mais de um cilindro pode ter sido utilizado na produção de lâminas delgadas. A relação das amostras e seções delgadas relativas pode ser encontrada nos anexos.

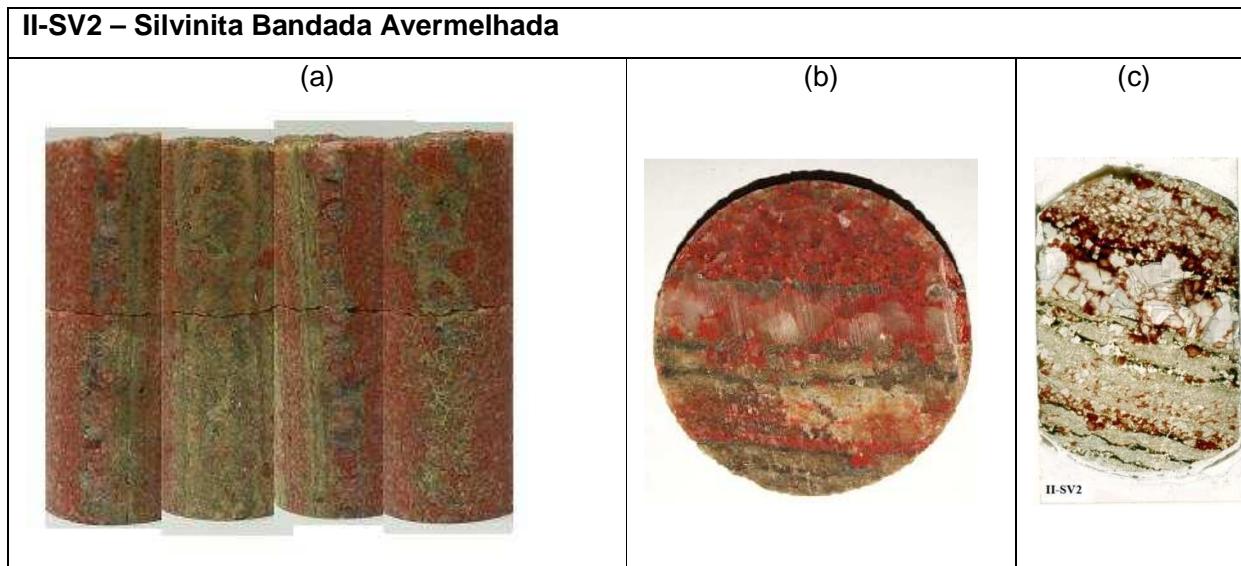
Tab. 2: Silvinita bandada: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).



Silvinita bandada avermelhada: Constituída por halita (55-65%) e silvita (35-45%), com ligeiro bandamento marcado por uma banda mais rica em silvita no centro da lâmina (Tab 02c) que separa duas bandas maciças de halita e silvita. Os concentrados de silvita são ligeiramente menores (1-2 mm) que os grãos de halita (2-3 mm).

- Microfacies Halita Milimétrica: Grãos de halita milimétrica (2-3 mm) euédrica. Nas porções onde não há silvita os grãos são relativamente maiores. Os contatos entre cristais são principalmente planares, seguindo as faces dos cristais de halita.
- Microfacies Silvita: o mineral se estabelece nos interstícios de cristais de halita em concentrados de 2-3 mm de espessura.

Tab. 3: Silvinita bandada: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).

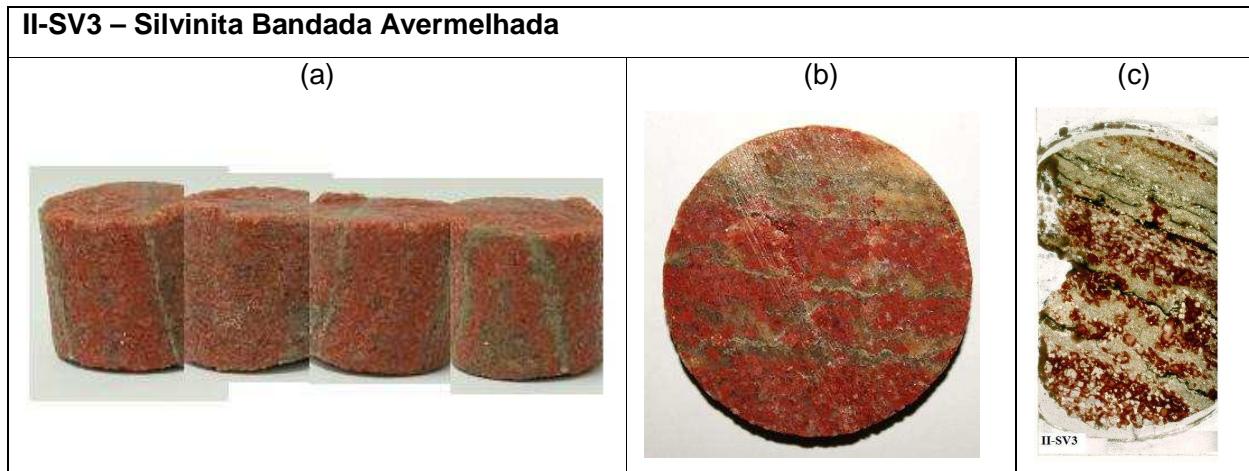


Silvinita bandada avermelhada: Constituída por halita (65-75%), silvita (20-25%) e matéria orgânica (5-8%). Silvinita bandada com intercalações centimétricas de bandas de halita microcristalina, bandas de halita milimétricas, bandas de halita centimétricas e silvita intersticial. Há também bandas milimétricas de matéria orgânica nos limites das microfacies.

- Microfacies Halita Centimétrica: Camada de 1,5-2cm limitada por lâmina submilimétrica de matéria orgânica e silvita em um dos lados e por halita microcristalina do outro. Grãos de halita cristalina centimétrica compactadas quimicamente, em contatos intergranulares côncavo-convexos.
- Microfacies Halita Milimétrica: Camada de aproximadamente 1,5cm limitada em seu topo e base por bandas milimétricas ricas silvita. Grãos milimétricos alongados de halita compactados quimicamente formando contatos suturados. Em algumas porções há silvita avermelhada envolvendo os grãos de halita, neste caso os grãos de halita têm bordas irregulares.
- Microfacies Halita Microcristalina: Camadas de 3-6mm limitadas no topo e base por halita milimétrica associada a silvita. Grãos submilimétricos de halita compactados quimicamente formando principalmente contatos suturados. Pontualmente há silvita avermelhada em interstícios de conjuntos de grãos. Os grãos associados à essa feição tendem ser ligeiramente maiores e mais bem formados que a moda.
- Microfacies Silvita Intersticial: Concentrados de silvita associados a cristais milimétricos-centimétricos de halita, sempre nos interstícios

- Matéria Orgânica: Lâminas de 0,5-0,8mm de matéria orgânica intercalando camadas das demais microfacies.

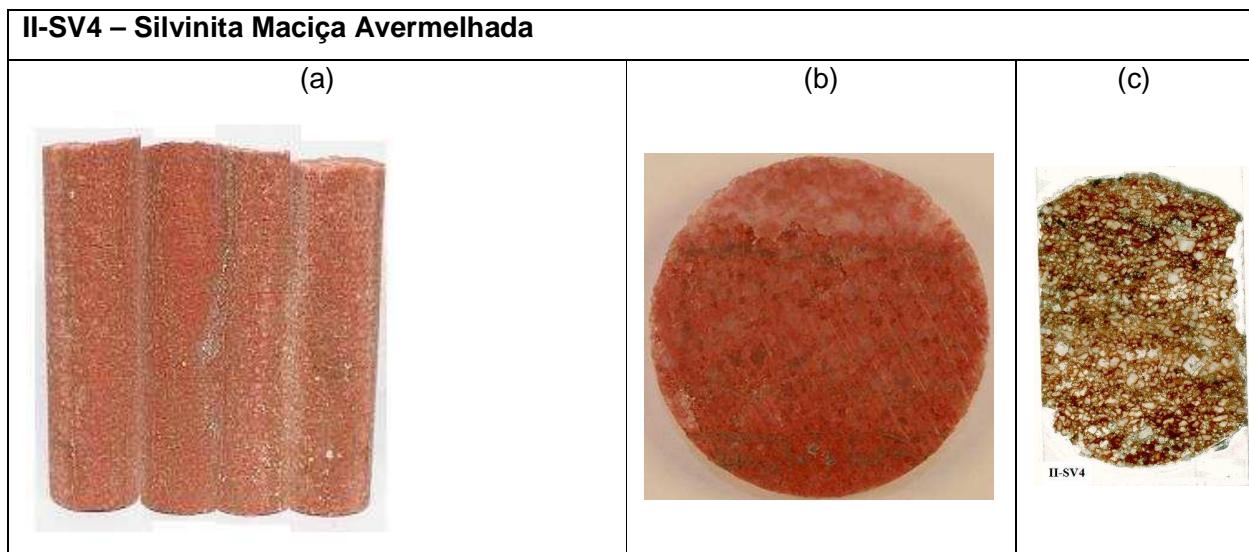
Tab. 4: Silvinita bandada: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90º; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).



Silvinita Bandada Avermelhada: Constituída por halita (55-65%), silvita (30-40%) e matéria orgânica (5-8%). Silvinita bandada composta por camadas intercaladas de halita fina bimodal, concentrados de silvita envolvendo grãos de halita. A ocorrência de maiores concentrações de silvita se dá principalmente nos contatos com camadas de halita microcristalina. Onde os cristais de halita são mais bem desenvolvidos a silvita tende estar em menor quantidade ou se estabelecer nos interstícios.

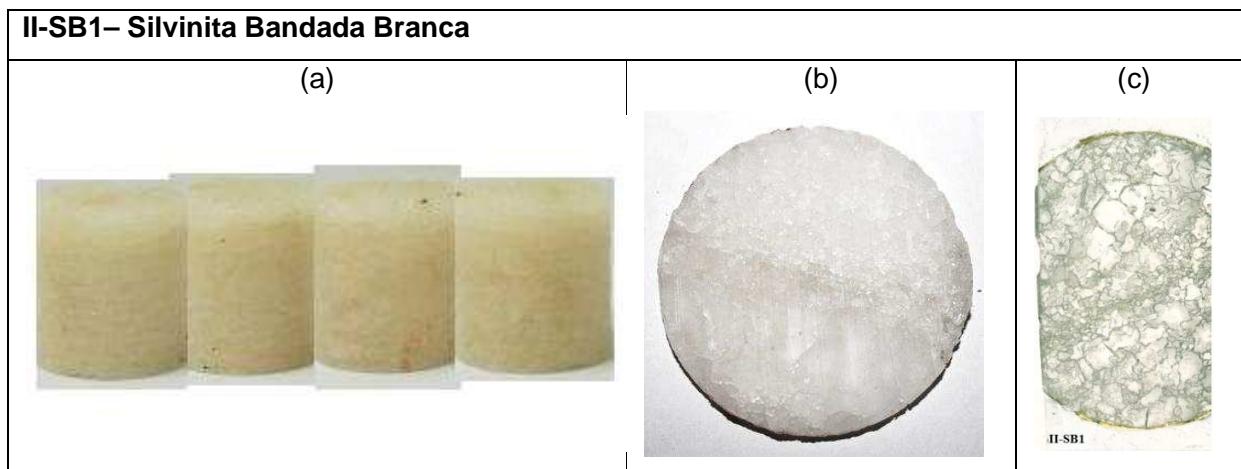
- Halita fina bimodal: Halita fina bimodal sendo grãos submilimétricos (0,2-0,5 mm) alongados e orientados seguindo o acamadamento permeada por halita microcristalina. Intercalada por lâminas de matéria orgânica e silvita.
- Microfacies Silvita Intersticial: Concentrados de silvita (0,2-0,6 cm) envolvendo grãos arredondados de halita.
- Matéria Orgânica: Lâminas de 0,5-0,8mm de matéria orgânica intercalada a camadas das demais microfacies.

Tab. 5: Silvinita maciça: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).



Silvinita maciça avermelhada: Arcabouço composto por grãos milimétricos de halita, representando aproximadamente 70-75% da composição da rocha. Compactação química intensa, com grãos corroídos em empacotamento aberto, cimentados por silvita avermelhada. Há também uma porção constituída por matéria orgânica, que se coloca entre os grãos de halita e parece ser anterior à cimentação por silvita.

Tab. 6: Silvinita bandada: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).



Silvinita Bandada Branca: Constituída por halita e silvita branca. As proporções dos minerais não pode ser definida através da análise petrográfica somente: Silvita branca pode ser diferenciada de halita por seu aspecto leitoso que se destaca da halita transparente. Neste caso, os dois minerais se mostram transparentes, o que dificulta a distinção e a estimativa de suas proporções na rocha.

O exemplar apresenta bandamento incipiente e duas modas de dimensões granulares: os menores (45-50%) medem de 0,7-2 mm e os maiores (50-55%) de 5-9 mm. A compactação é do tipo química e os contatos majoritariamente suturados. Há um bandamento incipiente evidenciado pela concentração de grãos de mesmo tamanho em camadas.

Nas camadas onde há predominância de grãos menores, estes estabelecem principalmente contatos côncavo-convexos. Em outros casos os grãos formam cristais maiores e mais bem desenvolvidos, neste caso o contato tende ser suturado e mais irregular.

O contato entre os cristais maiores tende ser de planar, seguindo as faces do cristal, a côncavo-convexo.

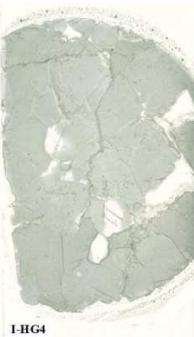
Tab. 7: Halita Grossa: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).

I-HG-2 – Halita Grossa Maciça		
(a)	(b)	(c) 

Tab. 8: Halita Grossa: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).

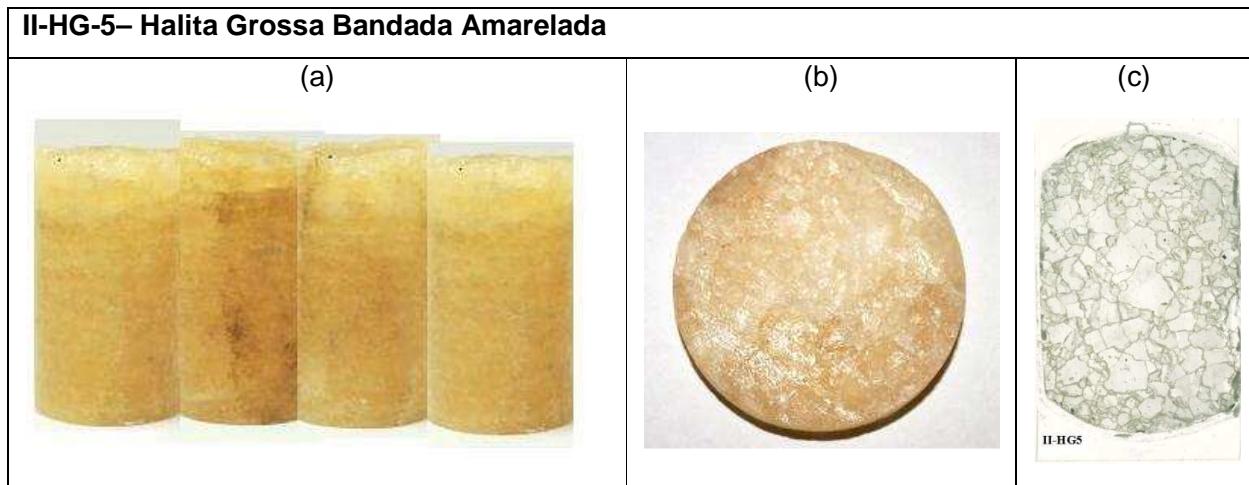
I-HG-3 – Halita Grossa Maciça		
(a)	(b)	(c) 

Tab. 9: Halita Grossa: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).

II-HG-4 – Halita Grossa Maciça		
(a)	(b)	(c) 

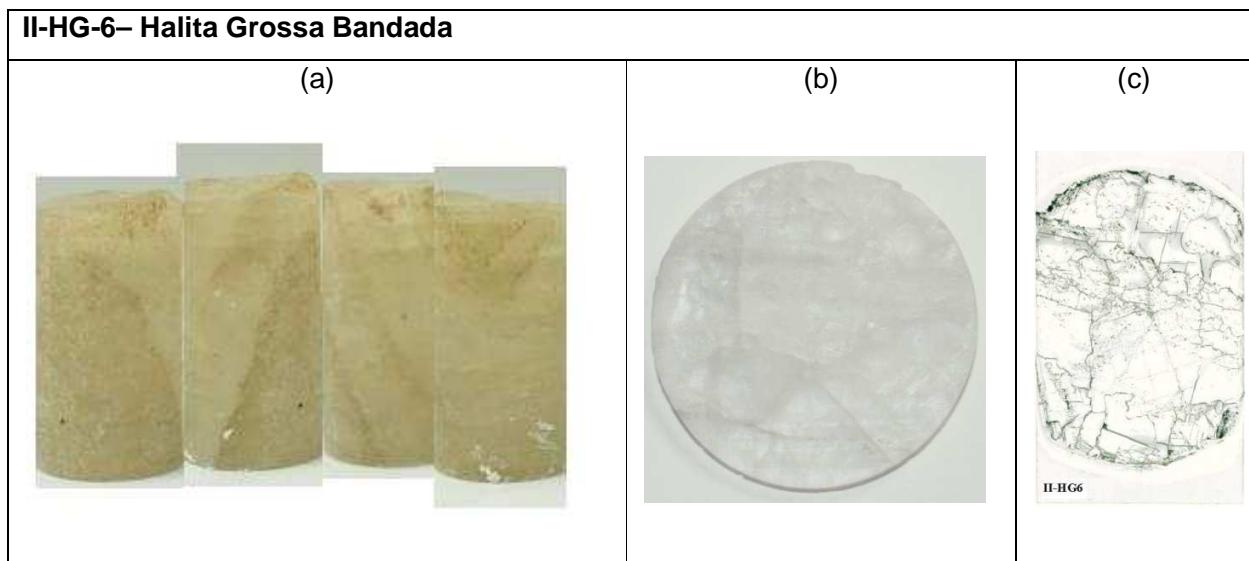
Halita Grossa Maciça: Os grãos são centimétricos, maiores do que a lâmina delgada produzida, de diâmetro aproximado de 2-3 cm perfazendo contatos relativamente planares, seguindo as faces dos cristais. O tamanho e limpidez dos cristais favorece a observação de feições particulares como trilhas retilíneas de pontos mais escuros, sub-milimétricos. As trilhas são contínuas entre os grãos, o que sugere que sejam posteriores à configuração granular presente.

Tab. 10: Halita Grossa: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).



Halita Grossa Bandada Amarelada: Grãos centimétricos, divididos em duas modas: Cristais com 2 a 5 mm e cristais maiores de 0,8 a 1,5 cm. Há um bandamento sutil produto da concentração de cristais de tamanho distinto em níveis. A trama sugere compactação química e os contatos são do tipo planares. Os cristais contém impurezas e trilhas de inclusões, que estão por vezes circunscritas aos grãos e em outros casos perpassam mais de um grão.

Tab. 11: Halita Grossa: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).



Halita Grossa Bandada: Grãos centimétricos de 0,5 a 2 cm. A amostra contém impurezas que perpassam os grãos. Os contatos entre grãos é plano principalmente, embora haja contatos suturados. Existem estruturas artefato, surgidas durante a manipulação da amostra, abruptas que podem ser confundidas com contatos intergranulares. Feições provenientes de cristalização no entanto são mais suaves e se destacam por relevo enquanto no caso de quebra do cristal formam-se ângulos retos resultado da clivagem do mineral.

Tab. 12: Halita Microcristalina Bandada: a) Composição de imagens: Testemunho cilíndrico (diâmetro 4cm) rotacionado a cada 90°; b) fatia do testemunho a partir da qual se produziu a lâmina (c).



Halita Fina: Halita microcristalina bandada, intercalada por lâminas milimétricas de matéria orgânica. Há grãos submilimétricos visíveis de halita. Ocorrem porções de halita escurecida devido à maior quantidade de matéria orgânica próximo às lâminas onde esta predomina.

5.2 MICROGRAFIA E INCLUSÕES FLUIDAS

Cristais de halita são texturalmente distintos em amostras monominerálicas e amostras de silvinita. A reação provocada pelo fluido proveniente da dissolução da carnalita provoca reações que resultam em feições reliquias de corrosão de borda, diminuição de tamanho de cristais e possível recristalização completa, já que observa-se menor quantidade e variedade de inclusões fluidas que em relação a halitas monomineralicas.

As imagens de inclusões fluidas são apresentadas na Tab. 13.

HALITA:

- **Texturas**

Nos casos onde os grãos têm dimensões centimétricas, os contatos intergranulares são essencialmente planares (seguindo as faces dos cristais) e há evidência de recristalização a partir de núcleos menores de halita. Nas amostras de grãos milimétricos, os contatos intergranulares são do tipo côncavo-convexo, com forte influência de compactação química.

- **Inclusões Fluidas**

Os exemplares de halita grossa (grãos >5 mm) apresentam inclusões fluidas abundantes. No exemplar de halita fina é possível encontrar inclusões fluidas nos grãos visíveis em meio à halita microcristalina.

Há trilhas de inclusões abundantes em todas as lâminas analisadas, ora tortuosas (que se assemelham a contornos pretéritos de borda de grão) ora retilíneas. Pode sugerir a divisão das inclusões em duas modas: de tamanhos inferiores a 10 μm e as maiores que 50 μm .

Em amostras de halita grossa (HG-n), há coexistência de pelo menos 2 fases nas inclusões fluidas (a amostra HG-5 apresenta inclusões trifásicas, com sólido de saturação). Destas inclusões, há fases que se mostram fluorescentes e bolhas que se extinguem completamente quando analisadas sob luz UV.

SILVINITA:

- **Texturas**

As bordas dos grãos de halita são arredondadas onde há silvita intersticial: Quando há bandas mais ricas em halita, esta tende apresentar grãos bem formados em contatos planares.

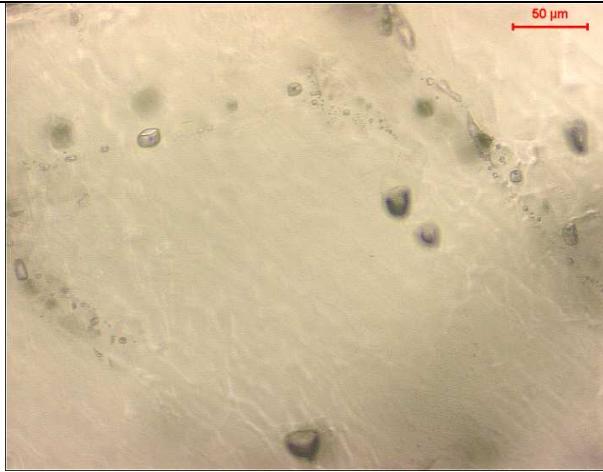
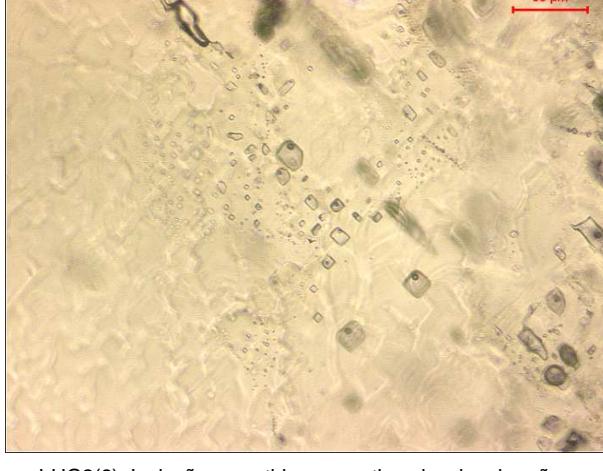
A silvita sempre permeia os grãos de halita e não forma grãos. Grãos de halita envolvidos por silvita são invariavelmente corroídos com evidentes bordas de reação.

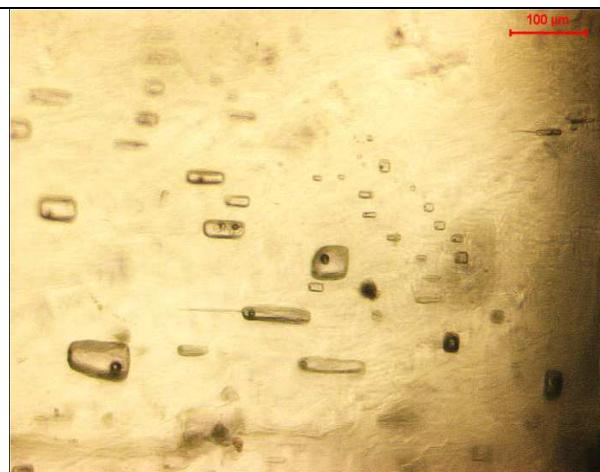
- **Inclusões Fluidas**

Os grãos de halita são ricos em inclusões fluidas. Inclusões bifásicas tendem ser maiores (até 50 μm) enquanto as monofásicas perfazem principalmente as trilhas e têm até 10 μm .

A silvita apresenta trilhas de inclusões fluidas micrométricas, observável apenas com lentes de aumento superiores a 40 vezes.

Tab. 13: Relação de fotomicrografias das seções delgadas de halita e silvinita.

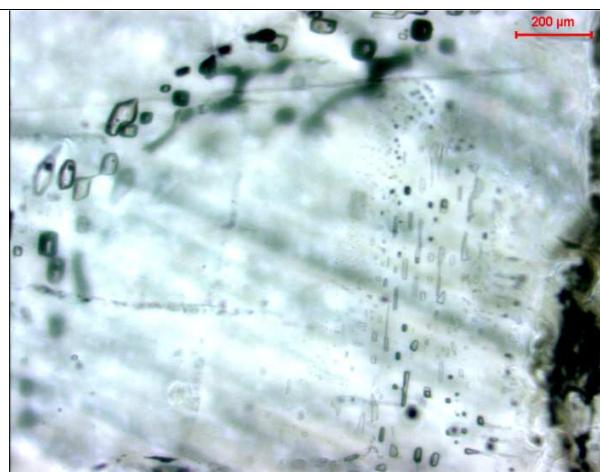
FOTOMICROGRAFIAS	
 A photomicrograph showing various inclusion trails (sutures) in different directions within a thin section of halite or sylvite. A red scale bar in the top right corner indicates 50 µm.	 A photomicrograph showing monophase and biphasic inclusions against a blue background. A red scale bar in the top right corner indicates 20 µm.
I-HG2 (1): Trilhas de inclusão (suturas) em diferentes direções	I-HG2 (2): Inclusões mono e bifásicas.
 A photomicrograph showing inclusions that have been preserved in old grain boundaries. A red scale bar in the top right corner indicates 50 µm.	 A photomicrograph showing an inclusion with necking down (strangulation). A red scale bar in the top right corner indicates 20 µm.
I-HG2(3): Inclusões mantidas em antigas bordas de grão	I-HG2(4): Inclusão com necking down (estrangulamento)



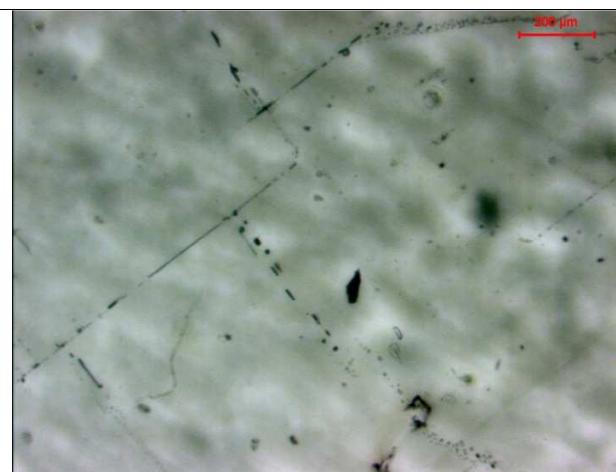
I-HG2(5): Duas assembléias de inclusões fluidas: processo de sutura incompleto em inclusões alongadas.



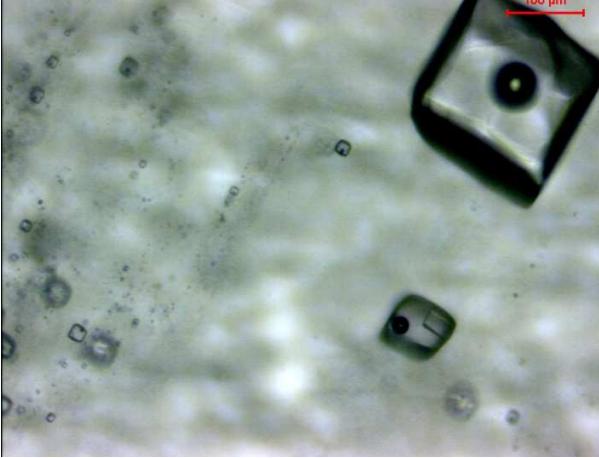
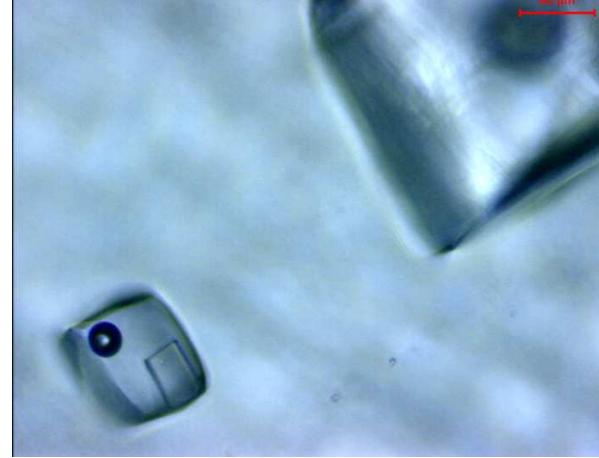
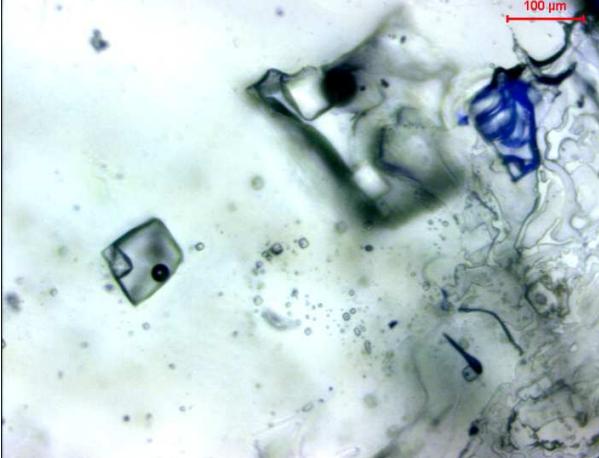
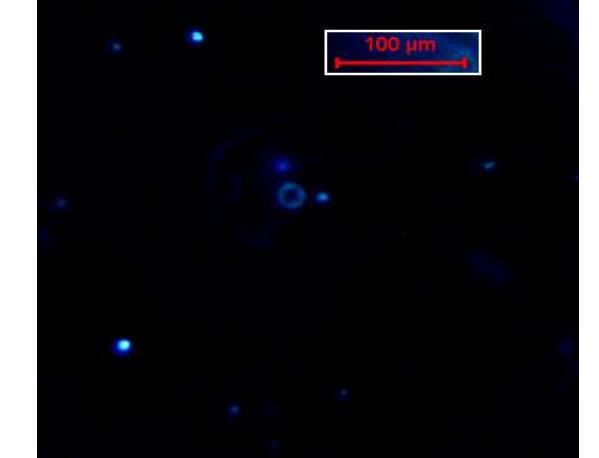
I-HG3(2): Cristal negativo com 'tail' reliquiário

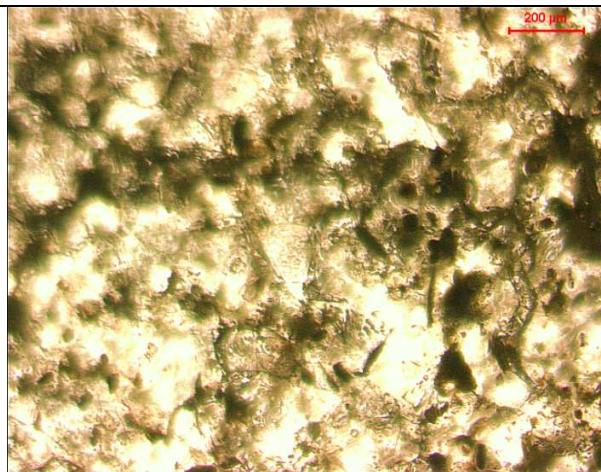


II-HG5(2): Trilhas de inclusões de diferentes tamanhos em diferentes direções (lado superior esquerdo e trilhas de inclusões em ângulos retos

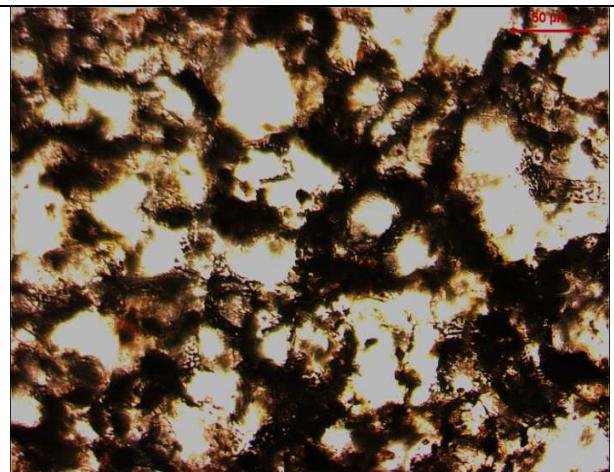


II-HG5(6): Cristal de halita: trilhas de inclusões fluidas em diferentes direções.

	
<p>II-HG5(7): Cristais negativos com sólidos de saturação em halita.</p>	<p>II-HG5(8): Inclusões Trifásicas: Cristais negativos com sólidos de saturação em halita.</p>
	
<p>II-HG5(12) Provável existência de óleo em inclusão fluida: pode-se observar fluorescência da bolha em II-HG5(12).</p>	<p>II-HG5(13): (Imagem de HG5(12) com nicóis cruzados - Fluorescência em uma das fases de inclusão.</p>



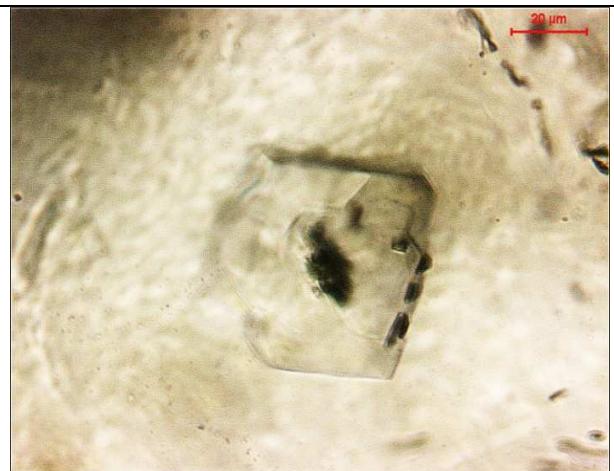
II-HF1(2): Textura geral do exemplar de halita fina. Lâminas de halita microcristalina com matéria orgânica finamente intercaladas.



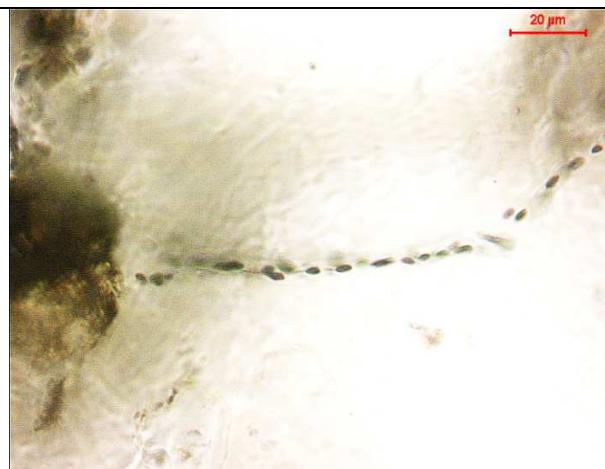
II-HF1(2): Halita microcristalina e matéria orgânica



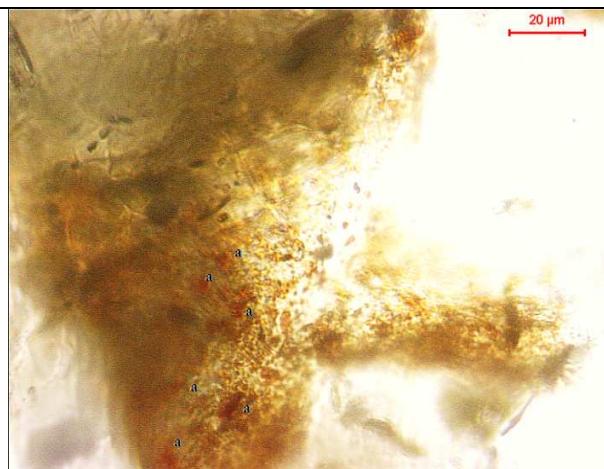
II-HF1(3): Matéria orgânica e halita



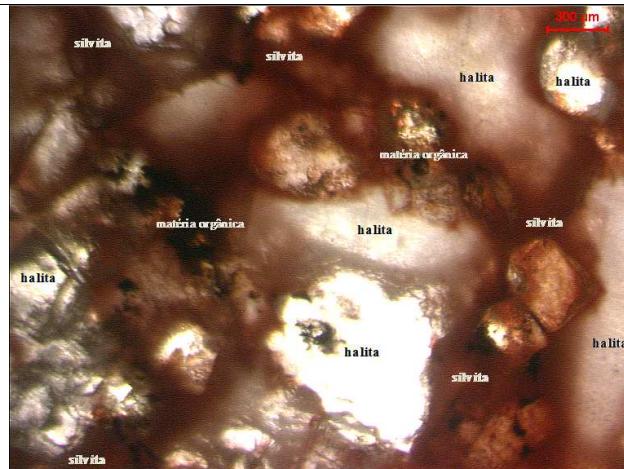
II-HF1(4): Inclusões fluidas, cristais negativos, em cristais milimétricos em meio à halita microcristalina.



II-HF1(5): Trilha de inclusões.



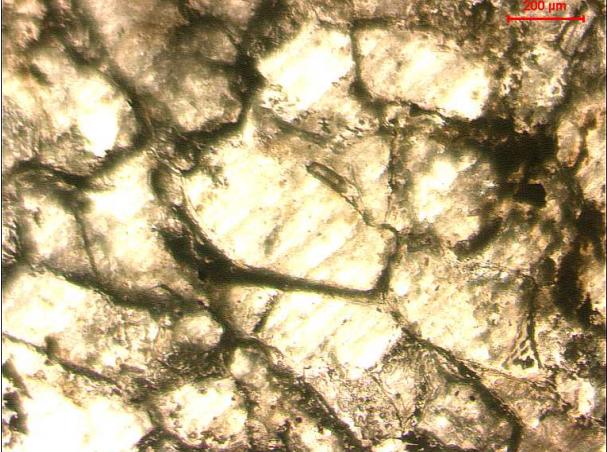
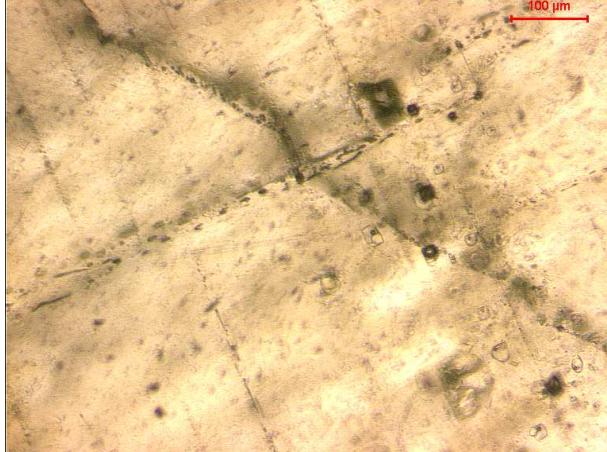
II-HF1(6): Amostra de halita microcristalina com nódulos de sylvita (a)

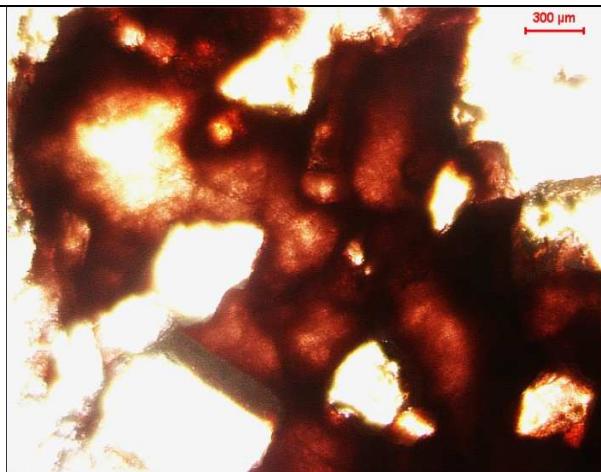


II-SV4(1): Cristais de halita envoltos por sylvita tardia e matéria orgânica.

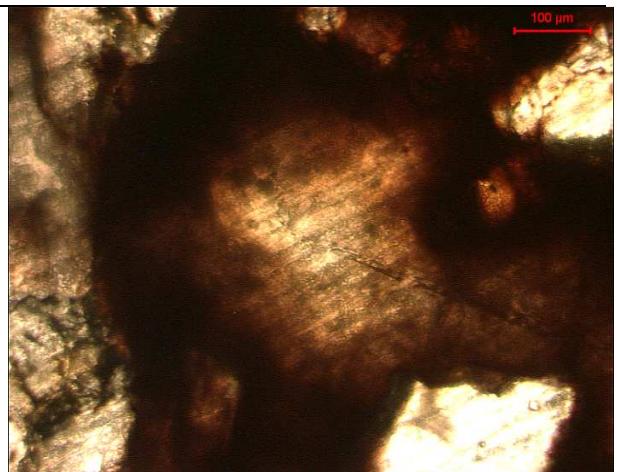


II-SV4(3): Trilhas de inclusões monofásicas em halita.

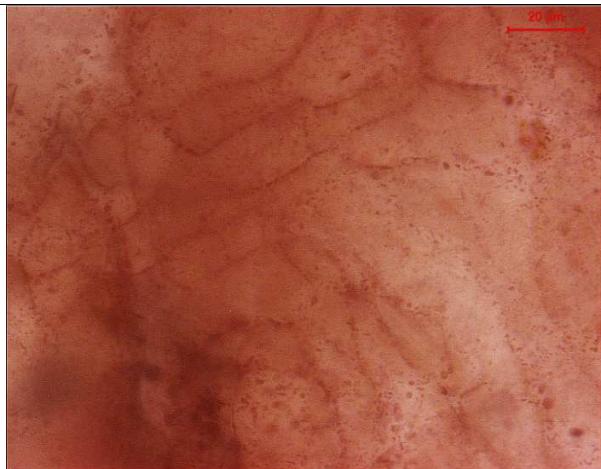
	
<p>II-SV4(7): Diferentes assembléias de inclusões em halita: Inclusões de diferentes tamanhos e em planos diferentes sugerindo diferentes fases de estabelecimento.</p>	<p>II-SV4(7): Sylvita epigenética em borda de halita: contato côncavo-convexo e preenchimento por sylvita sugerindo seu estabelecimento posterior aos cristais de halita.</p>
	
<p>II-SV2(3): Grãos recristalizados de halita em amostra de silvinita. Contatos angulosos entre cristais de halita e matéria orgânica disforme em limites de grãos.</p>	<p>II-SV2(5): Trilhas de inclusões fluidas em diferentes direções.</p>



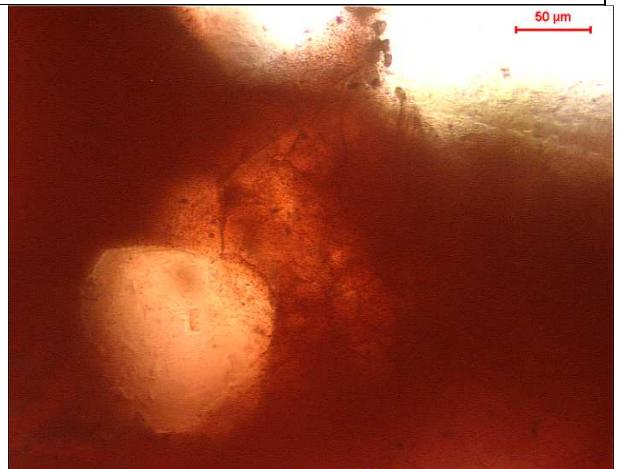
II-SV3(1): Sylvita tardia preenchendo bordas dos cristais de halita.



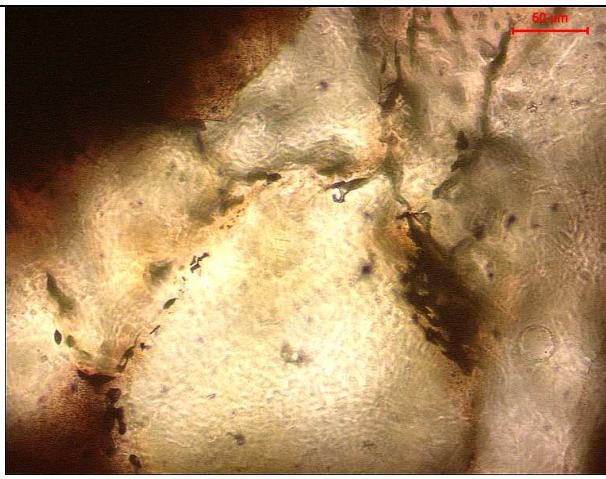
II-SV3(2): Núcleo de halita com borda de sylvita.



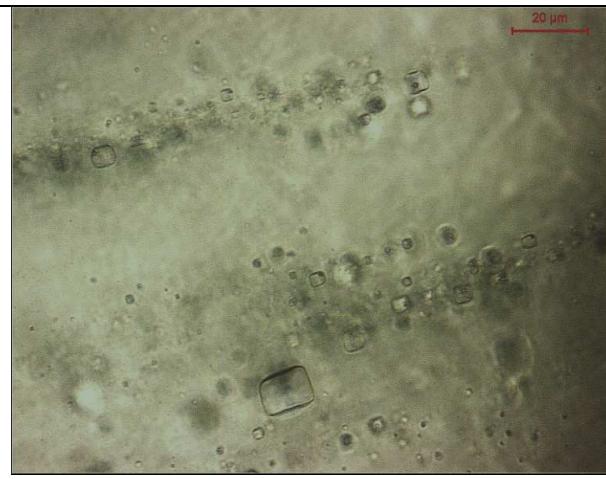
II-SV3(3): Trilhas micrométricas de inclusões fluidas em sylvita.



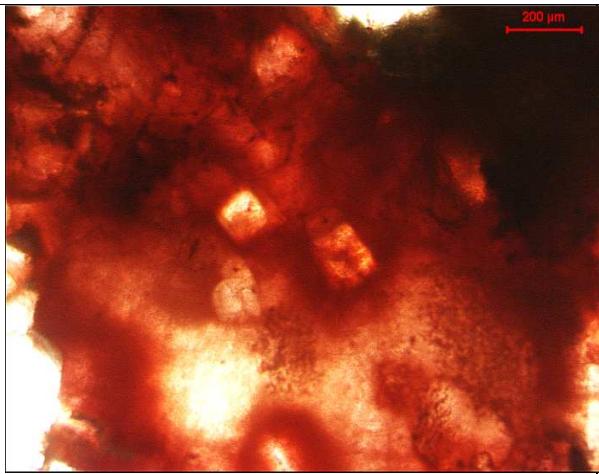
II-SV3(4): Núcleo de halita envolto por sylvita.



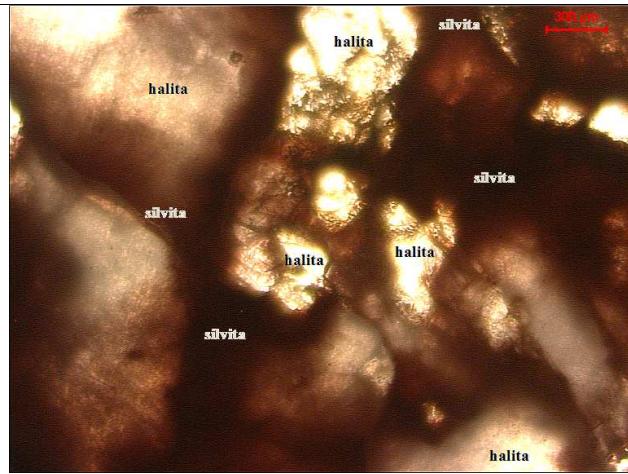
II-SV3(5): Pequenos bolsões de sylvita contornando grão de halita.



II-SV3(6): Inclusões monofásicas e bifásicas em halita.



II-SV3(8): Núcleos de halita em sylvita



II-SV3(9): Núcleos de halita envolvidos por sylvita (tardia).

6. DISCUSSÃO

Evaporitos têm em geral maiores taxas de fluência e menores resistências a esforços em comparação a rochas sedimentares terrígenas (Machado & Szatmari, 2008), e essas taxas variam de acordo com os litotipos em questão.

A solubilidade dos minerais evaporíticos, somada à sua resposta aos eventos deformacionais facilita o trânsito de fluidos por essas rochas, o que justifica a abundância de inclusões fluidas observadas nas lâminas petrográficas. A mesma facilidade à dissolução por essas rochas, no entanto, pode fazer com que sequências estratigráficas inteiras possam ser erodidas e eventos deformacionais possam ser mascarados, por dissolução e posterior reprecipitação em novas condições de equilíbrio (Schléder, 2006).

Os exemplares de halita grossa (grãos >5 mm) apresentam inclusões fluidas abundantes. No exemplar de halita fina é possível encontrar inclusões fluidas nos grãos visíveis em meio à halita microcristalina. Há trilhas de inclusões abundantes em todas as lâminas analisadas, ora tortuosas (que se assemelham a contornos pretéritos de borda de grão) ora retilíneas, sugerindo deformação rúptil. Pode –se sugerir a divisão das inclusões em duas modas: de tamanhos inferiores a 10 μ m e as maiores que 50 μ m.

Cristais maiores de halita mostram contatos intergranulares planares e menor influência de compactação química, diferentemente dos cristais menores (<5 mm). A compactação química acompanha a recristalização dos minerais, que pode ter causado a perda das feições microestruturais e microtexturais anteriores no caso das assembléias de cristais menores de halita.

Em amostras de halita grossa (HG-n), há coexistência de pelo menos 2 fases nas inclusões fluidas (a amostra HG-5 apresenta inclusões trifásicas, com sólido de saturação). Destas inclusões, há fases que se mostram fluorescentes e bolhas que se extinguem completamente quando analisadas sob luz UV, o que pode sugerir diferenças composticionais de conteúdo dessas inclusões

As bordas dos grãos de halita são arredondadas onde há silvita intersticial: Quando há bandas mais ricas em halita, esta tende apresentar grãos bem formados em contatos planares.

A silvita é um mineral secundário formado a partir da dissolução de carnalita (Machado & Mohriak, 2008; Schléder, 2006) e sua interação com cristais de halita é sempre evidenciada por feições de reação: cristais de halita apresentam borda de reação e tendem ser menores quando há silvita nos intertícios dos grãos.

A silvita sempre permeia os grãos de halita e não forma grãos. Além disso, inclusões fluidas são menos abundantes e menores em silvita, fatos que podem ser explicados pela sua ocorrência tardia como mineral secundário no sistema.

7. CONCLUSÃO

Observou-se que o mineral de halita tende se estabelecer em cristais bem formados nos exemplos monominerálicos. No entanto, a reação da carnalita (posterior no ciclos de deposição) e a produção de silvita como mineral secundário, promove a recristalização das bordas de halita quando a silvita se estabelece em seus interstícios.

Há uma relação entre tamanho de cristal e coexistência de diferentes assembléias de inclusões fluidas: os cristais menores, associados a feições de reação, compactação química e recristalização, apresentam menos variedades de inclusões: o que pode ser explicado pela perda de parte do registro diagenético devido à dissolução. Os cristais maiores, no entanto, são mais bem formados, possuem bordas regulares, e carregam um número maior de assembléias de inclusões. A abundância de diferentes tipos de inclusões fluidas em halita (gás, óleo e sólidos de saturação) indica diferença composicional de fluidos e com isso diferentes eventos deformacionais aos quais estes litotipos possam ter sido submetidos.

O mineral silvita é pobre em inclusões (há trilhas micrométricas de inclusões, visíveis com aumento de 40 vezes), o que se explica pelo seu estabelecimento tardio nos interstícios de cristais de halita e a ausência de formação de grãos.

Como não se conhece os estratos de proveniência das amostras, não se pôde estabelecer correlações temporais ou evolutivas com os dados obtidos. Uma amostragem sistemática do pacote evaporítico do Ciclo VII com um estudo microestrutural de detalhe pode no entanto contribuir para a compreensão da evolução da bacia e da migração de fluidos na Formação Muribeca.

ANEXOS

Tab. A01: Relação de amostras e lâminas delgadas correspondentes.

Litotipo	Etapa	Amostra	Lâmina	Litotipo	Etapa	Amostra	Lâmina
Silvinita	I	SV1	I - SV1	Halita	I	HG2	I - HG2
Silvinita	II	SV2	II - SV2	Halita	I	HG2	I - HG3
Silvinita	II	SV3	II - SV3	Halita	I	HG2	I - HG4
Silvinita	II	SV1	II - SV4	Halita	II	HG5	II - HG5
Silvinita	II	SB1	II - SB1	Halita	II	HG6	II - HG6
				Halita	II	HF1	II - HF1

Tab. A02: Composição dos principais evaporitos.

MINERAL	COMPOSIÇÃO
Calcita	CaCO_3
Magnesita	MgCO_3
Dolomita	$\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$
Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)2.2\text{H}_2\text{O}$
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anidrita	CaSO_4
Halita	NaCl
Kainita	$\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl}_3\text{H}_2\text{O}$
Kieserita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Langbeinita	$\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$
Silvita	KCl
Carnalita	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Taquidrita	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Bischofita	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Polihalita	$\text{K}_2\text{CaMg}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Tab. A03: Aspectos químicos e cristalográficos dos evaporitos da Mina Taquari-Vassouras.

ANIDRITA	CaSO_4
Composição Química	CaO (41,2%), SO_3 (58,8%)
Sistema Cristalino	ortorrômbico, bipiramidal
Hábito	tabular ou prismático
Clivagem	{100},{010}, {001}
Densidade	2,89 – 2,98 g/cm ³
Dureza	3,00-3,50
Cor	branco a acastanhado.
Aspectos Diagnósticos	Caracteriza-se por suas três clivagens em ângulos retos. Distingue-se da calcita por sua densidade relativamente mais elevada e não reage com ácido clorídrico (HCl). Distingue-se da gipsita por sua dureza mais elevada.
HALITA	NaCl
Composição Química	Na (39,3%), Cl (60,7%)
Sistema Cristalino	isométrico; hexaoctaédrico
Hábito	cúbico
Clivagem	{001} cúbica, perfeita
Densidade	2,20 g/cm ³
Dureza	2,50
Cor	incolor ao branco
Aspectos Diagnósticos	caracteriza-se pela sua clivagem cúbica, pela translucidez e pelo sabor (“sal de cozinha”).
SILVITA	KCl
Composição Química	K (52,4%), Cl (47,6%)
Sistema Cristalino	isométrico; hexaoctaédrico
Hábito	cúbico ou hectaédrico
Clivagem	cúbica perfeita {010}.
Densidade	1,99 g/cm ³
Dureza	2,00 – 2,50
Cor	Branco. Pode apresentar tonalidades de vermelho, azul ou
Aspectos Diagnósticos	sabor mais amargo do que a halita

TAQUIDRITA	$2(\text{MgCl})\cdot\text{CaCl}_2\cdot12\text{H}_2\text{O}$
Sistema Cristalino	Trigonal
Hábito	Granular
Clivagem	ausente
Densidade	1,66 g/cm ³
Dureza	2,00
Cor	incolor, pode aparecer alaranjado
Aspectos Diagnósticos	Ao ser pressionado na mão, causa sensação de calor
CARNALITA	$\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot6\text{H}_2\text{O}$
Composição Química	KCl (26,81%), MgCl ₂ (34,19%), H ₂ O (39,0%)
Sistema Cristalino	ortorrômbico, bipiramidal
Hábito	maciço, granular
Clivagem	ausente
Densidade	1,60 g/cm ³
Dureza	1,00 – 1,50
Cor	Branco. Pode ser vermelho se houver inclusões de ferro.
Aspectos Diagnósticos	Ausência de clivagem, ruído característico ao ser pressionada por objetos pontiagudos (silvo). Sensação picante ao paladar.

BIBLIOGRAFIA

- Cainelli, C., Mohriak, W.U. 1999. Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the Eastern Brazilian continental margin. *Episodes*, **22**: 206-216.
- Campos Neto O.P.A., Lima W.S., Cruz F.E.G. 2007. Bacia de Sergipe-Alagoas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p.405-415.
- Carvalho Júnior, A. L. P., Alves, E. A. A. 2000. O planejamento de lavra da mina de Taquari-Vassouras. In Congresso Brasileiro De Mina Subterrânea, 1., Belo Horizonte. Instituto Brasileiro De Mineração. 13 P. 1 CD-ROM.
- Carvalho Júnior, A. L. P. 2005. Hidrogeologia e processos cársticos nas formações Muribeca, Riachuelo e Cotinguiba na Bacia Sergipe- Alagoas em Sergipe. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 129p.
- Cerdeira, R. M., Chaves, A. P. V., Wanderley, M. L.; Pereira, J. C., Pessoa, A. F. C., Monteiro, J. L. A. 1983. Jazida de potássio de Taquari-Vassouras, Sergipe. In Geologia e mineração Aracaju: PETROMISA, GEREX, ESAJU. Relatório Interno, 23pp.
- Dias, J. L. 2008. Estratigrafia e sedimentação dos evaporitos neo-aptianos na margem leste brasileira. In W. Mohriak, P. Szatmari & S.M.C. Anjos (eds.) *Sal: Geologia e Tectônica: Exemplos das Bacias Brasileiras*. 2, Beca, pp.: 222-231.
- Drury, M. R., Urai, J. L. 1990. Deformation related recrystallization processes. *Tectonophysics* **172**: 235-253
- Fontes, S. L. 2003. Planejamento da lavra dos pilares do painel E5D e desenvolvimento de layouts alternativos para os painéis de lavra da mina subterrânea de potássio Taquari-Vassouras. Monografia de Conclusão De Curso,Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo,81p.
- Goldstein R.H. & Reynolds T.J. 1994. *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. Oklahoma, SEPM Short Course nº 31, 198p.

Hovland, M., Kutznetsova, T., Rueslatten, H., Kvamme, B., Johnsen, H. K., Fladmark, G. E., Hebach, A. 2006. Sub-surface precipitation of salts in supercritical seawater. *Basin Research*, **18**: 221-230

Machado, E. C. V., Szatmari, P. 2008. A Mina De Taquari-Vassouras *In W. Mohriak, P. Szatmari & S.M.C.Anjos (eds.) Sal: Geologia e Tectônica: Exemplos das Bacias Brasileiras.* 2, Beca, pp.: 417-426

Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G.V., Stica, J. M., Winter, W. R., Caixeta, J. M. Pessoa Neto, O da C. 2007. Boletim de Geociências Petrobras, **15**: 183-205.

Mohriak, W., Szatmari, P. 2008. Introdução às propriedades químicas e físicas dos evaporitos. *In W. Mohriak, P. Szatmari & S.M.C.Anjos (eds.) Sal: Geologia e Tectônica: Exemplos das Bacias Brasileiras.* 2, Beca, pp.: 222-231.

Mohriak, W., Szatmari, P. & Anjos, S.M.C. (Eds.) 2008. *Sal: Geologia e Tectônica. Exemplos das Bacias Brasileiras.* Ed. Beca, São Paulo, 450 pp.

Passos, J. P. 2012. Aspectos diagnósticos dos horizontes litoestratigráficos da mina de potássio Taquari-Vassouras, Nordeste do Brasil. Monografia de conclusão de curso. Universidade Federal do Sergipe, 94p.

Petri, S., Fúlfaro, V. J. 1983. *Geologia do Brasil.* Edusp, São Paulo, 631pp.

Rancan C.C., Lira F.S., Nishimura E.M., Araújo A.L.N. 2009. O soerguimento do domínio Macurué e sua influência na sedimentação turbidítica no Cretáceo Superior da Sub-bacia de Sergipe, Bacia de Sergipe-Alagoas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v.17, n.1, p.45-67.

Roedder, E. 1984. Fluid Inclusions: Mineralogical Society of America. *Reviews in Mineralogy*, v.12, 644pp.

Schléder, Z. 2006. Deformation mechanisms of naturally deformed rocksalt. Tese de Doutorado. Rheinisch-Westfaelischen Technischen Hochschule Aachen, 158p.

Schmatz, J., Schenk, O., Urai, J. L. 2011. The interaction of migrating grain boundaries with fluid inclusion in rock analogues: The effect of wetting angle and fluid inclusion velocity. Contribution Mineral Petrology, **162**: 193-208

Schoenherr, J., Reuning, L., Kukla, P. A., Littke, R., Urai, J. L., Siemanns, M., Rawahi, S. 2009. Halite cementation and carbonate diagenesis of intra-salt reservoirs from the late neoproterozoic to early cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin). International Association of Sedimentologists Journal **56**: 567-589.

Souza-Lima, W. 2008. Sequências Evaporíticas da Bacia de Sergipe-Alagoas /In W. Mohriak, P. Szatmari & S.M.C.Anjos (eds.) *Sal: Geologia e Tectônica: Exemplos das Bacias Brasileiras*. 2, Beca, pp.: 232-251

Szatmari, P., Carvalho, R. S., Simões, I. A., Tibana, P., Leite, D. C. 1974. Evaporitos de Sergipe. Petrobras RPNE 4v. v3.

Taylor, J. C. M. 1985. The role of evaporites in hydrocarbon exploration. Geological Society of London, 324p.

Van Gent, H., Urai, J. L., Keijzer, de M. 2010. The internal geometry of salt structures: a first look using 3D seismic data from the Zechstein in Netherlands. Journal of Structural Geology 1-20.