



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

NICOLE MOUTINHO MONTEIRO

**DISCUSSÃO SOBRE HIDRATOS DE GÁS E A POSSIBILIDADE DE
OCORRÊNCIAS NA BACIA DA FOZ DO AMAZONAS**

BELÉM - PARÁ

2019

NICOLE MOUTINHO MONTEIRO

**DISCUSSÃO SOBRE HIDRATOS DE GÁS E A POSSIBILIDADE DE
OCORRÊNCIAS NA BACIA DA FOZ DO AMAZONAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA) em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Estanislau Luczynski

BELÉM - PARÁ

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

M772d Monteiro, Nicole Moutinho
Discussão sobre hidratos de gás e a possibilidade de ocorrências
na Bacia da Foz do Amazonas / Nicole Moutinho Monteiro. —
2019.
36 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Estanislau Luczynski
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de
Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará,
Belém, 2019.

1. Geofísica. 2. Hidratos de gás. 3. Bacia da Foz do
Amazonas. I. Título.

CDD 333.823309811

NICOLE MOUTINHO MONTEIRO

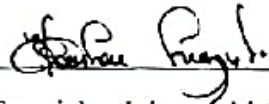
**DISCUSSÃO SOBRE HIDRATOS DE GÁS E A POSSIBILIDADE DE
OCORRÊNCIAS NA BACIA DA FOZ DO AMAZONAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA) em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

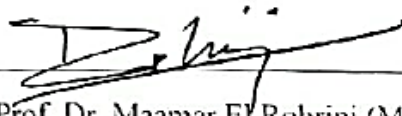
Data de aprovação: 11/07/2019

Conceito: B

Banca examinadora:



Prof. Dr. Estanislau Leczyński (Orientador)
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Maamar El Robrini (Membro)
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Raimundo Nonato do Espírito Santo dos Santos
(Membro)
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo suporte durante esses anos, principalmente aos meus pais por sempre me incentivarem.

Aos amigos que fiz dentro do ambiente acadêmico que acabaram por me ajudar no crescimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador que me deu direção para qual caminho seguir neste trabalho, além de sua paciência e ajuda sempre que havia algum questionamento de minha parte. E que também foi uma das pessoas mais importantes durante este último ano na Universidade.

À UFPA, seu corpo docente, direção, técnicos, auxiliando em conhecimentos que serão levados para a vida.

E a todos que indiretamente ou diretamente estiveram presentes na minha caminhada até aqui.

RESUMO

Os hidratos de gás (HG) são uma fonte de hidrocarbonetos com potencial para exploração futura. O armazenamento de gás natural (principalmente metano), em forma de cela (clatrato), mostra volume com interesse de aproveitamento: 1 m³ de hidratos (em condições de temperatura e pressão ideais) saturados tem 164 m³ de gás metano equivalente. Esses números conferem aos hidratos as maiores reservas dentre os recursos fósseis conhecidos, desde a descoberta dos mesmos na Sibéria, na década de 1960. No contexto presente, um dos principais focos da pesquisa é a busca por técnicas de melhor extração e transporte dos hidratos, em parte devido aos custos elevados de extração e os potenciais impactos ambientais. Perante isso, a realização de estudos geofísicos aliados à geologia é de grande importância para estimar as reservas. Projetos ocorrem no mundo todo em busca da extração comercial de hidratos de gás sempre levando em conta as informações geológicas e geofísicas, inclusive àquelas relacionadas a ocorrência de hidratos em território brasileiro. Presentemente, há poucos levantamentos relacionados aos hidratos no Brasil apesar dos recursos promissores na Bacia de Pelotas e na Bacia da Foz do Amazonas, essa última foco do presente trabalho a qual conta com, aproximadamente, 13 trilhões de m³ de gás em superfície comparados com as reservas (totais) brasileiras de 696 bilhões de m³ presentes nos clatratos. Estudos geofísicos e geológicos realizados na Bacia da Foz do Amazonas detectaram ocorrências de hidratos de gás na porção conhecida como Cone (ou Leque) do Amazonas. Essas ocorrências foram localizadas a partir de características distintas como o BSR (*Bottom Seismic Reflection*) e identificação de falhas/fraturas, que são rotas de migração de fluídos. Apesar da importância dessa descoberta para a Amazônia, ainda há necessidade de mais estudos a respeito. Diante disso, busca-se aprofundar as pesquisas na área, levando em conta o potencial gasífero, porém sem esquecer as questões ambientais, econômicas e exploratórias.

Palavras-chave: Geofísica. Hidratos de gás. Bacia da Foz do Amazonas.

ABSTRACT

Gas hydrates (HG) are a source of hydrocarbons with potential for future exploration. The storage of natural gas (mainly methane), in the form of cell (clathrate), shows volume of interest: 1 m³ of saturated hydrates (under ideal temperature and pressure) has 164 m³ of equivalent methane gas. These numbers point to hydrates as the largest reserves of known fossil resources since their discovery in Siberia in the 1960s. In the present context, one of the main focuses of the research is the to develop and improve hydrate extraction and also their transport techniques, partly due to the high extraction costs and the potential environmental impacts. Given this, geophysical studies combined with geology are of great importance for reserves feasibility. Projects occur around the world in search of economical extraction of gas hydrates, however taking into account geological and geophysical information, including those related to the occurrence of hydrates in Brazilian territory. Currently, there are a few hydrate-related surveys in Brazil despite promising resources at Pelotas and Foz do Amazonas Basins, the latter one is the focus of this paper. Such basin has approximately 13 trillion m³ of in situ gas compared to Brazilian reserves (total) of 696 billion m³ present in clathrates. Geophysical and geological studies conducted in the Foz do Amazonas Basin have detected occurrences of gas hydrates at region known as the Cone (or Fan) of the Amazon. These occurrences were located by very distinct characteristics such as BSR (Bottom Seismic Reflection) and fault's (or fracture's) identification, which are fluid migration routes. Despite the importance of this discovery for the Amazon Region, further studies are still needed. Given this, it is necessary more research in the area, taking into account the gas potential, but without forgetting the environmental, economic and exploratory issues.

Keywords: Geophysics. Gas hydrates. Foz do Amazonas Basin.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------|--|----|
| 5.1 | Localização da Bacia da Foz do Amazonas | 6 |
| 6.1 | Carta estratigráfica da Bacia da Foz do Amazonas | 8 |
| 6.2 | Condições de pressão e temperatura ideais para a termodinâmica do HG | 9 |
| 6.3 | Regiões de ocorrências de hidratos de gás | 10 |
| 6.4 | Localização dos sítios estudados no Leque do Amazonas, com ênfase em 1 poço | 12 |
| 6.5 | Pirâmide de recursos com detalhamento para hidratos de gás | 13 |
| 7.1 | Exemplo de BSR e Chaminé sísmica no Japão, na Bacia Joetsu | 15 |
| 7.2 | Exemplo de <i>bright spot</i> | 16 |
| 7.3 | Mapa de localização do Depósito de Massa de transporte ocidental com o sítio 941. A seta preta próximo a zona de queda indica o local da linha sísmica da figura 7.4 | 18 |
| 7.4 | Interpretação do perfil de reflexão sísmica indicado na figura 7.3 | 19 |
| 8.1 | Campo de Mallik, Canadá | 21 |
| 8.2 | Potencial de ocorrências de hidratos de gás no mundo | 22 |
| 10.1 | Métodos utilizados na extração dos hidratos de gás | 24 |
| 10.2 | Classes dos reservatórios de hidratos de gás | 25 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | JUSTIFICATIVA | 3 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 4 |
| 4 | OBJETIVOS | 5 |
| 5 | LOCALIZAÇÃO | 6 |
| 6 | GEOLOGIA REGIONAL | 7 |
| | 6.1 FORMAÇÃO E OCORRÊNCIA DE HIDRATOS DE GÁS | 8 |
| | 6.1.1 Hidratos de gás na Bacia da Foz do Amazonas | 11 |
| | 6.2 RESERVATÓRIOS CONVENCIONAIS E NÃO CONVENCIONAIS | 13 |
| 7 | A EXPLORAÇÃO DE HIDRATOS DE GÁS E O PAPEL DA GEOFÍSICA | 14 |
| | 7.1 MÉTODOS SÍSMICOS | 14 |
| | 7.1.1 Bottom seismic reflection | 14 |
| | 7.1.2 Chaminé sísmica e blanking | 15 |
| | 7.1.3 Bright spot | 16 |
| | 7.2 PERFILAGEM DE POÇOS | 16 |
| | 7.3 MÉTODO MAGNÉTICO | 17 |
| | 7.4 DADOS GEOFÍSICOS NA BACIA DA FOZ DO AMAZONAS | 17 |
| 8 | POTENCIAL MUNDIAL E BRASILEIRO | 20 |
| 9 | HIDRATOS DE GÁS E O MEIO AMBIENTE | 23 |
| 10 | POTENCIAL ECONÔMICO DOS HIDRATOS DE GÁS | 24 |
| 11 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 26 |
| | REFERÊNCIAS | 27 |

1 INTRODUÇÃO

A partir dos anos 1990 houve um aumento na demanda por gás natural (GN) para substituição de outros combustíveis em processos térmicos e industriais. Isso gerou uma corrida por novas descobertas e no incentivo ao desenvolvimento de tecnologias de reservatórios não convencionais. As indicações cada vez maiores de ocorrências de hidratos de gás (HG's), assim como o progressivo entendimento do volume e conteúdo energético, apontaram esse recurso energético como um dos mais promissores¹.

O armazenamento de gás natural em forma de cela (clatrato), principalmente de metano, mostra um conteúdo volumétrico com interesse de aproveitamento: 1m³ de hidratos saturados (em condições de temperatura e pressão ideais) tem 164m³ de gás metano equivalente (Kvenvolden, 1993). Esses números conferem aos hidratos as maiores reservas dentre os recursos fósseis conhecidos.

O início dos estudos sobre os hidratos de gás se deu na década de 1970, quando houve uma corrida para quantificação de reservas do composto. Desde então, os países interessados desenvolveram programas científicos voltados aos HG's, principalmente os Estados Unidos, Canadá, Japão, China, Rússia e Índia.

O conhecimento brasileiro em hidratos não é avançado e tampouco há corrida para a exploração, assim, dentro da realidade brasileira, o estágio de desenvolvimento tecnológico é baixo. Há registro que o ODP (*Ocean Drilling Program*) estudou a Bacia da Foz do Amazonas a partir de dados de poços e por seções sísmicas. Os resultados obtidos indicam a inferência da presença de hidratos na área, visto que, devido à expansão do gás natural, foram detectadas estruturas do tipo “colmeia” em argila que apontam para a ocorrência de GN (Flood et al., 1993).

Alguns dos estudos realizados são essenciais para o desenvolvimento futuro do assunto em território brasileiro, como Clennell (2000) que realizou pesquisas acerca dos hidratos em território brasileiro, além de Mello et al. (2001) o qual o foco dos estudos ocorreu no Leque do Amazonas. Ademais, teses e dissertações como a de Canário (2013), que trata de ocorrências na Bacia da Foz do Amazonas, e de Barros (2009), com foco no Cone do Rio Grande.

¹O presente trabalho trata dos hidratos que ocorrem naturalmente em diversas situações geológicas. Embora durante a fase de perfuração ocorra a formação de hidratos nos equipamentos.

Os principais estudos sobre hidratos de gás realizados na bacia foram realizados na área conhecida como Cone (ou Leque) do Amazonas, uma zona de interesse como produtora de gás natural em situação de talude marinho. Outra indicação que aponta para a existência de hidratos de gás é a associação desse recurso energético ao ambiente deltaico.

Não obstante, os estudos sobre hidratos também devem levar em consideração o fato de o GN está aprisionado em cristais de gelo, o que pode ser considerado como um tipo de reservatório não convencional de hidrocarbonetos.

2 JUSTIFICATIVA

Os hidratos de gás são compostos fósseis que apresentam a maior reserva de hidrocarbonetos existentes. Devido a isto, há um interesse grande em explorar este recurso para produção de energia.

Contudo, este apresenta entraves ambientais que devem ser contornados. Assim, pesquisas na área e campos de testes em hidratos buscam formas de reduzir a emissão de metano ou outro gás na atmosfera durante a extração deste. Todavia, isso demanda tempo e dinheiro, já que estes compostos se formam apenas em zonas onde há condições de temperatura e pressão ideais. Portanto, o eixo da pesquisa está em torno de descobrir como explorá-los sem interferir em sua estabilidade.

Sabendo-se que os hidratos não apresentam tantos estudos no Brasil, estudos acerca da Bacia da Foz do Amazonas foram analisados para melhor entender como a região Amazônica pode ser ainda mais importante na geração de energia a partir dos clatratos. Aliado a isso, o presente trabalho visa identificar a importância da Geofísica e da Geologia no mapeamento das ocorrências de HG's.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, as pesquisas foram realizadas a partir de revisão bibliográfica, com isso a metodologia partiu do princípio de buscar conhecimento pré-existente em livros, *sites*, notas de aulas, artigos, teses, dissertações e programas de estudo no assunto. A utilização do estudo realizado pelo *Ocean Drilling Program (ODP) – Volume 155 Initial Reports* foi de suma importância, visto que este era uma das poucas obras com ênfase na área em questão. Além disso livros como *Geophysical characterization of gas hydrates (2010)*, *Frozen heat: a global outlook on methane gas hydrates – Volume I (2014)* e artigos científicos.

4 OBJETIVOS

Geral:

Apresentar o conceito, explicando sua formação, processo de estabilização e locais de ocorrência dos hidratos de gás, expondo-o como uma possível fonte energética para o futuro, porém ressaltando as problemáticas ambientais a que estes estão relacionados.

Específicos:

- a) Analisar a aplicação dos métodos geofísicos que podem ajudar na identificação dos hidratos de gás, auxiliado por estudos geológicos do local, com ênfase na Bacia da Foz do Amazonas, pois esta carece de mais informações sobre o assunto em questão, de modo a tentar reunir os principais trabalhos realizados nessa região.
- b) Discutir o potencial econômico deste tipo de recurso no Brasil, levando em conta que, futuramente, as extrações tenham conseguido se estabelecer de tal forma que não haja escape em alta quantidade de gás para a atmosfera.

5 LOCALIZAÇÃO

A Bacia da Foz do Amazonas (Figura 5.1) encontra-se no extremo norte do Brasil e inclui porções do litoral dos estados do Amapá e do Pará (porção NE). Possui uma área de, aproximadamente, 350.000 km² contando com a plataforma continental, talude e a região de águas mais profundas. Apresenta limites à noroeste com o platô de Demerara e a sudeste com a Bacia Pará-Maranhão. Além disso, a área é banhada pelo Oceano Atlântico.

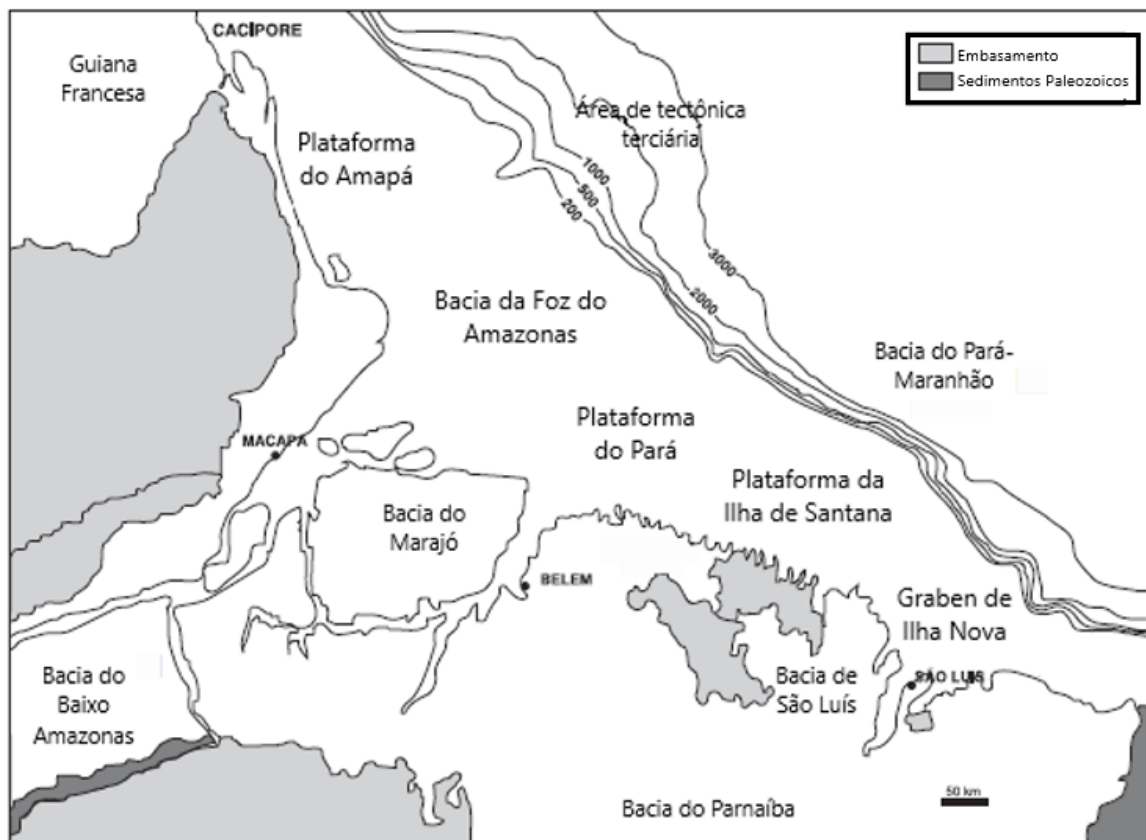


Figura 5.1: Localização da Bacia da Foz do Amazonas (Fonte: Mello et al., 2001).

6 GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia da Foz do Amazonas (FZAM) tem como, características marcantes as plataformas continentais do Pará e Amapá, sistema do hemi-graben do Caciporé e o sistema da Foz do Rio Amazonas (Mello et al., 2001). Os primeiros registros sedimentares da FZAM são representados por clásticos da megassequência pré-rifte, onde nota-se a presença da formação Calçoene. Esses sedimentos são cobertos pelas megassequências sin-rift e pós-rift.

Na fase de sin-rift, a Bacia está ligada ao evento de abertura dos oceanos, encontrando-se instalada sob uma margem do tipo transformante. Nesta fase, o espalhamento do Oceano Atlântico² aparece como principal agente de ramificações em zonas com fraturas, além de eventos de compressão ocorridos na margem oeste do continente sul-americano, que foi o causador do soerguimento da Cordilheira dos Andes, essa última com papel importante no preenchimento sedimentar da Bacia da Foz do Amazonas (Figueiredo et al., 2007).

Já na megassequência pós-rifte (também conhecida como marinha) existe uma divisão estratigráfica em três intervalos: a deposição de sedimentos na Formação Limoeiro, de sedimentação clástica marinha transgressiva; o segundo, que inclui deposição de sedimentos formadores de uma espessa plataforma carbonática representada na Formação Amapá, que lateralmente é limitada pelos arenitos da Formação Marajó, sendo que em direção ao eixo da Bacia ocorre sedimentação regressiva com ocorrência de sedimentos pelágicos distais da Formação Travosas; e o último intervalo, que é representado por uma cunha sedimentar clástica de sedimentos depositados, formando uma sedimentação espessa na Foz, conhecida como Grupo Pará (Bizzi et al., 2003) (Figura 6.1).

²Evento associado à separação do Supercontinente Pangea que deu origem à abertura do Oceano Atlântico ao norte.

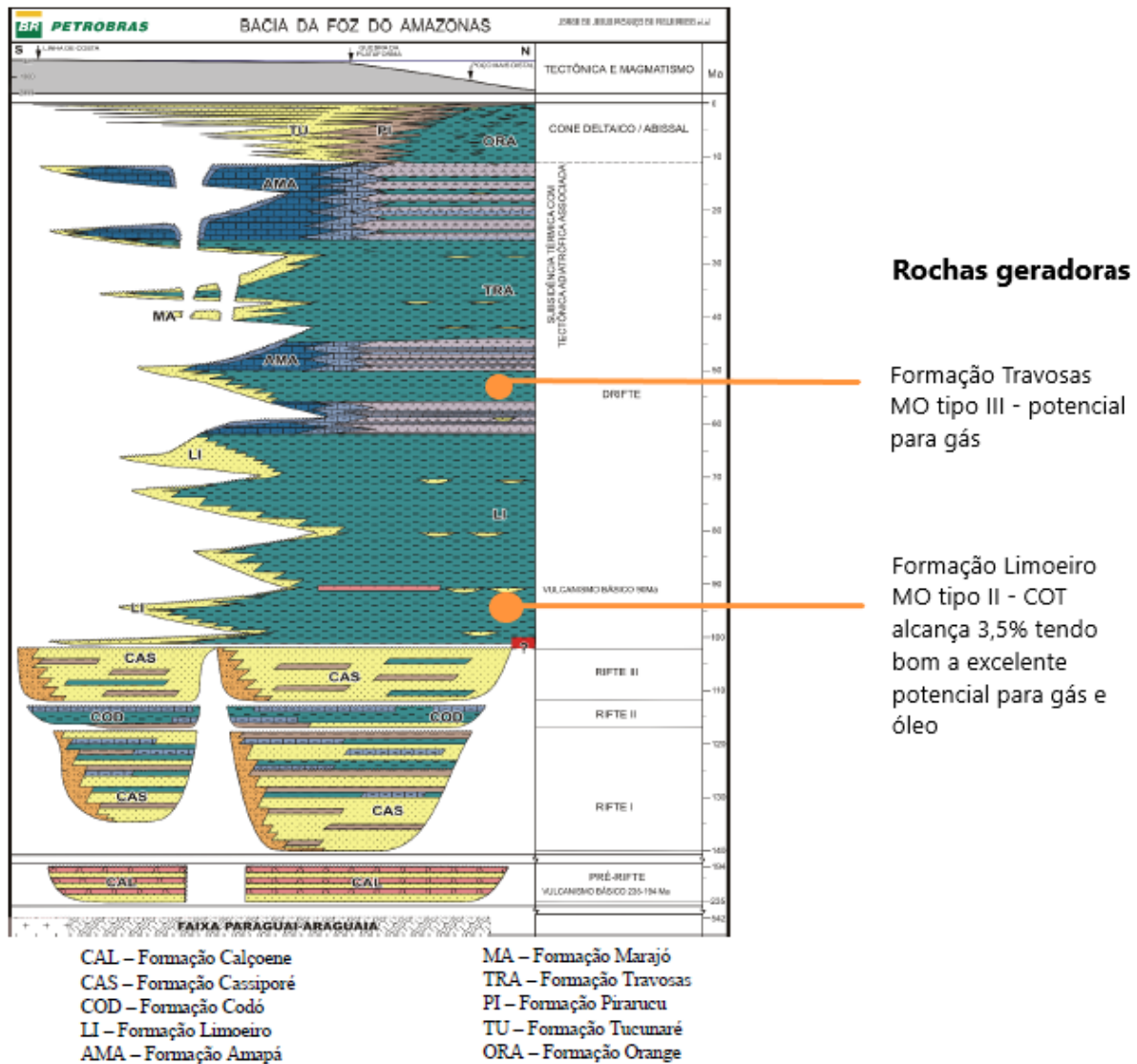


Figura 6.1: Carta estratigráfica da Bacia da Foz do Amazonas (Fonte: Figueiredo et al., 2007).

6.1 FORMAÇÃO E OCORRÊNCIA DOS HIDRATOS DE GÁS

Os hidratos de gás, também conhecido como clatratos (do grego significa “gaiola”), às vezes chamado erroneamente de hidrato de metano³, é uma estrutura composta basicamente por gelo e metano e às vezes com frações de etano, propano e butano.

³Dependendo da origem do gás natural, se termogênico ou biogênico, os hidratos de gás podem conter predominante metano (biogênico) ou metano com gases úmidos (termogênico). Portanto, a denominação de hidratos de metano não se apresenta correta pois há a mistura do metano com outros gases.

O sistema petrolífero dos hidratos de gás apresenta os mesmos elementos existentes em um reservatório convencional, porém o que faz deste um reservatório não convencional é a inclusão de características como a zona de estabilidade dos hidratos de gás, associada a baixas temperaturas e altas pressões, além de restrições por parte das moléculas de água para estas conseguirem formar estruturas ou “celas” que aprisionam o gás. (Riedel et al., 2010).

A formação do metano se dá de maneira termogênica ou biogênica. A forma biogênica é originada em decorrência da decomposição da matéria orgânica por meio de reações químicas, este evento ocorre em menores profundidades (menores que 1km) em comparação com a forma termogênica do metano e normalmente está associado à sedimentação deltaica/marinha. Esses recursos são originados nas Zonas de Estabilidade dos Hidratos de Gás (GHSZ) (Figura 6.2).

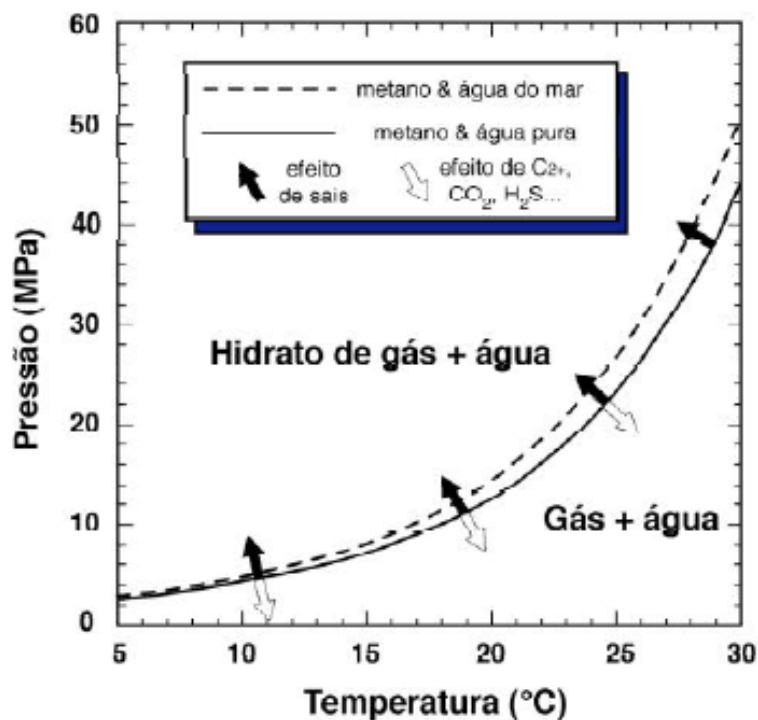


Figura 6.2: Condições de pressão e temperatura ideais para a termodinâmica do HG (Fonte: Clennell, 2000).

A evolução da temperatura (maturação termal) e pressão mudam o estado líquido (petróleo) para gasoso (gás natural), esse processo é conhecido como termogênese de gás. Quando a rocha reservatório não têm mais condições de reter o volume de óleo ou gás formados ocorre a migração. Em caso de sucesso, óleo e/ou gás encontram uma rocha reservatório com selante (armadilha) formando uma acumulação de interesse. Todavia, no caso dos clatratos, a migração do gás se dá através de pequenas fraturas ou falhas geológicas até encontrar a zona

de estabilidade onde ficará armazenado em gelo ou exudará (gas seeps) (Ginsburg e Soloviev, 1997) (Figura 6.3).

Apesar de as Zonas de Estabilidade dos Hidratos de Gás serem definidas por conta da pressão e temperatura, outros fatores apresentam-se como influenciadores para a estabilidade dos hidratos de metano, como: a salinidade da água, condições de porosidade e permeabilidade do solo, se há quantidade suficiente de gás natural naquela região, além de variações sazonais na temperatura da água e nas geotermas (EPE, 2016), além do valor de COT (Carbono Orgânico Total) que deve ocorrer entre 0,5% a 1% para que os hidratos de gás apresentem quantidade satisfatória. É importante entender que esse valor de COT não é encontrado em regiões marinhas profundas o que acaba por explicar a localização de clatratos nas áreas costeiras (Figura 6.3) (Gandara et al., 2015).

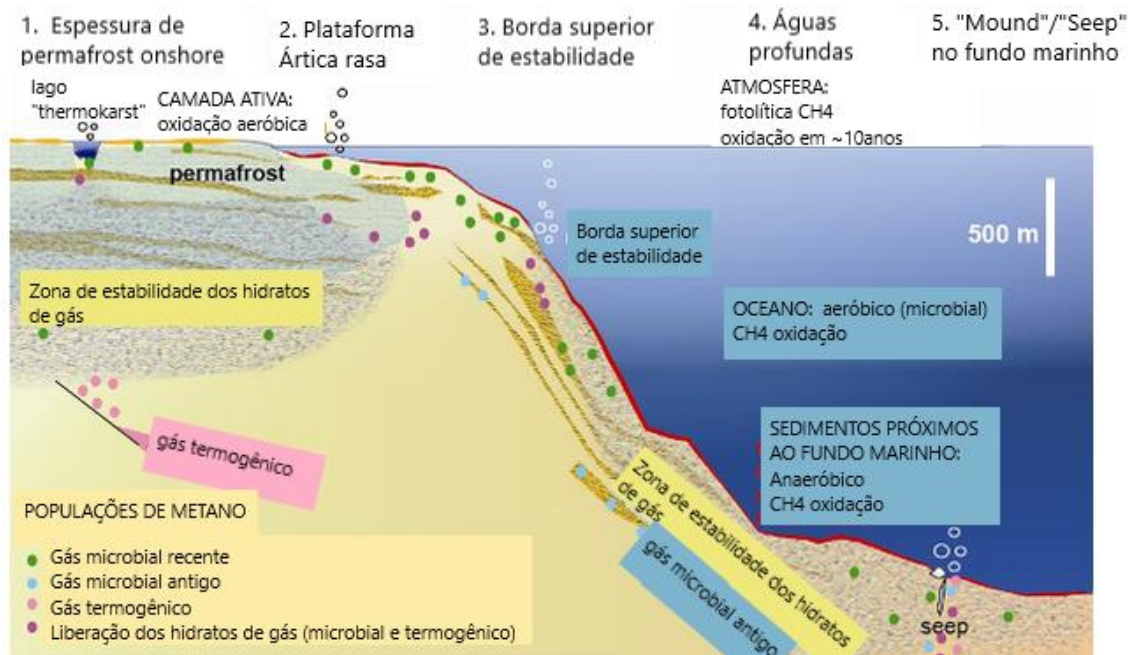


Figura 6.3: Regiões de ocorrências de hidratos de gás (Fonte: Ruppel., 2011)

De forma geral, a formação dos hidratos de gás em ambiente marinho está ligada com a substituição da água salina dos poros para hidratos de gás sólido. Com a inserção dos hidratos de gás nos poros a água salina é consumida e com isso perde propriedades condutivas, dando lugar a propriedades resistivas do hidrato gasoso que ocupa os poros. A presença dos clatratos com sedimentos aumentam a massa e o módulo de cisalhamento da rocha, com isso cresce, também, a velocidade de onda P e S (Riedel et al., 2010).

As áreas com potencial para gás (*gas prone*) ocorrem em regiões onde há mistura de matéria orgânica dos ambientes terrestre e marinho, conhecidos como deltas e/ou taludes

continentais. Para os hidratos de gás, essas áreas são locais com potencial para a formação destes. Além disso, os hidratos ocorrem em zonas de permafrost (Waite et al., 2014) próximos às regiões polares.

6.1.1 Hidratos de Gás na Bacia da Foz do Amazonas

A ocorrência de hidratos de gás na FZAM decorre principalmente na porção denominada Cone do Amazonas, onde há alta taxa de sedimentação, valores em torno de 1% de carbono orgânico, além de detritos orgânicos terrestres em grande quantidade e também sedimentos ricos em ferro (característicos da Amazônia), tais fatores resultam na alta produção de metano biogênico nesta área (Flood et al., 1994).

Muitos dos testemunhos coletados no Leque do Amazonas apresentam níveis elevados de carbono orgânico, como é típico de sedimentos lamosos de leque. Isso pode ser explicado por conta da diagênese inicial que ocorre ali, principalmente, em testemunhos próximos à um recente ponto de bifurcação do Canal do Amazonas com profundidade na água de 3600m. Possivelmente os sedimentos se acumulam de maneira rápida e imediatamente seguem o canal, permitindo a matéria orgânica tornar-se incorporada dentro dos sedimentos do leque⁴.

A formação dos hidratos de gás pôde ser inferida a partir de estudos nos sítios onde foram encontradas estruturas do tipo colmeia em lama, características de expansão de gás excessiva, aliados à dados de poços realizados.

Um dos sítios que sugere a presença de hidratos de gás é o sítio 941 (Figura 6.4) onde foi encontrado metano no furo realizado aliado às expansões extremas do gás e estruturas do tipo colmeia em argila, nas mediações de 45m abaixo do fundo marinho. Além disso uma amostra com água nos poros, retirada a 112m abaixo do fundo marinho, foi avaliada e constatou-se baixa salinidade (29.5) e cloreto anormalmente baixo, também taxas de magnésio pequenas; tais fatores provavelmente são devido a presença de hidratos nos poros. (Flood et al., 1994).

⁴Flood, R. D., Piper, D. J. W., Klaus, A., Leg 155 Scientific Prospectus: Amazon Deep-sea Fan. Ocean Drilling Program, 1993

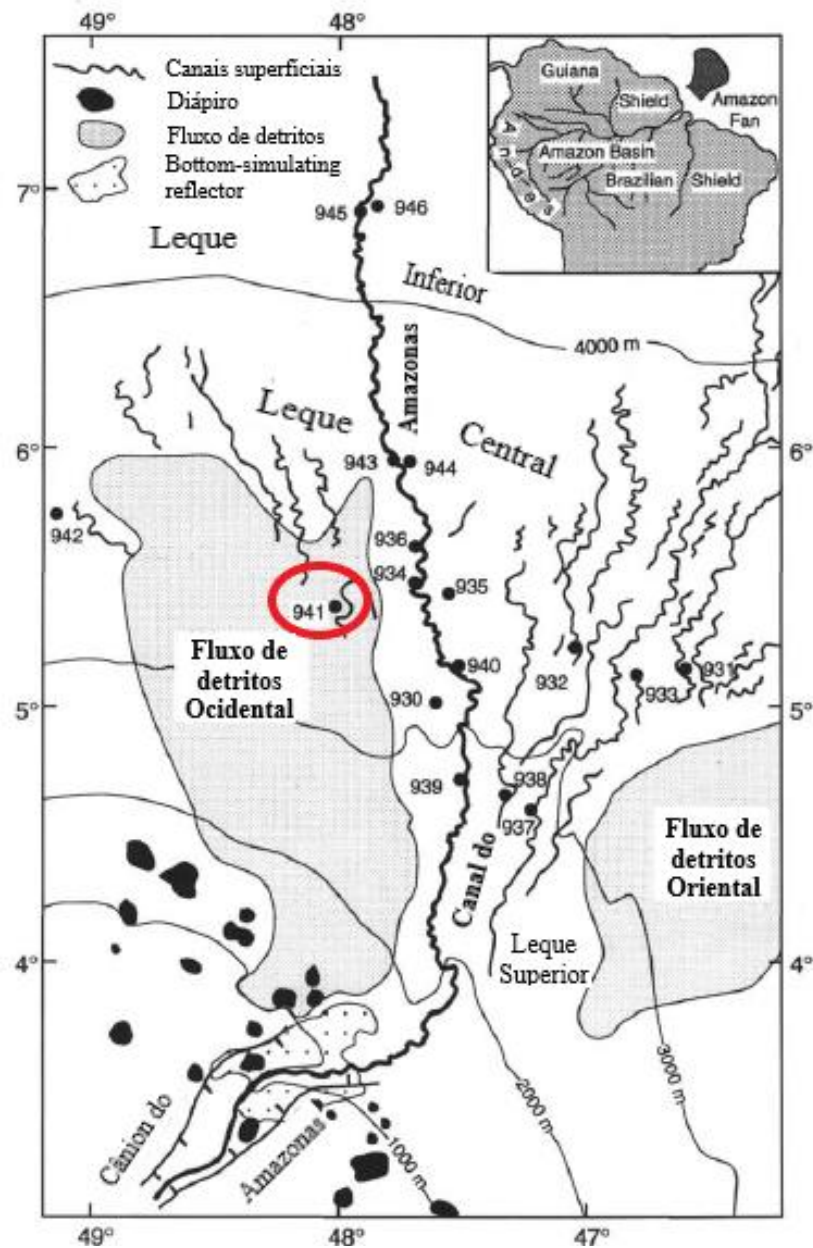


Figura 6.4: Localização dos sítios estudados no Leque do Amazonas, com ênfase em 1 poço. (Fonte: Flood et al., 1993).

Algumas situações que acontecem por conta do fluxo de gás, podem ajudar a determinar a presença de hidratos. Essas características geológicas não visualizadas em perfis sísmicos, por exemplo, as *pockmarks* são resultados do escape de fluido, e marcam no fundo marinho depressões profundas, geralmente ficam recobertas por bactérias indicando o desenvolvimento do fluido (Soto, 2013). Há também as *mounds* que apresentam as mesmas características das *pockmarks* porém estes são em formatos de montes. Por fim, as migrações de fluxo podem se

dar em conjunto com fraturas, a partir destas o metano migra para zonas de estabilidade ou para a superfície.

6.2 RESERVATÓRIOS CONVENCIONAIS E NÃO CONVENCIONAIS

Os reservatórios de petróleo e gás podem ser divididos em convencionais (RC) e não convencionais (RNC), sendo estes diferenciados por conta das funções das rochas no sistema petrolífero.

Nos reservatórios convencionais o sistema petrolífero encontra-se bem definido englobando rocha geradora, rocha reservatório e rocha selante aliados a presença de trapas (Ribeiro, 2015). Sendo os valores de porosidade de regular a boa e os de permeabilidade altos (entre 10 mD a 100mD), comparados com os RNC, que fazem com que a percolação seja de forma mais fácil. Além disso, há a caracterização da armadilha, devido à presença do selante em conjunto com a rocha reservatório.

Já no caso dos reservatórios não convencionais a principal diferença é por conta de nesse sistema petrolífero a rocha geradora também se comportar como armadilha, devido a permeabilidade ser inferior a 01, mD.

A pirâmide de recursos (Figura 6.5) evidencia a quantidade de recursos fósseis convencionais e não convencionais, sendo que quanto mais próximo da base da pirâmide maior a reserva do recurso, mas a exploração e explotação torna-se mais difícil.

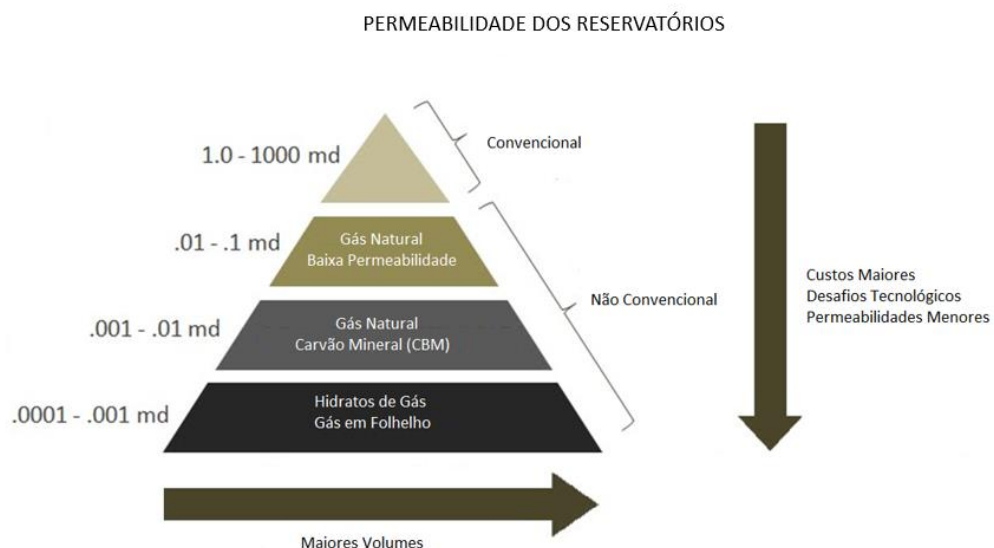


Figura 6.5: Pirâmide de recursos com detalhamento para hidratos de gás (Fonte: Holditch, 2003)

7 A EXPLORAÇÃO DE HIDRATOS DE GÁS E O PAPEL DA GEOFÍSICA

A utilização de métodos geofísicos para o estudo de uma região com possibilidade de hidratos é fundamental para acesso a estes reservatórios.

As mudanças ocorridas nas propriedades físicas dos sedimentos por conta dos hidratos ou do gás livre resultam em anomalias geofísicas, que são visíveis quando empregados métodos de imagem como os métodos sísmicos (Riedel et al., 2010). Além disso, a perfilagem de poços, e métodos potenciais podem auxiliar no estudo de locais com possível presença dos clatratos.

7.1 MÉTODOS SÍSMICOS

O imageamento sísmico da subsuperfície mostra a importância desta como uma ferramenta importante para a identificação de áreas com hidratos de metanos. Tendo em vista isso, levantamentos são realizados na tentativa de encontrá-los. A sísmica de reflexão é o foco principal no estudo de hidratos de metanos já que esta é que consegue melhor gerar um resultado consistente quanto aos clatratos. Alguns dos principais atributos sísmicos relacionados aos hidratos de gás são o *blanking* e o bottom seismic reflection (BSR).

7.1.1 Bottom seismic reflection (BSR)

A ocorrência marinha de hidratos de metano pode ser apresentada a partir de perfis sísmicos de reflexão, onde a presença de refletores fortes, conhecidos como BSR (Bottom Seismic Reflection), que são paralelos ao fundo do mar, inferem a possibilidade dessas formações. Esse método é o mais utilizado na detecção de clatratos em larga escala.

O BSR limita a profundidade máxima da zona de estabilidade dos clatratos, sendo possível a visualização da diferença de velocidades. A velocidade mais alta aparece na zona onde pode haver hidratos e a velocidade mais lenta, abaixo dos hidratos, seria onde existe gás livre. Todavia, nem sempre se deve confiar que por ser uma velocidade de onda P mais lenta naquele local haverá gás livre, porque tanto os hidratos de gás quanto o gás livre são eletricamente resistivos (Riedel et al., 2010).

O BSR é evidenciado por uma polaridade invertida devido a diferença de velocidade dos hidratos de gás em sedimentos marinhos e a velocidade dos sedimentos abaixo do BSR, de provável ocorrência de gás livre (Tinivella, 2008). Enquanto isso é evidenciado um coeficiente de reflexão negativo por conta da diminuição da velocidade entre as camadas de hidratos de gás e de gás livre (Figura 7.1).

7.1.2 Chaminé sísmica e blanking

O atributo conhecido como chaminé sísmica se caracteriza por ser uma “mancha” vertical na seção sísmica, geralmente ocorrendo por conta da migração de gás ou fluido em direção à superfície. O tamanho exagerado lateralmente dos perfis sísmicos de reflexão pode contribuir para a ocorrência das chaminés (Figura 7.1) (Soto, 2013), além de esta ter origem em elevada profundidade. Esta característica da seção acaba por apresentar, usualmente, uma coluna com boa definição conhecida de wipe-out (“zona de silenciamento”, são regiões desprovidas de sinais na seção).

As chaminés são comuns em seções sísmicas evidenciando migrações gasosas, principalmente em regiões que apresentam falhas, nessa região há uma diminuição da velocidade o que gera anomalias de impedância acústica sendo visíveis nas seções como áreas de baixa qualidade conhecidas como “branqueamento” (Freire, 2013).

Essa situação que pode evidenciar regiões de hidratos é conhecida também como *blanking* ou “blindagem”, caracterizado por um branqueamento na área sendo identificado como uma redução de amplitude dos refletores sísmicos este pode ser causado por conta de cimentação o que acaba por reduzir o contraste de impedância sísmica entre camadas de componentes diferentes (Clennell, 2000).

A ocorrência do *blanking* é quase que obrigatória junto ao BSR evidenciando a presença de clatratos.

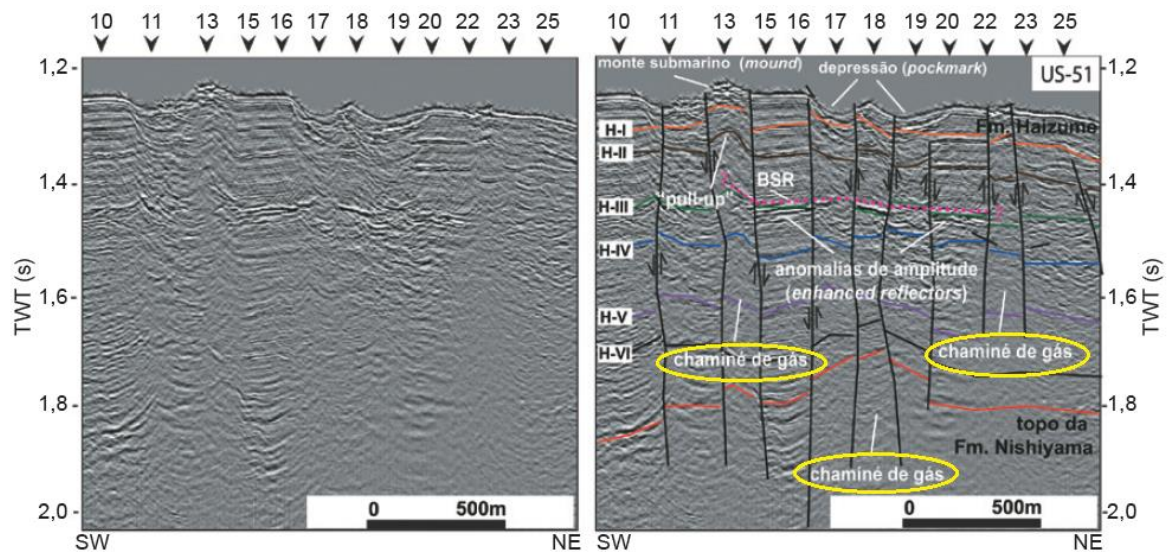


Figura 7.1: Exemplo de BSR e Chaminé sísmica no Japão, na Bacia Joetsu (Fonte: Freire, 2013)

7.1.3 Bright Spot

O *bright spot* é a principal indicação da presença de gás natural quando interpretada uma seção sísmica. Esta característica está relacionada com altas amplitudes (Figura 7.2).

Segundo Zhang e Han (2010), os *bright spots* positivos com alta amplitude indicam os clatratos entretanto o acontecimento destes sendo negativos com alta amplitude é uma evidência de gás livre. Além disso, a amplitude para sedimentos com hidratos é maior do que sedimentos saturados com água. Outra característica está associada ao fluxo de fluido o qual é baixo ou moderado em zonas que apresentam o *bright spot*.

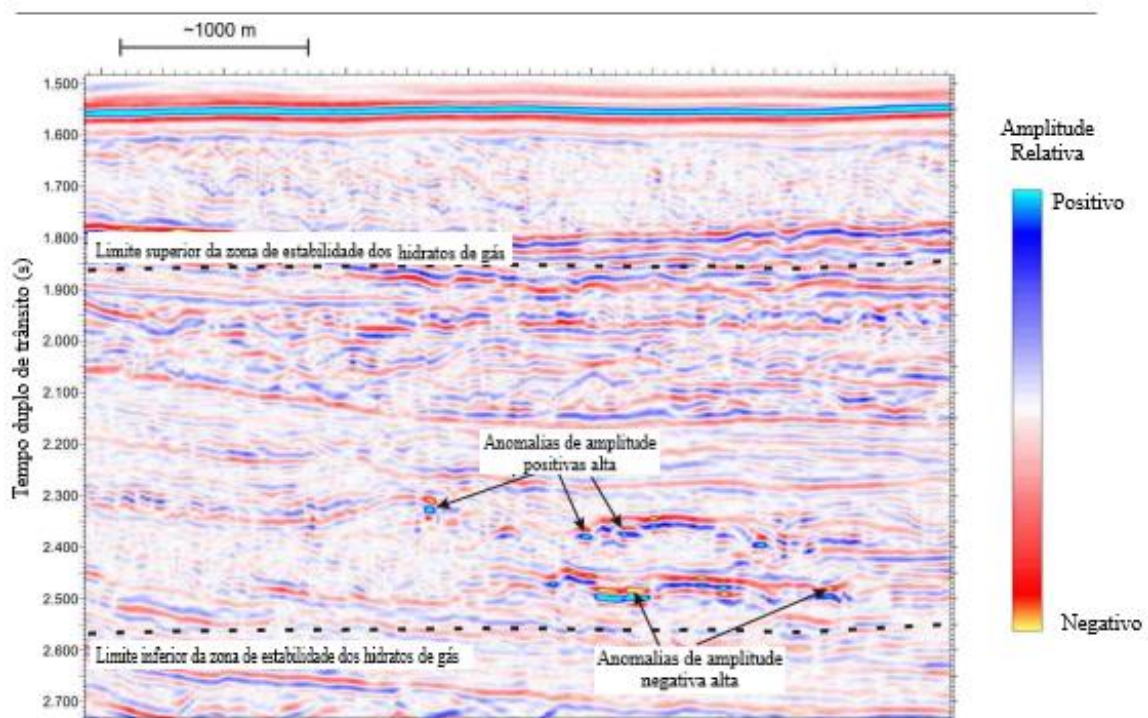


Figura 7.2: Exemplo de *bright spot* (Fonte: Zhang e Han, 2010)

7.2 PERFILAGEM DE POÇOS

Os hidratos de gás são inferidos em perfis de poço a partir da alta velocidade do perfil sônico e alta resistividade nos perfis de eletrorresistividade (Majumder et al., 2009), como estes são os que apresentam melhor resultado para hidratos, geralmente, são os mais usados na identificação de hidratos de gás.

Nos perfis de raios gama procura-se as porções não argilosas, que não são folhelhos, pois os hidratos ocorrem em regiões de arenito. Sabendo disso, como as regiões de folhelhos

apresentam alto API (de 70 API à 120 API), as regiões areníticas estão em áreas de baixo API, menores que 70 API.

Quanto a resistividade, as áreas com hidratos de gás apresentam resistividade alta devido ao metano existente no lugar da água salina que, anteriormente, ali estava. Os hidratos atuam como um isolante elétrico.

Além de perfis de raios gama e de eletrorresistividade, os perfis de densidade também ajudam na interpretação devido à uma mínima diminuição da densidade dos hidratos de gás com relação aos poros, antes, preenchidos por água. Além deste, o perfil calliper auxilia na avaliação da área onde será perfurado o poço (Soto, 2013), nas zonas de hidratos de gás a característica está em o diâmetro do poço ser maior.

Com a perfilagem de poços é possível medir parâmetros físicos dos sedimentos determinantes para inferir se, possivelmente, há ou não hidratos de metano naquela região. Estes devem ser analisados juntos a dados sísmicos para que a correlação seja feita.

7.3 MÉTODO MAGNÉTICO

As anomalias magnéticas dependem das partículas ferromagnéticas existentes nas rochas. A magnetização da rocha ocorre por processos durante a formação da mesma ou eventos posteriores, pois cada rocha contém pelo menos uma quantidade mínima de compostos magnéticos.

Em rochas com hidratos de gás, os clatratos acabam por ocupar os poros rochosos que antes continham água salina. Acontece então a geração de um ambiente propício a bactérias as quais acabam por decompor compostos do metano e essa oxidação produz elétrons. Esses elétrons agem na redução de óxido de ferro e sulfetos, o que afeta a camada de permeabilidade fazendo com que o fluxo de gás se armazene em cima do refletor BSR ocorrendo a piritização, e gerando a desmagnetização (Soto, 2013).

A desmagnetização gera anomalias altas ou baixas dependendo da latitude. Em latitudes baixas, por exemplo, os valores das anomalias altas são indicativos de áreas com possível ocorrência de hidratos de gás.

7.4 DADOS GEOFÍSICOS DA BACIA DA FOZ DO AMAZONAS

Com base no Ocean Drilling Program (Soh, 1997) foi possível reconhecer dados geofísicos na Bacia que identificam a presença de hidratos de gás. A seguir apresenta-se a imagem de uma

seção sísmica (Figura 7.3) realizada na região de fluxo de detritos à oeste do Leque do Amazonas (Figura 7.4). Como evidência dos hidratos nota-se o refletor BSR em concordância paralela ao fundo marinho. Ademais existem as características geológicas diápiros e falhas, que indicam também os clatratos.

As falhas indicam que há migração de fluido para a superfície ou para a GSHZ, e os diápiros indicam que há hidrocarboneto por conta de este estar associado à abertura de oceanos e funcionar como um isolante impedindo a migração do gás (ou óleo).

O perfil sísmico aqui citado ocorre na mesma região de depósitos de detritos do sítio 941, o qual anteriormente foi explicado no item 1.1.1.

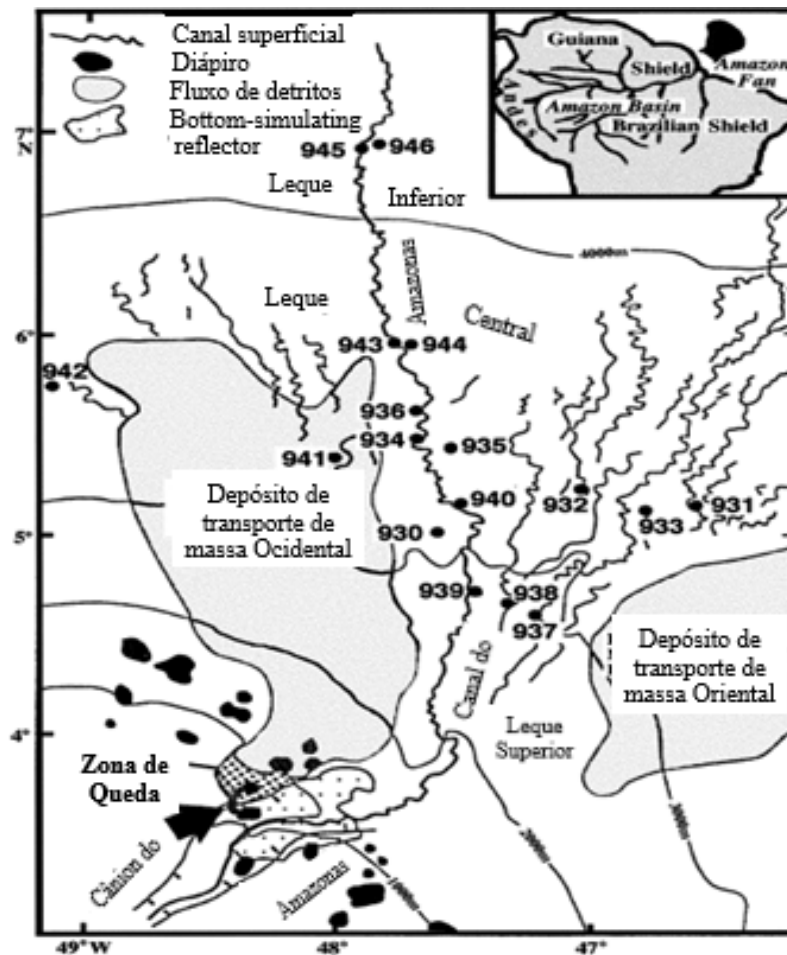


Figura 7.3: Mapa de localização do Depósito de Massa de transporte ocidental com o sítio 941. A seta preta próximo a zona de queda indica o local da linha sísmica da figura 7.4 (Fonte: Soh, 1997)

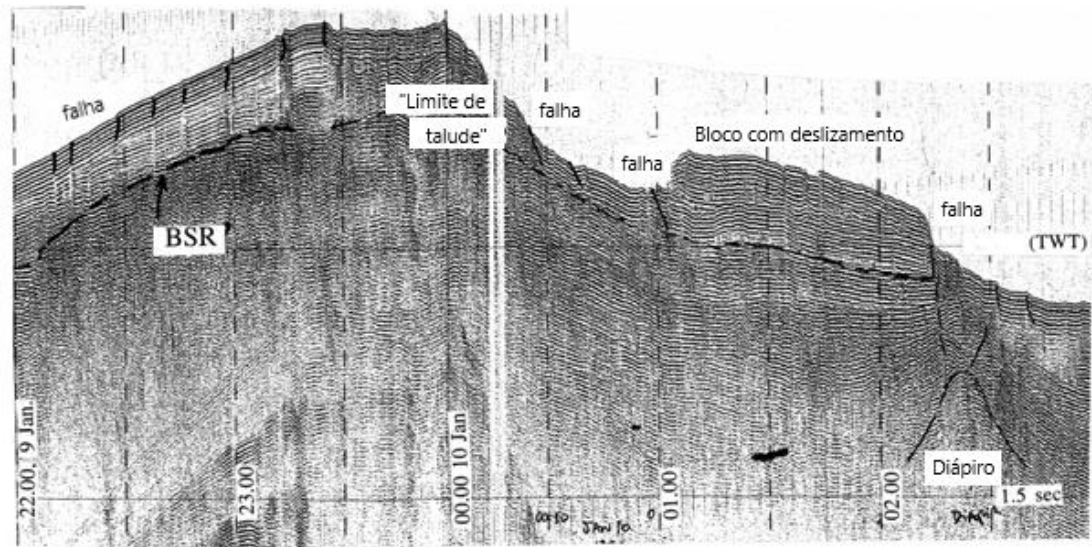


Figura 7.4: Interpretação do perfil de reflexão sísmica indicado na figura 7.3. (Soh, 1997).

8 POTENCIAL MUNDIAL E BRASILEIRO

Tendo o gás natural como uma importante reserva fóssil para geração de energia, os hidratos apresentam-se como mais uma vertente deste tipo de gás para suprir países que são dependentes de energia exportada e como a “energia do futuro”.

As pesquisas para a exploração e produção vem sendo um desafio para estudiosos, já que o interesse nos clatratos é tido por conta de as reservas estimadas serem o dobro comparadas com de outras fontes fósseis de energia.

A descoberta dos hidratos ocorreu em 1811 por Humphry Davy em laboratório através de experimentos e observações com água e cloro. (Makogon et al., 2007). Mas o hidrato só foi tido como uma potencial fonte energética na década de 1960, quando cientistas descobriram reservas de hidratos de metano em reservatórios de gás na Sibéria, a partir da perfuração de poço no local. Com a crise econômica mundial e o aumento do preço do petróleo no final da década de 1970, alguns países realizaram pesquisas relacionadas aos hidratos de metanos.

A estimativa de hidratos de gás no mundo (Figura 8.2) (Tabela 8.1) tem caráter especulativo baseando-se desde as primeiras tentativas de quantificá-los (Kvenvolden, 1993). No presente, os países com mais interesse na pesquisa de hidratos são: Estados Unidos, Japão, Canadá, China, Coreia do Sul e Índia. Sendo que o Japão foi o primeiro país a criar um programa para pesquisas na área de hidratos de gás já que este, assim como a China, busca a autossuficiência energética (Machado, 2009).

Na América do Norte, os Estados Unidos da América e Canadá investem em informações sobre os hidratos de gás, tendo um dos principais centros de pesquisa de todo o mundo no assunto sobre hidratos. Inclusive nas pesquisas do poço Mallik, por parte do Canadá, o qual é um sítio de interesse não só canadense como também internacional.

O poço Mallik (Figura 8.1) está localizado no delta do Mackenzie no mar de Beaufort, no Canadá. Os hidratos foram ali descobertos na década de 1970 durante a perfuração exploratória pela Imperial Oil Ltd. (Schlumberger, 2010). Após a descobertas alguns estudos foram realizados possibilitando estabelecer o campo de Mallik como uma das maiores acumulações de hidratos de gás do mundo. Este sítio apresenta muitos dados de subsuperfície o que o faz ter bastante visibilidade para pesquisas.

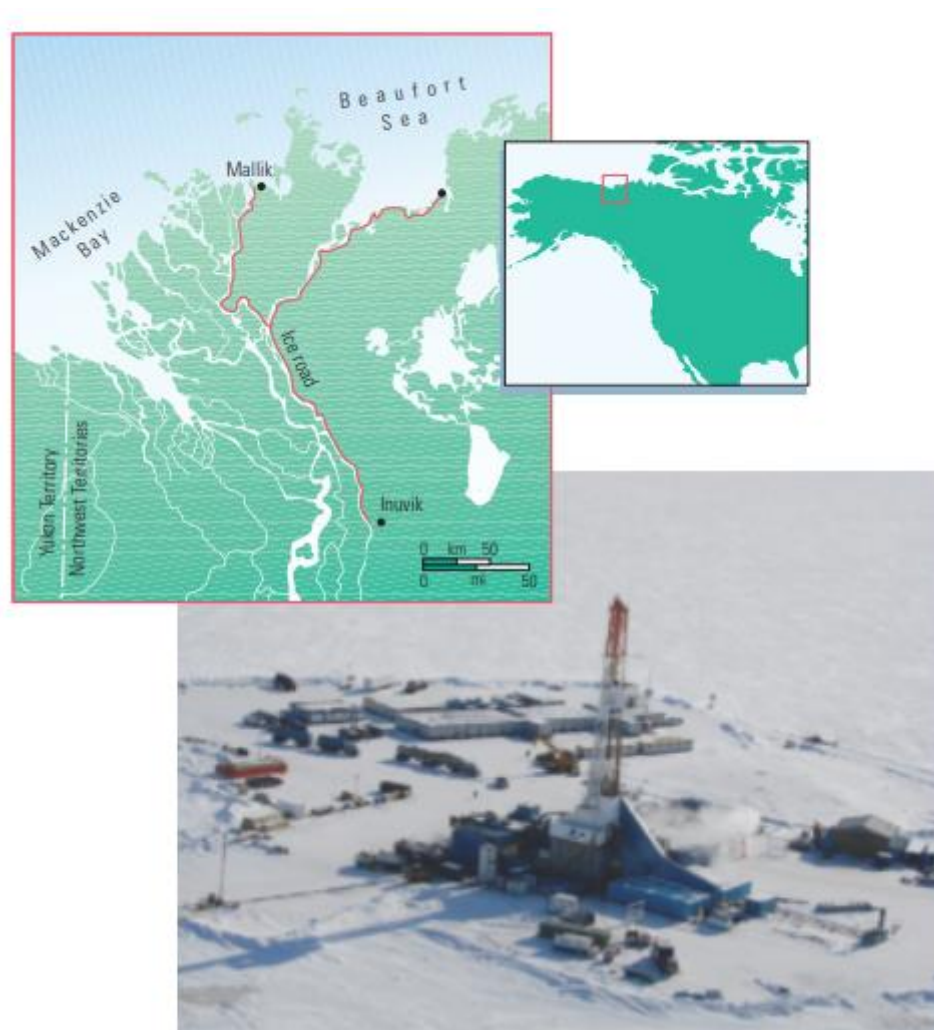


Figura 8.1: Campo de Mallik, Canadá. (Schlumberger, 2010)

No Brasil, a evidência dos hidratos de gás é apresentada na Bacia de Pelotas onde o volume está calculado em 135 bilhões de m^3 (a partir da área, concentração e espessura) e na Bacia da Foz do Amazonas tendo os valores em cerca de 1415 trilhões de m^3 , sendo que a quantidade em superfície após a extração dos HG's seria de 13 trilhões m^3 na Bacia da Foz do Amazonas e de 22 trilhões m^3 na Bacia de Pelotas. Tais valores fariam com que o Brasil estivesse entre os países com maiores reservas (Montalvão e Eiras, 2003). Vale ressaltar que em outras regiões da costa brasileira (como Campos, Bahia e Espírito Santos) podem acontecer registros de hidratos de gás, as duas bacias citadas são as únicas com dados constatados.

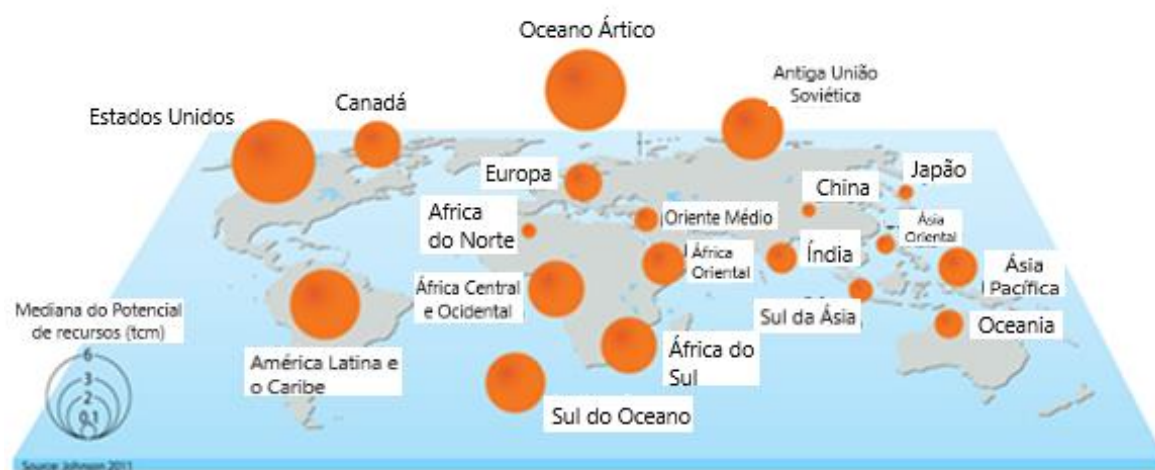


Figura 8.2: Potencial de ocorrências de hidratos de gás no mundo (Fonte: Johnson, 2011).

| Região | Volume (Tcf) |
|-------------------------|--------------|
| EUA | 7.013 |
| Ártico | 6.621 |
| Atlântico Sul | 3.589 |
| América Latina e Caribe | 4.940 |
| Ásia Pacífico | 1.654 |
| Oceania | 811 |
| Japão | 212 |
| Ásia Sul | 557 |
| Índia | 933 |
| Ásia (Leste da China) | 371 |
| China | 177 |
| Oriente Médio | 573 |
| África do Sul | 3.139 |
| África Central e Oeste | 3.181 |
| África Leste | 1.827 |
| Norte da África | 218 |
| Antiga União Soviética | 3.829 |
| Europa Ocidental | 1.425 |
| Canadá | 2.228 |

Tabela 8.1: Volume (trilhões de pés cúbicos) de hidratos em arenito em alguns países (Fonte: Johnson, 2011, NETL, 2011).

9 HIDRATOS DE GÁS E O MEIO AMBIENTE

Os hidratos de gás, além de apresentarem o dobro de reservas comparados com outros recursos fósseis são uma energia limpa pois a combustão do metano é menos poluente que outros hidrocarbonetos utilizados na indústria (Gandara et al., 2015), todavia a sua extração deve ser realizada de forma segura para não causar problemas ambientais graves.

Sabe-se que dióxido de carbono é o principal causador do efeito estufa, contudo o gás metano consegue ser 20 vezes mais prejudicial ao meio ambiente (Gandara et al, 2015). Com isso, a extração dos hidratos requer precauções para que este não extravase em quantidades exorbitantes para a atmosfera. O desenvolvimento das pesquisas em hidratos precisa ter atenção, também, sobre o metano ser um potencial gás do efeito estufa. Se uma pequena porção do metano escapar para a atmosfera esta terá a mesma proporção que o carbono, em grandes quantidades, prejudica a camada de ozônio.

Durante a extração dos hidratos o reservatório é perfurado, por exemplo no processo de despressurização, interferindo na estabilidade dos hidratos que ali estavam. Com a instabilidade de temperatura e pressão, o gás migra para a superfície acarretando vazamentos em massa de metano. Além disso, outro fator preocupante no decorrer da extração é a subsidência do solo marinho que é o rebaixamento de uma camada superior em decorrência de alterações em camadas mais profundas.

Hipóteses levantadas por estudiosos ao longo dos anos foram realizadas a partir de estudos de episódios onde ocorreu elevação da temperatura, episódios esses conhecidos como “Máximo Térmico do Paleoceno Superior” e “Máximo Térmico do Paleoceno-Eoceno” (Zachos, 2003). Segundo (Moore et al., 2008) tal evento ocorrido entre o Paleoceno e o Eoceno caracterizou-se por extinção em massa de todo organismo vivo, além de tornar os oceanos ácidos, aumento de plânctons exóticos nos mares, além de outros impactos.

Uma das problemáticas envolvendo os HG's vem da teoria denominada, por pesquisadores, “Hipótese da Arma de Claratos”, que diz que o efeito estufa provoca aumento na temperatura do oceano, o que vem a afetar a estabilidade dos hidratos de gás nas zonas de talude ou permafrost, isso acarretaria em uma dissociação dos clatratos acarretando na emissão em massa de metano para a atmosfera podendo provocar um Evento de Extinção em Massa.

10 POTENCIAL ECONÔMICO DOS HIDRATOS DE GÁS

O fato dos clatratos não conquistarem grande espaço no atual contexto se dá por conta de sua extração. O método mais utilizado é o da depressurização que consiste na perfuração do poço fazendo com que a pressão interna decresça desequilibrando a termodinâmica da zona de estabilidade dos clatratos assim o hidrato inicia a sua dissociação, mas ainda existem outras tecnologias conhecidas como o método de estimulação térmica (método onde a temperatura na camada dos hidratos sofre um aumento) e o de injeção de inibidores (técnica de injeção de inibidores como o metanol) (Figura 10.1) (Gandara, 2015).

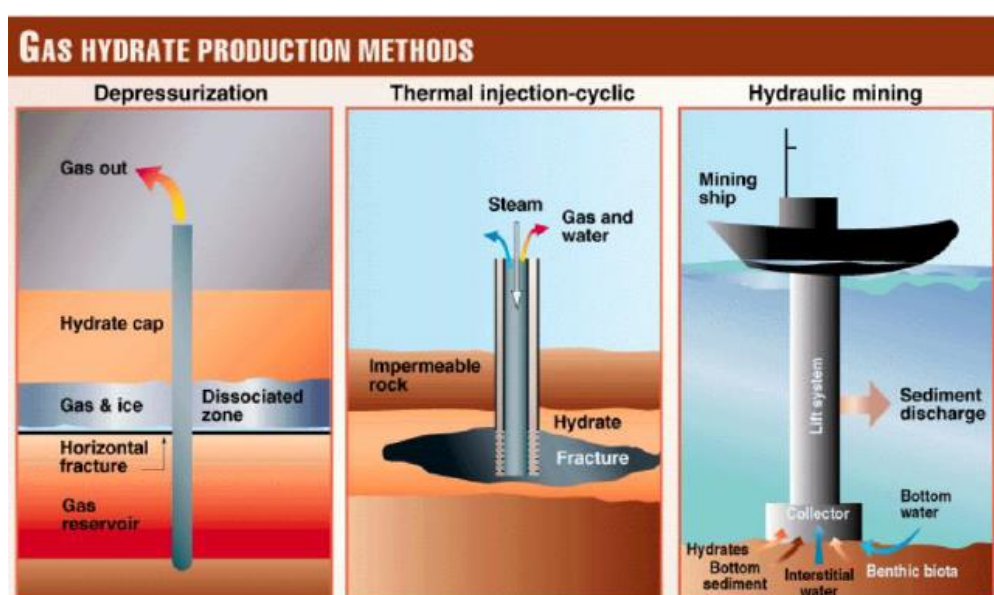


Figura 10.1: Métodos utilizados na extração dos hidratos de gás (Fonte: Ronne et al., 2013)

Entretanto, pesquisas vêm sendo realizadas em campos de testes como o de Mallik para que os hidratos se tornem uma opção energética possível de utilização visto que os hidratos de gás (sendo o metano o gás presente) apresentam altas taxas deste composto, o qual, por sua vez, contém 164m^3 de metano para 1m^3 de hidrato em temperatura e pressão ideal (Kvenvolden, 1993). Isto torna os hidratos uma alternativa rentável pela sua alta capacidade de armazenamento com altas quantidades de gás puro, além de os depósitos de hidratos estarem localizados em regiões costeiras onde existe infraestrutura, e a presença próxima às ZEE's⁵.

⁵Zona Econômica Exclusiva: Espaços marítimos onde certo país tem responsabilidade e deve gerir o que ocorre naquela região.

A partir de um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética foi feita uma estimativa quanto à valores de oferta do gás natural produzido dos hidratos de gás compostos por metano. Na pesquisa considerou-se que não haveria necessidade de processamento na produção do gás natural, tendo em vista que com a retirada de água no próprio tratamento das instalações de E&P o gás restante seria praticamente de metano puro, não havendo hidrocarbonetos mais pesados (EPE, 2016).

Os preços (Tabela 10.1) foram estimados por classes de reservatório dos hidratos (Figura 10.2), ou seja, pela sua disposição em subsuperfície. A classe 1 seria de hidratos situados entre uma camada de água e outra de gás livre, enquanto o de classe 2 se sobrepõe a uma camada de água, já a de classe 3 apresenta apenas metano puro, e a de classe 4 é o metano puro, porém disperso nas rochas.

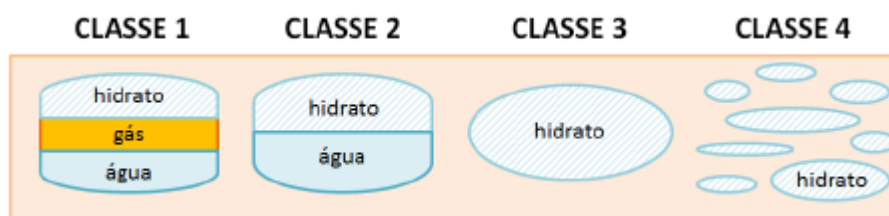


Figura 10.2: Classes dos reservatórios de hidratos de gás (Fonte: Walsh et al., 2009)

| Tipo de Campo | Preço (sem tributos) (US\$/MMBTU ⁶) |
|-------------------|---|
| Classe 1 onshore | 7,60 |
| Classe 2 onshore | 14,73 |
| Classe 3 offshore | 6,90 |

Tabela 10.1: Estimativa de preços de oferta de hidratos de metano no Brasil no ano de 2015 (Fonte: EPE modificado, 2016)

Nota-se a diferença de preço por conta da classe dos hidratos, sendo a classe 1 e classe 3 apresentando os menores preços devido aos volumes produzidos serem em grande quantidade, já os de classe 2 necessitam de 5 anos para atingirem seu pico de produção dessa forma os preços do gás natural elevam, pois, a remuneração dos projetos ocorre tardiamente (EPE, 2016).

⁶MMBTU: 1 milhão de BTU, unidade de energia. 1 MMBTU=26,8m³ de gás natural

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os hidratos de gás apresentam as maiores reservas em hidrocarbonetos no mundo, estando distribuído igualmente no globo tendo ocorrências em, praticamente, todos os continentes. Isso faz com que os HG's sejam vistos como energia para o futuro o que tem feito muitos programas de estudos realizarem testes de extração. Entretanto estas necessitam de maiores cuidados para serem explorados já que envolve danos ao meio ambiente, as técnicas de extração ainda não estão consistentes e não é comercialmente viável o transporte do mesmo.

No Brasil as pesquisas quanto aos hidratos ainda são mínimas, o que se explica também porque o país apresenta conteúdo energético para vários anos incluindo outros combustíveis fósseis de maior facilidade de extração como o petróleo e gás natural (derivado de outros tipos de reservatórios). Contudo o potencial dos hidratos em território brasileiro é considerável devido as bacias apresentarem altas quantidades do mesmo.

Na Bacia da Foz do Amazonas há estudos realizados pela ODP que mapearam o Leque do Amazonas a partir de dados geofísicos, geológicos e geoquímicos obtendo informações da ocorrência de clatratos, podendo vir a serem o início de uma busca por uma nova matriz energética no país futuramente.

Nas pesquisas na Bacia da FZAM foi possível notar nos dados geofísicos a presença do BSR, o principal indicador de HG's em uma seção sísmica, aliado à formações como *pockmarks* indicando que havia matéria orgânica ali, ou seja, em algumas áreas da Bacia ainda estão ocorrendo formação de hidratos a partir de metano biogênico.

Com isso, a principal preocupação antes de iniciar algum trabalho exploratório é em razão do meio ambiente visto que existe a “hipótese da arma de clatratos” e também a tese de que esses gases interferem nas mudanças climáticas, como auxiliando no efeito estufa.

A questão econômica mostra que o mercado de gás natural a partir de hidratos seria bastante vantajoso ao Brasil visto que as reservas existentes no território produziram altas quantidades de gás, como visto a Bacia da Foz do Amazonas seria capaz de produzir 13 trilhões de m³ de gás em superfície (Montalvão e Eiras, 2003). Com isso, devem ser realizadas nessa região e, também em outros locais de possível ocorrência de hidratos no Brasil, pesquisas com mais detalhes para que no futuro os HG's venham para beneficiar na matriz energética.

REFERÊNCIAS

- Bizzi, L. A., C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti, J. H. Gonçalves, 2003, Bacias sedimentares da margem Continental Brasileira. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*, 131-132, CPRM.
- Clennell, M. B., 2000, Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectivas para exploração na margem continental brasileira. *Revista brasileira de geofísica*, **18**(3), 397-409.
- Empresa de Pesquisa Energética, 2016, Hidratos de metano: aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Rio de Janeiro. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-305/Nota%20T%C3%A9cnica%20Hidratos%20de%20Metano\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-305/Nota%20T%C3%A9cnica%20Hidratos%20de%20Metano[1].pdf). Acesso em: 10/07/2019.
- Figueiredo, J. J. P., P. V. Zalán, E. F. Soares, 2007, Bacia da Foz do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**(2), 299-309.
- Flood, R. D., D. J. W. Piper, A. Klaus, 1993, Leg 155 Scientific Prospectus: Amazon Deep-sea Fan. Ocean Drilling Program. Disponível em: <http://www-odp.tamu.edu/publications/prosp/digital/155prosp.pdf>. Acesso em: 09/07/2019.
- Freire, A. F. M., 2013, Controle estrutural-estratigráfico na distribuição de hidratos e gases livres do anticlinal Umitaka, Bacia Joetsu, margem leste do Mar do Japão. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, **21**(1), 63-84.
- Gandara, R. F. A. Liguori, F. Casazza, G. Rodegher, P. P. Maisonnave, C. Bermann, 2015, Aproveitamento energético do hidrato de metano. In: *Anais AGRENER 2015*. São Paulo, IEE, USP.
- Ginsburg, G. D., V. A. Soloviev, 1997, Methane migration within the submarine gas-hydrate stability zone under deep-water conditions. *Marine Geology*, **137**(1-2), 49-57.
- Holditch, S. A., 2003, The increasing role of unconventional reservoirs in the future of the oil and gas business. *Journal of petroleum technology*, **55**(11), 34-79.
- Johnson, A. H., 2011, Global resource potential of gas hydrate – a new calculation. In: *7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*, Edinburgh, Escócia, Reino Unido, 17-21 de julho.
- Kvenvolden, K. A., 1993, Gas hydrate as a potential energy resource – a review of their methane content. D. G. Howell, ed., *The Future of Energy Gases*. Washington: United States Government Printing Of, 555-561.
- Machado, C. X., 2009, A importância do hidrato de gás como fonte de energia alternativa e como possível agente das mudanças climáticas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Majumder, M., 2009, Identification of gas hydrates using well log data – a review. *Geohorizons*, **56** (7), 40-48.

- Makogon, Y.F., S.A. Holditch, T.Y. Makogon, 2007, Natural gas hydrates — A potential energy source for the 21st Century. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **56**, 14–31.
- Mello, M. R., R. Mosmann, S. R. P. Silva, R. R. Maciel, F. P. Miranda, 2001, Foz do Amazonas area: The last frontier for elephant hydrocarbon accumulations in the South Atlantic realm, *in* M.W. Downey, J. C. Threet, and W. A. Morgan, eds., *Petroleum provinces of the twenty-first century: AAPG Memoir 74*, 403–414.
- Montalvão, L. V., J. F. Eiras, 2003, Estudo Comparativo das Possibilidades de Aproveitamento de Gás de Hidratos no Brasil. In: *Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás*, **2**, Rio de Janeiro.
- Moore, E. A., A. C. Kurtz, 2008, Black carbon in Paleocene–Eocene boundary sediments: A test of biomass combustion as the PETM trigger. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **267**(1-2), 147-152.
- NETL, 2011, Potential of gas hydrates: a new calculation. *Methane Hydrates Newsletter*, **11**(2), 24.
- Ribeiro, T. J. S., 2015, Estudo de reservatórios não convencionais de shale gas no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Riedel, M., E. C. Willoughby, S. Chopra, 2010, Geophysical characterization of gas hydrates. *Geophysical Developments Series*, Society of Exploration Geophysics, **14**.
- Ronne, L., et al., 2013, Extração de metano através dos hidratos de gás: método de despressurização. In: *Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas*. **23**. Disponível em: <http://cti.ufpel.edu.br/cic/arquivos/2013/EN_01071.pdf>. Acesso em: 28/06/2019.
- Schlumberger, 2010, *Developments in Gas Hydrates*. Oilfield Review Spring, **22**(1).
- Soh, W., 1997, Computed tomography scan analysis of Site 941 Cores, Western Mass-Transport Deposit, Amazon Fan. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. Disponível em: http://www-odp.tamu.edu/publications/155_SR/CHAP_28.PDF. Acesso em: 09/07/2019.
- Soto, Z. R. T., 2013, Caracterização de hidratos de gás a partir de dados geofísicos da região da Bacia Tumbes-Progresso. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Tinivella, U., F. Accaino, B. D. Vedova, 2008, Gas hydrates and active mud volcanism on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula. *Geo-Marine Letters*, **28**(2), 97-106.
- Waite, W., R. Boswell, S. Dallimore, 2014, *Frozen heat: A Global Outlook on methane gas hydrates*. United Nations Environment Programme. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=1990&menu=35>. Acesso em: 09/07/2019.

- Walsh, M. R., et al., 2009, Preliminary report on the commercial viability of gas production from natural gas hydrates. *Energy Economics*, Elsevier, **31** (5), 815-823.
- Zachos, J., M. W. Wara, S. Bohaty, M. L. Delaney, M. R. Petrizzo, A. Brill, T. J. Bralower, I. Premoli-Silva, 2003, A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene–Eocene Thermal Maximum. *Science*, **302** (5650), 1551-1554.
- Zhang, Z., D. Han, 2010, Seismic interpretation of gas hydrate based on physical properties of sediments. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010*, 1452-1456.