

Controle estrutural-estratigráfico na distribuição de hidratos e gases livres do anticlinal Umitaka, Bacia Joetsu, margem leste do Mar do Japão

Structural-stratigraphic control in the distribution of gas hydrate and free-gas at the Umitaka anticline, Joetsu Basin, eastern margin of the Japan Sea

Antonio Fernando Menezes Freire

resumo

A Universidade de Tóquio, associada a outras instituições de pesquisas japonesas, tem implementado desde 2004 uma intensa atividade exploratória na Bacia Joetsu, margem leste do Mar do Japão, com a intenção de delimitar acumulações de hidratos de gás. Estes estudos têm integrado dados geofísicos, geológicos e geoquímicos, tendo identificado acumulações rasas de hidratos de gás, associadas a exsudações ativas de metano no fundo do mar e na coluna d'água. A principal ocorrência destas acumulações está localizada em um anticlinal assimétrico denominado Esporão Umitaka (*Umitaka Spur*), onde levantamentos sísmicos 2D monocanais têm revelado estruturas em forma de chaminés, as quais parecem estar fortemente controladas por um complexo sistema de falhas de plano axial. Estas chaminés apresentam branqueamento de refletores, característica da presença de gás, ocasionalmente exibindo fortes amplitudes sísmicas em seu interior. Algumas vezes podem se observar estruturas

pull-up, provavelmente relacionadas a densas acumulações de hidratos de gás, cuja impedância acústica é mais elevada. Um refletor que simula o fundo marinho (*bottom-simulating reflector* - BSR) é visível dentro das chaminés de gás e no flanco leste mais suave do anticlinal assimétrico, sugerindo que os hidratos podem estar selando acumulações rasas não convencionais de gás livre abaixo da zona de estabilidade de hidratos (*gas hydrate stability zone* - GHSZ). Neste flanco ocorrem depósitos de fluxo de detritos (*debris-flow deposits*) que podem, a depender de condições permoporosas favoráveis, representar potenciais reservatórios para hidratos dentro da GHSZ e para gases livres abaixo desta. O sistema de falhas axiais, a geometria do anticlinal e as camadas e contatos carreadores induzem a migração de gás termogênico para o topo da estrutura, alimentando a GHSZ e formando intensas exsudações e plumas gigantes de metano na coluna d'água.

Palavras-chave: Bacia Joetsu | chaminés de gás | exsudações de metano | hidratos de gás | Mar do Japão | sísmica monocanal | Umitaka Spur

abstract

Since 2004, integrated geological, geochemical, and geophysical exploration has identified a massive accumulation of gas hydrate associated with active methane seeps on the Umitaka Spur, located in the Joetsu Basin on the eastern margin of the Japan Sea. The Umitaka Spur is an asymmetric anticline formed along an incipient subduction zone that extends throughout the western side of the Japanese island-arc system. Seismic surveys recognized chimney structures that seem strongly controlled by a complex anticlinal axial fault system, and exhibit high seismic amplitudes with apparent pull-up structures, probably due to massive and dense accumulation of gas hydrate. Bottom-simulating reflectors are widely developed, in particular within gas chimneys and in the gently dipping eastern flank of the anticline, where it may represent a trap for unconventional gas below. In this flank, within the gas hydrate stability zone (GHSZ), debris deposits can store gas hydrates and may represent potential natural gas hydrate reservoirs. The axial fault system, the convex shape of the anticline, and the carrier-beds induce thermogenic gas migration to the top of the structure, supplying gas to the GHSZ and providing strong seepages and giant plumes in the sea water column.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: gas chimney | gas hydrates | Japan Sea | Joetsu Basin | methane seeps | single channel seismic | Umitaka Spur

introdução

Desde 2004, a Universidade de Tokyo, associada a outras instituições, vem conduzindo uma intensa investigação exploratória a fim de entender as ocorrências de hidratos de gás da Bacia Joetsu, incluindo os dois anticlinais conhecidos como *Umitaka Spur* e *Joetsu Knoll*. Estudos relacionados à exploração de hidratos, como o mapeamento detalhado da topografia de fundo (Matsumoto, 2005), caracterização geoquímica da matéria orgânica e de sedimentos (Freire *et al.* 2009; Freire, 2010), estratigrafia baseada na correlação de cinzas vulcânicas (Freire *et al.*, 2010), química da água do mar sobre plumas e de concentração gasosa e isotópica de gás intersticial (Ishizaki, 2008), química de água intersticial (Hiruta *et al.*, 2009; Tomaru *et al.*, 2007), levantamentos acústicos na coluna d'água (Aoyama e Matsumoto, 2009) e levantamentos sísmicos (Freire *et al.*, 2011; Saeki *et al.*, 2009), têm permitido um grande conhecimento sobre a ocorrência de hidratos da Bacia Joetsu.

Este trabalho tem como objetivo principal mostrar a influência do controle estrutural-estratigráfico na ocorrência e distribuição de hidratos de gás em um anticlinal denominado Esporão Umitaka (*Umitaka Spur*), localizado na Bacia Joetsu, margem leste do Mar do Japão, baseado na interpretação de seções sísmicas monocanais 2D.

noções sobre hidratos de gás

Hidratos naturais de gás (*natural gas hydrates*) são sólidos formados pela combinação de água e gases, podendo ser hidrocarbonetos ou não. Possuem aspecto de neve ou gelo seco e cristalizam-se sob a forma de nódulos, camadas ou como preenchimento de fraturas e do espaço poroso sedimentar (fig. 1). Os hidratos originam-se através do movimento de moléculas gasosas durante a migração dentro da coluna sedimentar ou da água, mediante uma reação exotérmica que congela a água imediatamente circundante a cada molécula gasosa.

Esta molécula, geralmente de metano, é então aprisionada dentro de uma estrutura cristalina composta por um envoltório de moléculas de água. Por esta razão, os hidratos também são conhecidos



Figura 1
 (a) Blocos de hidratos naturais de gás amostrados através de testemunhadores a pistão Calypso em sedimentos quaternários do Mar do Japão, sobre o anticlinal Umitaka, durante a missão de pesquisas MD-179 em 2010; (b) nódulo de hidrato imerso em matriz lamosa, coletado pelo *piston-core* PC-09 durante o cruzeiro de pesquisas UT-07 no Mar do Japão; (c) lâminas de hidratos preenchendo fraturas em sedimentos lamosos, coletados pelo *piston-core* PC-915 durante o cruzeiro de pesquisas UT-09 no Mar do Japão; (d) bloco de hidrato de gás formado dentro de tubulação de produção na Bacia de Campos (cortesia da Petrobras; demais fotos feitas pelo autor).

Figure 1
 (a) Blocks of natural gas hydrates sampled by Calypso piston-cores in Quaternary sediments of the Japan Sea, on the anticline Umitaka Spur, during the research cruise MD-179 in 2010; (b) hydrate nodule immersed in clayey sediments, collected by piston-core PC-09 during research cruise UT-07 at the Japan Sea; (c) hydrate blades filling fractures on clayey sediments, collected by piston-core PC-915 during research cruise UT-09 at the Japan Sea; (d) block of gas hydrate formed inside a production pipe-line in Campos Basin (cortesy of Petrobras; the other photos belonging to the author).

como clatratos de metano (*methane clathrates*). Entretanto, outros componentes naturais, como etano, propano e dióxido de carbono, podem ser observados sob essa forma.

A temperatura máxima para que essa estrutura seja estável depende da combinação entre temperatura e pressão na zona onde está sendo formada e, secundariamente, pela composição do gás e pela salinidade da água contida nos poros do sedimento. Os hidratos naturais de gás podem ocorrer a temperaturas significativamente mais altas do que o ponto de fusão da água, caso haja pressão suficiente para manter o equilíbrio (Edmonds *et al.*, 1996).

O metano, trapeado sob a forma de hidrato, pode ser biogênico ou termogênico. Estudos experimentais indicam que 1m³ de hidrato de metano, dissociado sob pressão e temperatura atmosférica, libera 164m³ de metano natural, além de 0,8m³ de água (Kvenvolden, 1993). Esta relação tem encorajado pesquisas no sentido de fazer o caminho inverso, isto é, comprimir o gás para um estado hidratado a fim de fazer o transporte

sob a forma de pelotas (*pellets*) em navios especiais. Contudo, devido ao balanço energético, esta técnica ainda não encontra viabilidade econômica para uso comercial. Hidratos também podem ser formados dentro de dutos (fig. 1d), como resultado da pressão de fluxo sofrida pelo gás em combinação com a água produzida, interferindo na garantia de fluxo dentro das tubulações (*flow assurance*). Existem ramos da engenharia e da química especialmente voltados para esse tipo de estudo.

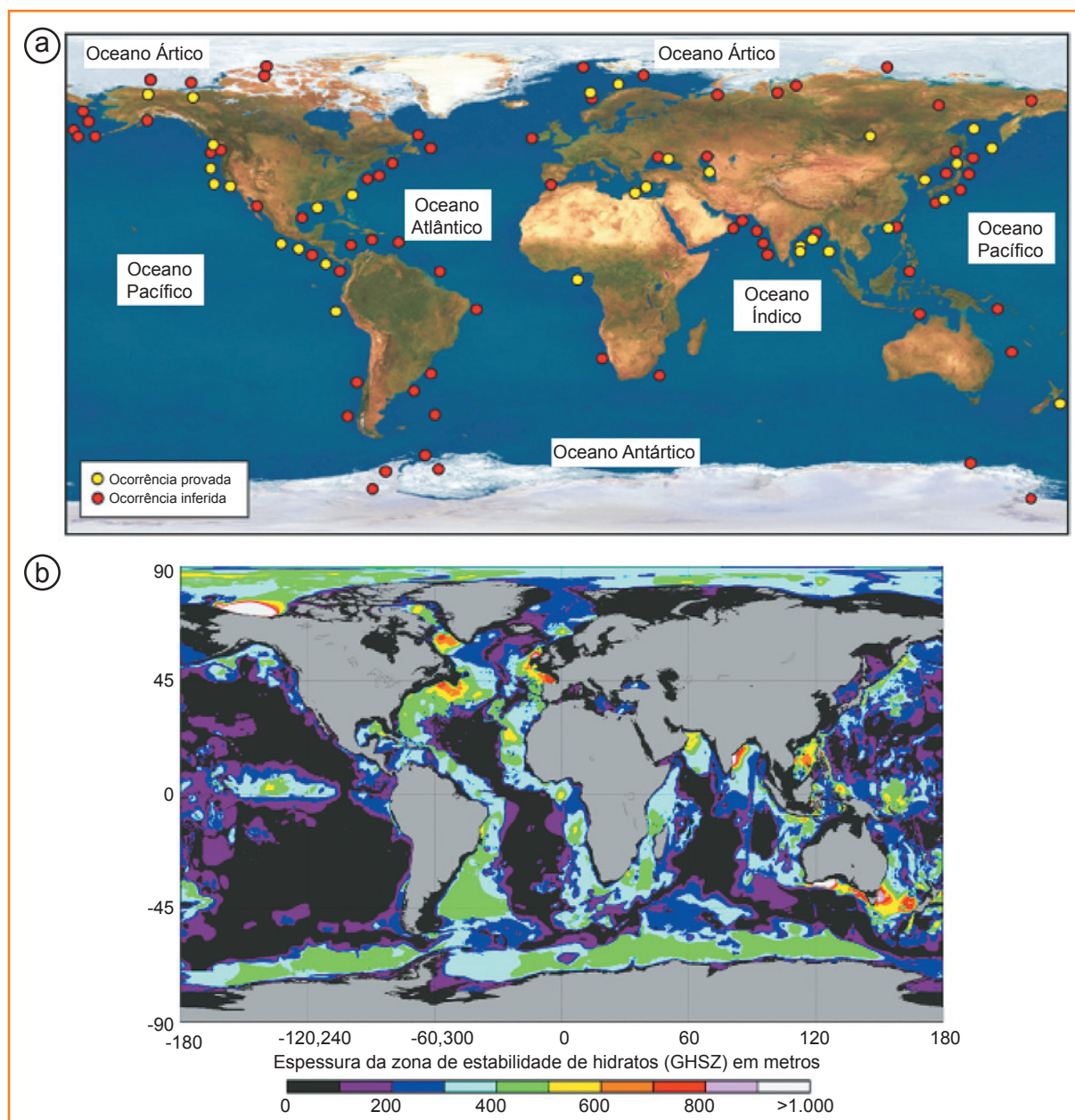
Os hidratos estão distribuídos ao longo das margens continentais ou em zonas de congelamento eterno (*permafrost zones*), localizadas nas regiões polares (fig. 2a). As estimativas da quantidade de gás natural sob a forma de hidratos excedem em muito as reservas conhecidas de gás natural no mundo, sendo da ordem de 10⁵ a mais de 3x10⁹ trilhões de pés cúbicos (TCF) (Sloan, 2003). O volume de carbono contido sob esta forma é estimado como duas vezes o total da quantidade de todo o carbono orgânico fóssil da Terra, incluindo óleo, gás e carvão (Kvenvolden,

Figura 2

(a) Ocorrências conhecidas (círculos amarelos) e inferidas através de BSRs (círculos vermelhos) de hidratos de gás em sedimentos marinhos, lagos e zonas eternamente congeladas (*permafrost*); (b) espessura estimada da zona de estabilidade de hidratos (GHSZ) em metros. Modificado de Council of Canadian Academies (2008).

Figure 2

(a) Known (yellow circles) and inferred by BSRs (red circles) natural gas hydrate occurrences in marine sediments, lakes and permafrost environments; (b) estimated gas hydrate stability zone (GHSZ) in metres. Modified from Council of Canadian Academies (2008).



1993). Estes cálculos são, geralmente, baseados em refletores sísmicos que simulam o fundo do mar (*bottom-simulating reflectors* - BSRs). A base da BSR indica o início da zona de estabilidade dos hidratos (*gas hydrate stability zone* - GHSZ), cuja espessura varia ao longo das margens continentais (fig. 2b) em função do gradiente geotérmico.

A BSR é formada por um refletor que, geralmente, corta os estratos sedimentares de forma paralela ao fundo do mar (fig. 3), sendo, assim, formada por processos posteriores à deposição dos sedimentos (Berndt *et al.*, 2004). A principal característica da BSR é a polaridade negativa, gerada pelo contraste de impedância acústica entre uma zona com hidratos

mais densa, acima, e uma zona com gás livre, menos densa, abaixo (Singh *et al.*, 1993). Desta forma, a BSR possui polaridade invertida em relação ao fundo do mar, passando de um pico branco para um pico preto.

Os primeiros registros sobre a ocorrência de hidratos em sedimentos marinhos datam do final dos anos 1970 através do Projeto *Deep Sea Drilling* (DSDP). Desde então os hidratos de gás vêm atraindo interesse como recurso energético potencial, além de serem considerados possíveis causadores de efeito estufa e de instabilidade de taludes. Entretanto, pouco se sabe sobre os fatores que controlam a formação e a estabilidade dos hidratos no substrato marinho, muito embora avanços significativos tenham sido alcançados

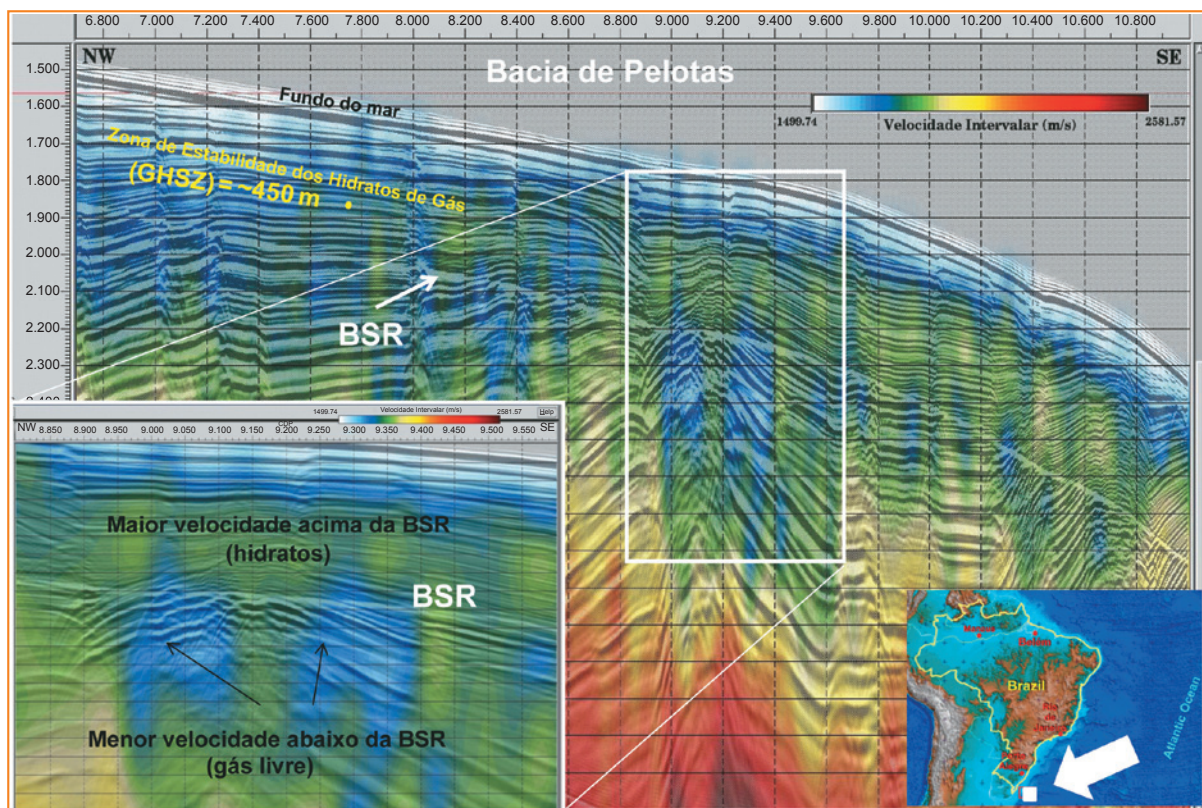


Figura 3
 Linha sísmica da Bacia de Pelotas, mostrando a BSR cortando os estratos sedimentares. Notar a polaridade negativa da BSR (inversa ao fundo do mar) e as anomalias de velocidade acima e abaixo da mesma. A BSR marca a base da zona de estabilidade dos hidratos de gás (GHSZ). Dado sísmico proprietário da Petrobras. Cortesia de Emanuel Fonseca da Costa e Sérgio Goulart Oreiro.

Figure 3
 Seismic profile of Pelotas Basin showing BSR cutting the sedimentary layers. Note the negative polarity (reverse to the seabottom) and the velocity anomalies above and below BSR. BSR indicates the base of the gas hydrate stability zone (GHSZ). Petrobras proprietary seismic data. Cortesia of Emanuel Fonseca da Costa e Sérgio.

graças ao contínuo estudo do tema por academias e instituições de pesquisas.

Gradualmente, importantes empresas petrolíferas do mundo vêm demonstrando interesse pelo tema, não apenas como potencial fonte energética, mas também como importante fator para a segurança de instalações submarinas, além de um possível mecanismo para o sequestro e transporte de dióxido de carbono.

O uso de hidratos naturais como fonte de energia depende do desenvolvimento de tecnologias econômicas para produção, especialmente em sedimentos marinhos profundos. O método mais promissor para produzir gás a partir da dissociação de hidratos é a depressurização, aplicável quando existe uma fase de gás livre abaixo da GHSZ. Sob essas condições, a produção de gás livre causa uma forte queda de pressão, tornando instável a camada de hidratos sobreposta, a qual é dissociada, progressivamente, em gás livre e água.

Esse processo adiciona mais gás livre ao processo, tornando viável e econômica sua produção. O aquecimento do reservatório através da injeção de fluidos quentes, além da injeção de substâncias que promovam a dissociação dos hidratos, como o etanol, são também aplicáveis em conjunto com a depressurização. Apesar de otimizar a produção, a combinação destas técnicas encarece todo o processo

produtivo, necessitando de uma profunda análise de viabilidade econômica.

O campo de Malik, na zona ártica do Canadá, possui o estágio exploratório/exploratório mais desenvolvido no mundo até o presente, representando um dos mais promissores campos de produção de gás obtido através da dissociação de hidratos. Foi descoberto no início dos anos 1980, através do poço exploratório Mallik L-38. Os estudos vêm sendo desenvolvidos por um consórcio entre Canadá, EUA e Japão, revelando saturações de hidratos maiores que 60%, excedendo, em alguns casos, 90% de saturação por volume de poros. Outras ações em estado avançado podem ser observadas na Costa Pacífica do Japão, na região denominada Nankai Trough, onde está prevista a realização de testes de produção de longa duração no biênio 2012/2013. Uma vez confirmado o potencial econômico dessa região, ações mais concretas irão se espalhar ao redor do mundo, em especial na costa oeste dos EUA e Canadá, além de Índia e China.

Devido ao fato de a GHSZ ser rasa, normalmente entre 300m e 600m abaixo do assoalho marinho, reservatórios que contêm hidratos de gás são frágeis e frágeis, tornando intensa a produção de areia e água dissociada durante o processo. Esses problemas, associados ao baixo ângulo de entrada próximo ao

fundo do mar para viabilizar a utilização de poços direcionais e horizontais, tornam a produção de gás, a partir da dissociação de hidratos, um grande desafio tecnológico para geólogos, geofísicos e engenheiros de reservatório.

geologia regional do Mar do Japão

O Mar do Japão é uma das mais típicas bacias de retroarco (*back-arc*) do mundo (Tamaki e Isezaki, 1996). Ela foi formada atrás do sistema de ilhas do Japão e foi iniciada através da abertura da margem leste da Eurásia há 25 Ma (Otofuji et al., 1985). A abertura foi completada antes de 15 Ma com a formação de crosta oceânica na região denominada Bacia do Japão (Jolivet et al., 1994).

Desde o Plioceno Médio, o estilo tectônico tem mudado do extensivo para o compressivo, formando uma série de estruturas anticlinais/sinclinais com alinhamento NNE-SSW ao longo da margem leste do Mar do Japão (Okui et al., 2008). Nesta margem tem sido observada uma zona de subducção incipiente (Nakamura, 1983), resultado do esforço entre a placa da Eurásia e a faixa de prismas de acreção Jurássicos-Cretácicos-Terciários que formam as ilhas do Japão (Takeuchi, 1996).

Em alguns destes anticlinais é observado um sistema de falhamentos de plano axial NNE-SSW por onde ocorre intenso escape de gases. Freire (2010) e Freire et al. (2011) sugerem que parte dos gases fica aprisionada na zona de estabilidade de hidratos de gás (GHSZ), dando origem a cristais de hidratos de metano, enquanto outra parte migra para a coluna d'água. Os gases que chegam ao fundo do mar (*gas seeps*) induzem à formação de plumas gigantes de metano, algumas com centenas de metros de altura e dezenas de metros de diâmetro (Matsumoto et al., 2009).

A Bacia Joetsu está localizada a sudoeste da Ilha Sado (fig. 4), tendo sido formada durante o Mioceno (Okui et al., 2008; Suzuki, 1979). Rochas geradoras se formaram nesse período devido à alta produtividade de matéria orgânica sob condições anóxicas nas formações Nanatani (<12,5 Ma) e Teradomari (12,5~5,5 Ma) (Okui et al., 2008). Entre 10 Ma e 3,5 Ma houve intenso aporte de sedimentos grossos para a Bacia Joetsu, tendo sido formados depósitos turbidíticos com boas condições para reservatórios nas formações Teradomari e Shiiya (5,5~3,5 Ma) (Okui et al., 2008). A Formação Nishiyama (3,5~1,3 Ma) recobre a Formação Shiiya, sendo composta por calcários e arenitos, intercalados com dacitos e andesitos.

O topo da Formação Nishiyama é caracterizado por um estilo "dominó", apresentando uma série de *horsts* e *grabens*. Falhas normais e reversas

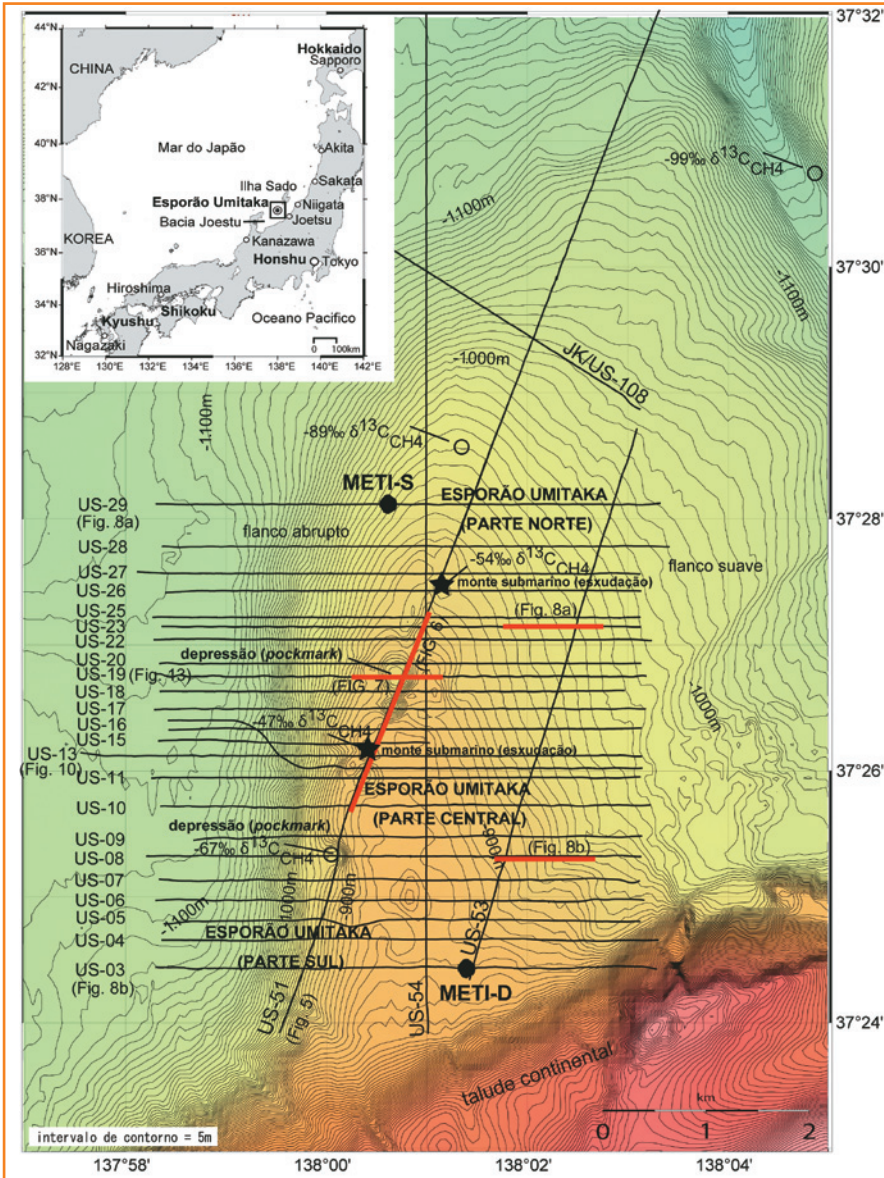


Figura 4 - No canto superior esquerdo, mapa de localização da Bacia Joetsu contendo o Esporão Umitaka. Mapa batimétrico do Esporão Umitaka mostrando os *mounds* e *pockmarks* alinhados na direção NE-SW. Estrelas indicam a localização de exsudações e plumas gigantes. Análises isotópicas de carbono em sedimentos do fundo (*headspace*) são identificadas. As linhas do levantamento sísmico 2D multicanal são mostradas no mapa. Detalhes das próximas figuras são identificados.

Figure 4 - In the left upper corner, location map of the Joetsu Basin and Umitaka Spur. Bathymetric map of the seafloor of the Umitaka Spur showing *mounds* and *pockmarks* in a NE-SW trending. Stars indicate *plume/seep* locations. Carbon isotope analyses of sediments are also showed. The 2D single channel seismic survey is indicated. Red Next figures location are shown.

são observadas, refletindo o complexo campo de tensões envolvido (Seno, 1999). Algumas dessas falhas são relíquias da fase rifte, reativadas durante o processo de inversão tectônica, conferindo um alto ângulo de inclinação (Jolivet *et al.*, 1994). A Formação Haizume tem sido depositada desde o Plioceno Superior, sendo composta predominantemente por sedimentos lamosos (Son *et al.*, 2001).

O Esporão Umitaka (*Umitaka Spur*) é um anticlinal assimétrico que vem sendo formado desde o Plioceno Médio, quando se iniciou a inversão tectônica (Takeuchi, 1996). A estrutura possui um alinhamento regional NE-SW e localiza-se a cerca de 30km a oeste da costa da cidade de Joetsu (fig. 4). O anticlinal tem uma área de 43km², tendo o flanco suave vergência para leste e o flanco abrupto vergência para oeste. O eixo do anticlinal mergulha para norte, o que fornece um aspecto de “nariz estrutural” (fig. 4). A crista do anticlinal está em profundidade de água de 900m, estando a base por volta de 1.100m. Na porção sul, o Esporão Umitaka está conectado ao talude continental, sendo um fator importante para o aporte de sedimentos terrígenos através do fluxo de detritos.

métodos

aquisição e processamento sísmicos 2D monocanal (SCS)

O equipamento de aquisição sísmica 2D monocanal (*single channel seismic* - SCS) foi planejado para avaliar uma profundidade aproximada de 600m, três vezes mais profunda que a base da zona de estabilidade de hidratos, prevista para ocorrer por volta de 200m abaixo do assoalho marinho. O equipamento foi composto por duas fontes sísmicas do tipo *air gun bolt cluster* operadas simultaneamente, com capacidade de 80 polegadas cúbicas cada (arranjo 40 x 40) e pressão de 14MPa.

As fontes foram rebocadas a cerca de 30m do navio com profundidades variando entre 1,5m e 7,4m, além de um conjunto de 48 hidrofones espaçados de 1m (tipo SIG 16) e distantes 166,5m da popa do navio e 136,5m da fonte. Os hidrofones, com sensibilidade de 90dB (1 V/microbar), foram

combinados em uma única antena que fornecia os dados para um canal, representando um único traço no sismograma. A velocidade do navio foi de 3,1 nós com pontos de tiro a cada 5s, o que configurou um tiro a cada 8,3m. O tempo de registro do sismograma foi de 4,0s com 1ms de taxa de amostragem, a qual conferiu uma frequência Nyquist máxima de 500Hz e média de 125Hz.

O levantamento SCS recobriu uma área de 77km² composta pelo anticlinal assimétrico Umitaka e pelas áreas em volta (fig. 4). Linhas longitudinais (*strike* e *quasi-strike*), com cerca de 15km de extensão cada, foram atiradas paralelamente ao eixo do anticlinal com o objetivo de observar as relações entre as estruturas em forma de chaminés de gás, montes submarinos (*mounds*) e depressões (*pockmarks*), além de interligar dois poços exploratórios perfurados na área pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI) (fig. 4).

Um total de 25 linhas transversais (*dip*), com extensão aproximada de 5km cada e espaçamento médio entre linhas de 400m, foi atirado no sentido perpendicular ao eixo da estrutura de oeste para leste. O objetivo dessas linhas foi avaliar a estratigrafia e identificar a presença de feições indicativas de hidratos e gás livre (fig. 4).

Os dados adquiridos foram processados em seis etapas. As duas primeiras foram compostas pela fase de pré-processamento, a qual envolveu a edição do traço sísmico para prevenir defeitos, efeitos de interpolação e de retardo no sistema. Na terceira etapa foi aplicado um filtro passa-alta de 25-30-360-400Hz em cada traço para desprezar sinais espúrios abaixo da frequência Nyquist de 500Hz, além de outras baixas frequências de oscilação indesejáveis. Na quarta etapa foi feita a correção esférica no domínio de tempo, seguida por uma deconvolução em cada traço com uma distância preditiva de 6ms e um comprimento de operador de 150ms, a fim de incrementar o conteúdo de frequência nos traços (quinta etapa).

Por fim, a sexta etapa consistiu na migração de ondas-frequência para um *offset* constante utilizando-se uma velocidade média de 1.500m/s. Tais procedimentos incrementaram a qualidade das seções nas zonas mais rasas, principal interesse deste trabalho, mas prejudicaram a qualidade sísmica para zonas mais profundas. Após a migração, as seções foram cortadas nos intervalos acima do fundo do mar para remover artefatos dentro da coluna d'água.

resultados

identificação de refletores sísmicos

Saeki *et al.* (2009) observaram um forte e contínuo refletor a cerca de 1,9s duplo (*two way*

travel - TWT) em seções sísmicas 3D obtidas em levantamento realizado pela empresa JOGMEQ no Esporão Umitaka, durante processo exploratório para localizar acumulações convencionais de óleo e gás, semelhantes às já encontradas na porção *onshore* da Bacia Joetsu.

Baseado nos dados dos poços METI-S (*shallow*) e METI-D (*deep*), aquele refletor foi identificado

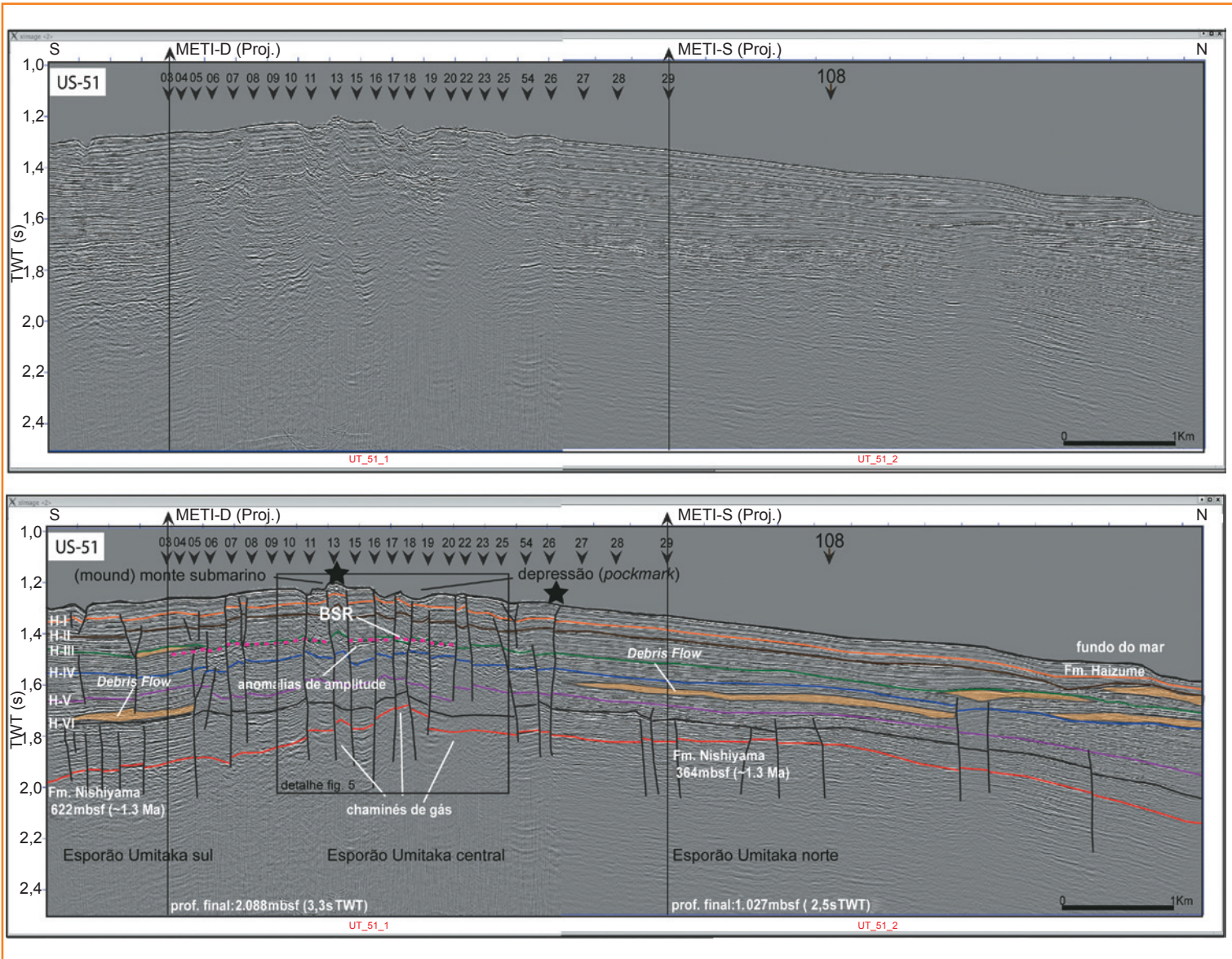


Figura 5 - Seção sísmica semilongitudinal (*quasi-strike*) US-51. Notar *mounds* e *pockmarks* no fundo do mar da parte central do esporão, onde o fraturamento é maior. Números no topo representam o cruzamento com linhas transversais à estrutura (*dip*). Os poços METI-D e METI-S são projetados na seção. Ver figura 4 para localização dos poços e da linha. Os refletores sísmicos H-I a H-VI são mostrados. O retângulo indica detalhe a ser mostrado na figura 6. Consultar texto para detalhes.

Figure 5 - *Quasi-strike* SCS section US-51. Note *mounds* and *depressions (pockmarks)* at the seafloor in the central part of the spur, where the fracturing is higher. Numbers at the top are intersections between *dip* and *strike* SCS sections. METI Deep and Shallow wells are projected. Seismic reflectors H-1 to H-VI are shown. See figure 4 for both wells and section locations. See text for details.

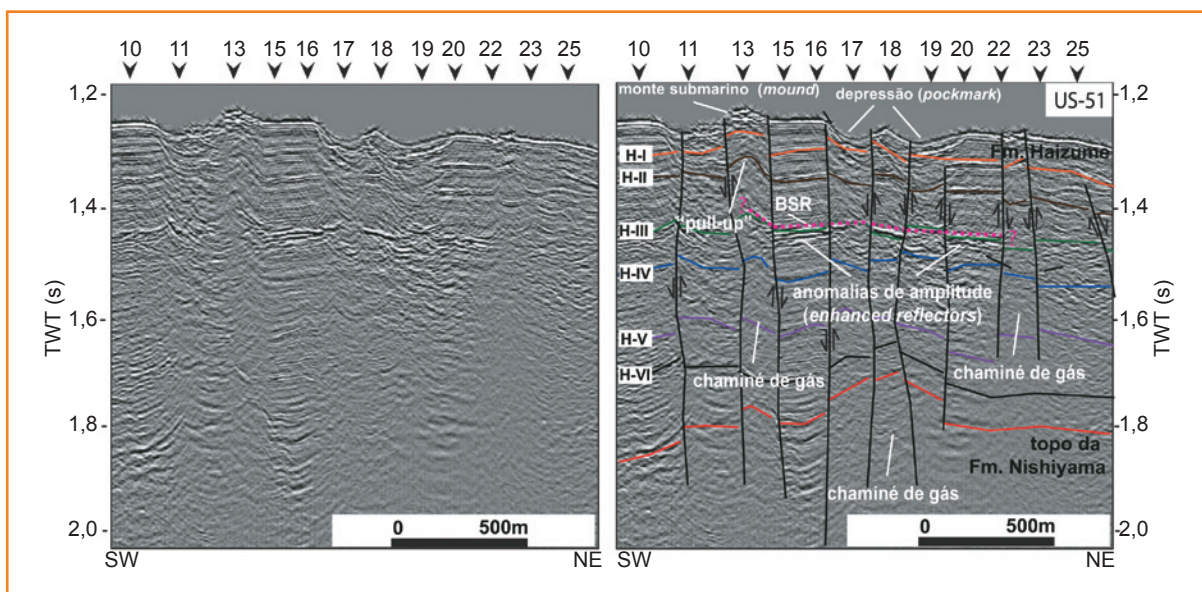


Figura 6

Detalhe da parte central da figura 5. Os refletores H-I a H-VI podem ser reconhecidos e correlacionados em todas as linhas monocanais. Notar que as falhas apresentam rejeito em toda a seção e conectam partes profundas da Formação. Nishiyama ao fundo do mar bem como à zona de estabilidade de hidratos (GHSZ). A linha rosa tracejada indica a BSR. Consultar a figura 4 para localização do trecho da seção. Consultar texto para detalhes.

Figure 6

Detail image of the near-strike SCS section US-51 of figure 4. Reflectors H-I to H-VI can be observed and correlated in all SCS sections. Note that faults link deep parts of the spur below the top of Nishiyama Fm. to the seafloor and to the GHSZ, where shifts are observed. Pink dashed line is the BSR. See figure 4 for section location. See text for details.

como o topo da Formação Nishiyama, correspondendo ao início do Pleistoceno por volta de 1,3 Ma, tendo sido encontrado a 364mbsf (metros abaixo do fundo do mar) e 622mbsf, respectivamente nos poços METI-S e METI-D (Okui *et al.*, 2008). Esse mesmo refletor foi identificado e correlacionado nas seções SCS deste estudo, podendo ser observado entre 1,8s e 2,0s TWT, fornecendo uma boa conversão tempo-profundidade através dos poços METI-S e METI-D (fig. 5).

Sismicamente, o topo da Formação Nishiyama, caracterizado por um forte refletor, é cortado por várias falhas normais e reversas de alto ângulo, sugerindo o reaproveitamento das primeiras durante a inversão tectônica (figs. 5 e 6). Outros seis refletores sísmicos pleistocênicos, contínuos e correlacionáveis, foram mapeados no anticlinal dentro da Formação Haizume, sobreposta à Formação Nishiyama (fig. 6).

identificação de falhas e fraturas

Um exagero de 20 vezes foi estimado para este levantamento sísmico monocanal, fazendo com que as estruturas geológicas apareçam mais verticalizadas do que o são na realidade. Todos os planos de falhas parecem estar em altos ângulos nas seções sísmicas SCS, podendo ser confundidos com fraturas onde o rejeito é muito pequeno. Entretanto, rejeitos são visíveis no topo da Formação Nishiyama e nos refletores sísmicos mapeados dentro da Formação Haizume (fig. 6). Por ser um levantamento 2D, com

espaçamento da ordem de 400m, não foi possível um mapeamento detalhado, mas se pôde estabelecer um contexto regional estrutural da área.

identificação de feições relacionadas à ocorrência de hidratos e gás livre

Tanto as seções transversais quanto as longitudinais apresentam feições características da presença de hidratos e de gás livre, como chaminés de gás (*gas chimneys*), refletor simulando o fundo do mar (*bottom-simulating reflector* - BSR), estruturas de ganho de velocidade para cima (*pull-up*), anomalias de amplitude (*enhanced reflectors*) abaixo da BSR, bem como a ocorrência de montes (*mounds*) e depressões (*pockmarks*) no fundo do mar, conforme descrito por Matsumoto *et al.* (2009), Freire *et al.* (2011) e Freire *et al.* (2012).

Chaminés de gás são comuns nas seções sísmicas interpretadas e sugerem a presença de migrações gasosas a partir de reservatórios profundos, particularmente associadas a zonas de falhas. Nestas zonas, aparentemente, há maior concentração relativa de gás, causando um decréscimo na velocidade sísmica.

Este decréscimo de velocidade sísmica gera anomalias de impedância acústica aleatórias, podendo ser visíveis nas seções como áreas de baixa qualidade sísmica, conhecidas como zonas de branqueamento sísmico. Esta característica costuma esconder refletores mais fracos, porém aqueles de intensidade mais

Figura 7

Detalhe da parte central da seção transversal US-19, mostrando um possível *pull-up* na chaminé de gás, relacionado à presença de hidratos dentro da GHSZ. Refletores com anomalia de amplitude abaixo da BSR sugerem uma acumulação de gás livre. Consultar figura 4 para localização da seção e texto para detalhes.

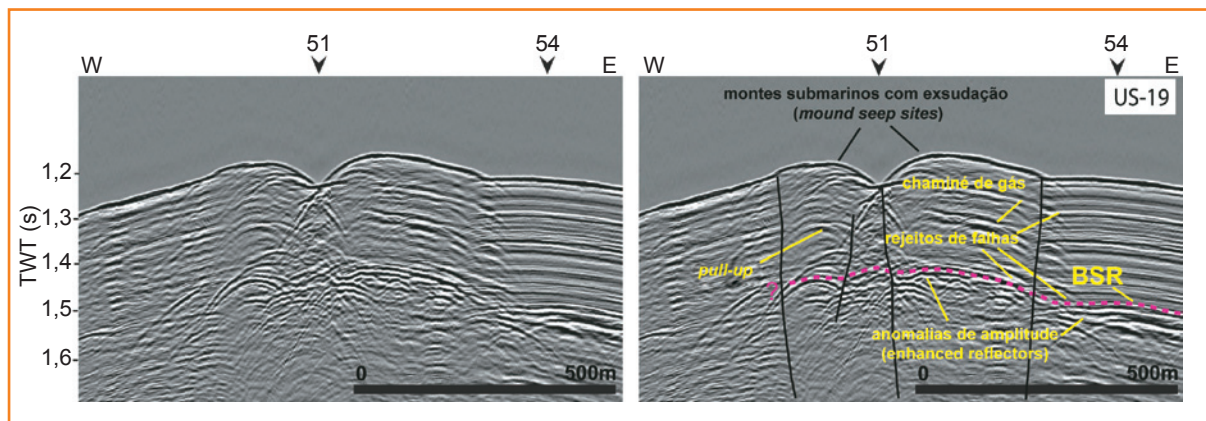


Figure 7

Detailed image of the dip section US-19 showing a possible *pull-up* structure within gas chimney inside the gas hydrate stability zone (GHSZ). Enhanced reflectors below BSR represent free gas accumulation below the GHSZ. See figure 4 for section location. See text for details.

forte permanecem visíveis, mesmo que de forma descontínua (Kou et al., 2007).

Várias chaminés de gás são visíveis na parte axial do anticlinal Umitaka, aparentando ser estreitas devido ao exagero vertical. Na verdade, as chaminés possuem dimensões da ordem de 500m a 700m de diâmetro, estando localizadas, preferencialmente, sob os montes e depressões observados no fundo do mar da região central do anticlinal (Freire et al., 2011).

Os limites das chaminés de gás são cortados por falhas profundas que interligam o topo da Formação Nishiyama ao assoalho oceânico, passando através dos refletores pleistocênicos da Formação Haizume

(fig. 6). Isto sugere intensa atividade tectônica, pelo menos durante todo o Holoceno, conforme observações prévias de Takeuchi (1996).

Os hidratos atuam como um cimento, ocupando o espaço poroso dos sedimentos ou preenchendo fraturas. Em alguns casos é possível identificar estruturas *pull-up* dentro de chaminés de gás, interpretadas como resultado da propagação das ondas sísmicas através de zonas com hidratos. Por serem mais densos, os hidratos causam um aumento da velocidade sísmica em relação aos sedimentos hospedeiros, fazendo com que os refletores sejam “puxados” para cima (fig. 7).

Figura 8

Detalhe das seções transversais US-23 e US-08. Zonas caóticas interrompem os refletores e são interpretadas como depósitos de fluxo de detritos. Notar um refletor sub-horizontal cortando outros refletores abaixo da BSR, associado a depósitos de fluxo de detritos, sugerindo um contato gás/água logo abaixo da GHSZ no flanco leste do anticlinal. Consultar figura 4 para localização das seções e texto para detalhes.

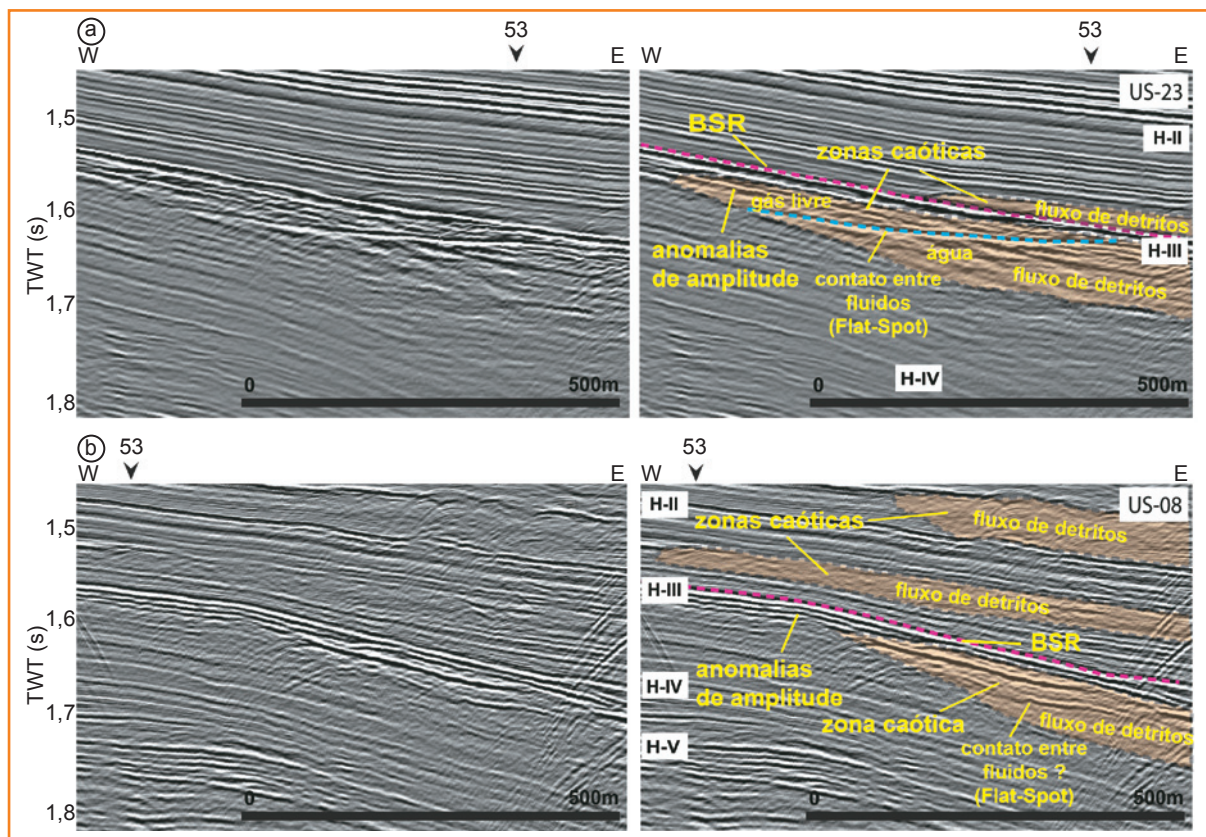


Figure 8

Detail image of the dip SCS sections US-23 and US-08. Chaotic zones are zones where reflectors are not continuous, and are here interpreted as debris flows. Note a flat reflector associated to a debris-flow representing a possible gas/water contact just below the GHSZ in the eastern flank of the Umitaka Spur. See figure 4 for sections location. See text for details.

Este fenômeno é observado também na base da zona de estabilidade de hidratos, onde sua concentração é maior. Este refletor, conhecido como BSR, marca o limite entre uma fase com hidratos sólidos acima e outra fase abaixo composta por gás livre (Hyndman e Davis, 1992). A inversão de polaridade (pico branco para pico preto) em relação ao refletor que representa o fundo do mar (convencionado de pico preto para pico branco) sinaliza que as ondas sísmicas transitaram de um meio mais denso (hidrato) para um meio menos denso (gás livre).

A BSR marca a base de uma região onde existe estabilidade entre pressão e temperatura, as quais são controladas pela profundidade dentro da coluna sedimentar (pressão litostática e gradiente geotérmico). Por esta razão a BSR é, geralmente, paralela ao fundo do mar. Em regiões onde os estratos são inclinados, a BSR corta estes refletores e é de fácil reconhecimento.

No caso do anticlinal Umitaka, entretanto, tanto a BSR quanto as camadas de sedimentos são paralelas ao fundo do mar, dificultando o seu reconhecimento. Conforme critério proposto por Horozal *et al.* (2009), a ocorrência de anomalias de amplitude (*enhanced reflectors*) que aparecem logo abaixo desta superfície foi adotada como indicador da presença da BSR (fig. 7). Através deste critério foi possível reconhecer a BSR na porção central e no flanco leste do anticlinal (figs. 7 e 8).

Um importante refletor sub-horizontal com polaridade normal é observado cortando outros refletores logo abaixo da BSR. Esta polaridade normal sugere que as ondas sísmicas transitaram de um meio menos denso (gás) para um meio mais denso (água?), lembrando que este refletor se encontra abaixo da zona de estabilidade de hidratos (fig. 8a).

Zonas caóticas acima e abaixo da BSR no flanco leste do anticlinal sugerem a ocorrência de fluxos de detritos (figs. 8a e 8b), os quais podem ser potenciais reservatórios de hidratos (acima) e de gás livre (abaixo), a depender de condições permoporosas favoráveis, desconhecidas até o presente momento.

velocidades sísmicas intervalares

O controle de profundidade fornecido pelos poços METI-S e METI-D, combinado com o reconhecimento do refletor correspondente ao topo da Formação Nishiyama nas seções SCS, permitiu calcular as velocidades intervalares acima desta formação ao longo do Esporão Umitaka. No poço METI-S, o topo da Formação Nishiyama foi inferido

a 364m abaixo do fundo do mar (mbsf) (Okui *et al.*, 2008), tendo sido reconhecido a 1,77s TWT na seção sísmica US-29 (fig. 9a).

Assim, a velocidade intervalar entre o fundo do mar e o topo da Formação Nishiyama, correspondente à Formação Haizume na porção norte da estrutura, onde o poço METI-S foi perfurado, é de cerca de 1.583m/s. Por outro lado, o topo da Formação Nishiyama no poço METI-D foi atingido aos 622mbsf (Okui *et al.*, 2008), tendo sido reconhecido na seção sísmica US-03 a cerca de 1,95s TWT (fig. 9b). Desta forma, a velocidade intervalar dentro da Formação Haizume foi calculada em 1.637m/s na porção sul da estrutura, onde o poço METI-D foi perfurado.

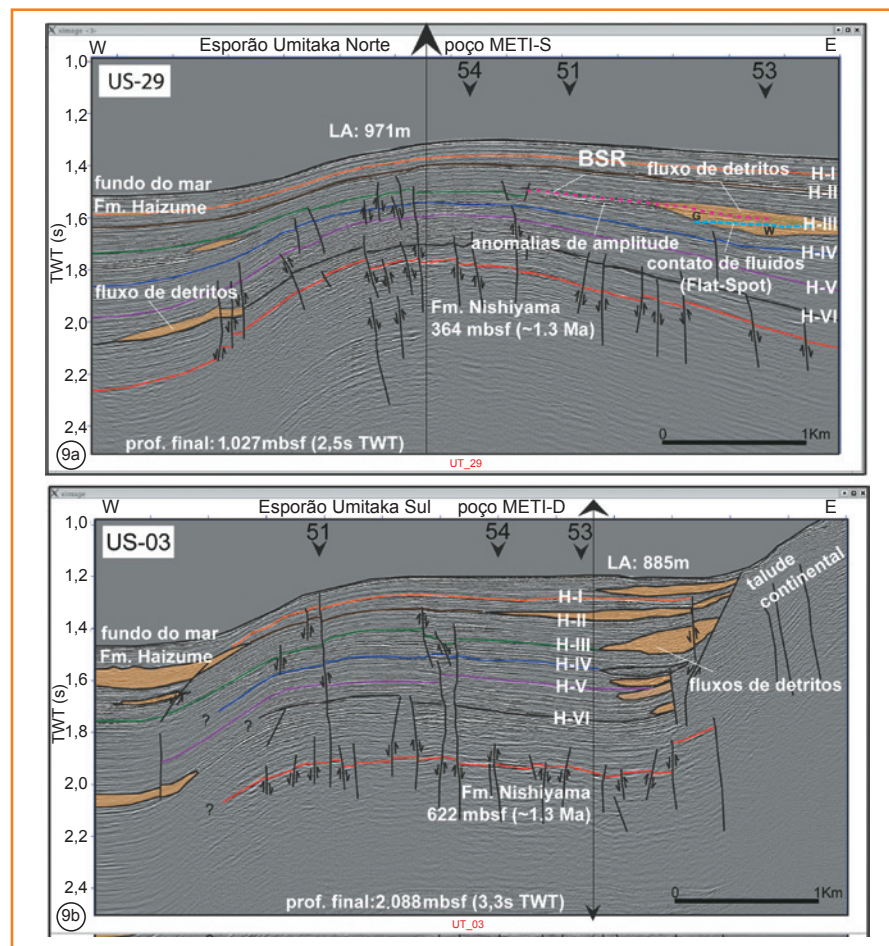
Infelizmente, não há informações publicadas disponíveis, até o momento, de nenhum dado petrofísico referente a estes intervalos, uma vez que os dois poços na estrutura foram perfurados sem retorno e sem perfilagem LWD ou a cabo até a profundidade de 400mbsf. Desta forma, os poços não avaliaram a coluna sedimentar entre o fundo do mar e a profundidade de 400m, bem abaixo da base da GHSZ que ocorreu por volta de 160mbsf (fig. 8).

Figura 9

Seções sísmicas transversais US-29 e US-03, mostrando a existência de depósitos de fluxo de detritos. Os poços METI-S e METI-D são projetados nas seções. Consultar figura 3 para localização das seções.

Figure 9

2D dip SCS sections US-29 and US-03, showing debris-flows deposits. METI-S and METI-D wells are projected. See figure 3 for sections location. See text for details.



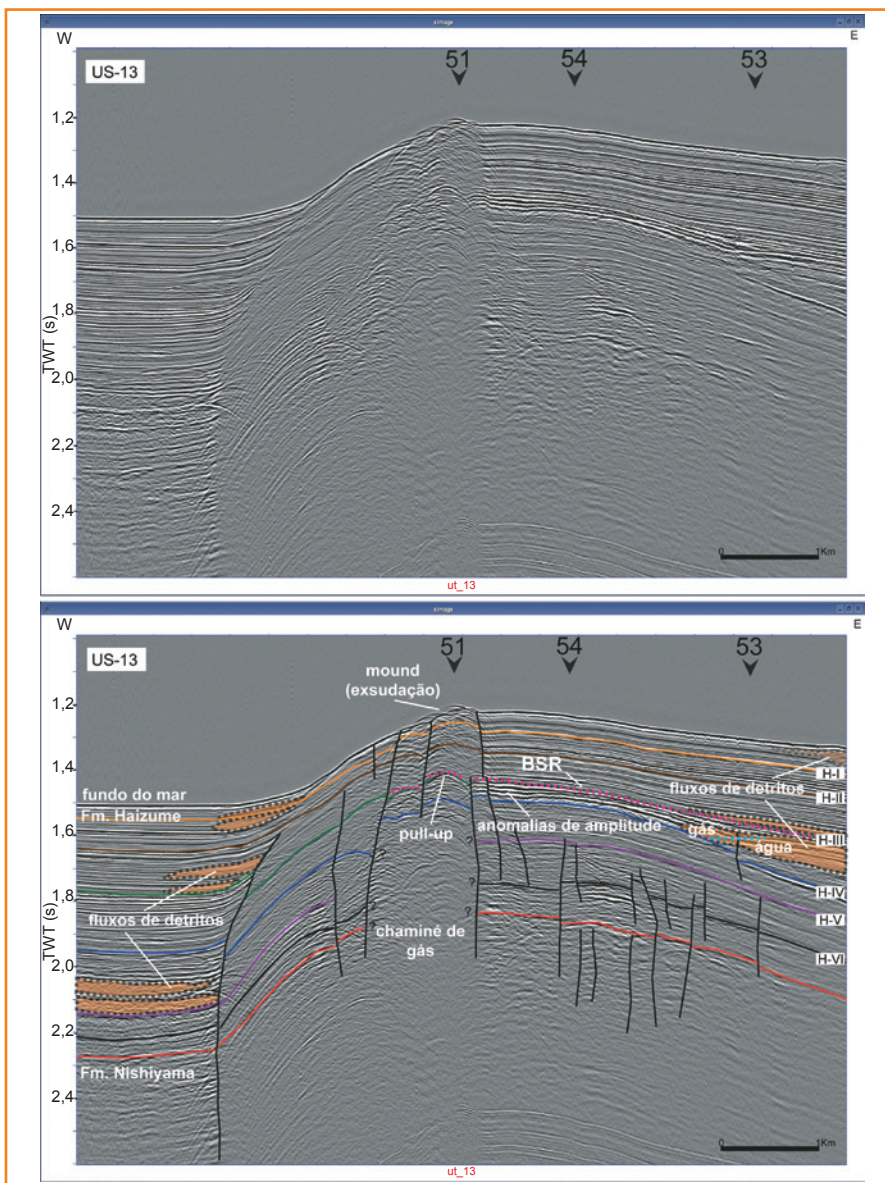


Figura 10
Seção transversal US-13, mostrando estrutura pull-up dentro da chaminé de gás. O aumento de velocidade se dá devido à existência de acumulação de hidratos de gás. Consultar figura 4 para localização da seção. Consultar texto para detalhes.

Figure 10
2D SCS dip section US-13, showing pull-up structure within a gas chimney. The increase in velocity is caused by gas hydrate accumulation. See figure 4 for sections location. See text for details.

Foi assumida uma velocidade intervalar média de 1.600m/s para o intervalo correspondente à Formação Haizume, similar àquelas sugeridas por Saeki *et al.* (2009) para o mesmo intervalo com o uso de sísmica 3D no Mar do Japão. Valores similares também foram propostos por Horozal *et al.* (2009) em sedimentos da margem oeste do Mar do Japão.

Contudo, na região axial central da estrutura não existem poços perfurados, provavelmente em função da potencial instabilidade causada pela presença de chaminés de gás e de hidratos, aliada à ocorrência de falhas axiais com potencial indução de perdas de circulação e consequente influxo de gás durante a perfuração.

Desta forma, a conversão tempo profundidade não é precisa nesta região. Entretanto, considerando a velocidade intervalar média de 1.600m/s,

a profundidade da BSR foi estimada ao redor de 160mbsf, considerando seu reconhecimento por volta de 1,39s TWT no flanco da estrutura, fora da chaminé de gás, onde os refletores são bem definidos (fig. 7).

Entretanto, levando-se em conta o efeito *pull-up* e a mesma profundidade de 160mbsf, a BSR está situada a 1,30s TWT dentro da chaminé de gás (fig. 7), o que daria uma velocidade entre 1.800m/s e 2.000m/s. Estas velocidades elevadas sugerem a presença de depósitos de hidratos no interior das chaminés de gás onde o fenômeno é observado. A profundidade da BSR varia conforme a posição ao longo do eixo da estrutura, podendo estar cerca de 10m a 20m mais profunda na porção centro-sul da estrutura (fig. 10).

discussão

O imageamento sísmico da Formação Haizume foi essencial para detectar estruturas sugestivas da presença de hidratos no Esporão Umitaka, haja vista que a zona de estabilidade de hidratos estava prevista para ocorrer a menos de 200mbsf. Assim, os parâmetros de aquisição e processamento sísmicos foram críticos para atingir este propósito, permitindo uma boa avaliação da Formação Haizume, apesar de se tratar de um levantamento 2D monocal. Através da interpretação das seções sísmicas foi possível reconhecer seis refletores sísmicos maiores, distribuídos ao longo de todo o anticlinal (fig. 5).

Sísmicamente, a Formação Haizume é caracterizada por refletores fortes e contínuos, sugestivos da deposição predominante de sedimentos lamosos, corroborada pelas observações de Son *et al.* (2001). Alguns refletores não são contínuos e desaparecem em zonas sísmicamente caóticas, fora das chaminés de gás, onde há o branqueamento sísmico (fig. 6).

As zonas caóticas foram interpretadas como depósitos de fluxos de detritos, sendo comuns entre os refletores H-I e H-IV no flanco leste do anticlinal (fig. 8). Estas zonas, quando localizadas dentro da zona de estabilidade de hidratos, caracterizam-se como potenciais reservatórios de hidratos. Para que isto ocorra, entretanto, são necessárias condições permeáveis favoráveis para que o hidrato preencha os poros e possa ser posto em produção, obtendo um comportamento similar ao de uma acumulação convencional de óleo ou gás.

O topo da Formação Nishiyama é caracterizado pela ocorrência de *grabens* e *horsts*, além de várias falhas normais e reversas (fig. 6). Isto indica o complexo campo de tensões envolvidas durante o processo de inversão que vem ocorrendo desde o Plioceno. Algumas destas falhas são heranças da fase rifte, reativadas durante o processo de inversão tectônica (Seno, 1999).

As falhas localizadas no eixo do anticlinal, onde o fraturamento é intenso, foram propagadas até o fundo do mar, ligando-o hidráulicamente a reservatórios profundos (Okui *et al.*, 2008). Por esta razão, são observadas intensas plumas de gás associadas à porção axial da estrutura, além da ocorrência de hidratos nos sedimentos superficiais. Tanto as plumas quanto os hidratos estão, invariavelmente, associados a *mounds* e *pockmarks* no fundo do mar.

O intervalo de 400m entre as linhas *dip* não permite um mapeamento detalhado do anticlinal, mas oferece uma boa ideia acerca da trama estrutural e da disposição das feições características da presença de hidratos e gases livres. Com base na correlação entre as linhas sísmicas foi construído um mapa contendo estas feições sísmicas, projetadas sobre o fundo do mar, além de uma batimetria detalhada onde também é possível observar outros indicadores geomorfológicos da presença de hidratos (fig. 11). Este mapeamento, associado aos dados batimétricos de alta resolução, possibilitaram visualizar a distribuição da ocorrência de potenciais zonas com hidratos e com gases livres.

Um alinhamento SW-NE é, aparentemente, o fator que controla a distribuição das chaminés de gás, enquanto os depósitos de fluxos de detritos têm, aparentemente, uma deposição vinda de sul para norte, a partir do talude continental. O eixo do anticlinal é segmentado em três seções, norte, central e sul, as quais são separadas por falhas de transferência controladas por uma resultante sinistral ao esforço compressional W-E. Aparentemente, este sistema controla a ocorrência de plumas na parte central da estrutura, onde o fraturamento é maior (fig. 11).

Fica evidente a íntima relação entre chaminés de gás, *mounds*, *pockmarks* e zonas de exsudação no fundo do mar. Imagens obtidas através de veículo operado remotamente (*remote operate vehicle* - ROV) indicam a presença de afloramentos de hidratos (figs. 12a e 12b), além de feições típicas da ocorrência de exsudações de gases, como a presença de carbonatos autigênicos (fig. 12c), de comunidades quimiossintéticas associadas às exsudações (figs. 12d, 12e e 12f), além dos *pockmarks* e *mounds* (figs. 12g e 12h).

A crosta carbonática, formada devido à precipitação química de carbonatos no espaço poroso em função da oxidação anaeróbica do metano (*anaerobic oxidation of methane* - AOM), está exposta no fundo do mar graças à erosão dos sedimentos superficiais. Esta precipitação ocorre em função da reação química entre o metano e a água intersticial, rica em íons sulfato, provocando a oxidação do metano.

As exsudações de metano são tão vigorosas no ápice da estrutura, que grande parte do metano não reage com o sulfato da água do mar, originando intensas plumas gasosas. Contudo, as bolhas gasosas se cristalizam assim que brotam no fundo do mar ao contato com a água fria da região (0,2°C), formando uma película de hidrato em volta (fig. 12c). As exsudações servem como fonte de carbono para uma comunidade quimiossintética, formada por tapetes de *archaeas*+bactérias, caranguejos e peixes de fundo.

As depressões (*pockmarks*) são, possivelmente, causadas pela dissociação catastrófica de hidratos motivada por uma redução drástica de pressão ou aumento brusco da temperatura durante um rebaixamento importante do nível do mar, tal qual o ocorrido durante o Último Máximo Glacial (*last glacial maximum* - LGM) (Matsumoto *et al.*, 2009). Já os montes submarinos (*mounds*) são formados pela expansão de volume do sedimento em função da cristalização de hidratos no espaço poroso (Freire *et al.*, 2012; Matsumoto *et al.*, 2009).

Um sistema petrolífero ativo, porém ineficiente quanto ao selo e trapeamento, é observado no Esporão Umitaka. Este escape de gases é verificado através de intensas e constantes plumas gigantes de gases dentro da coluna d'água (>600m), conforme documentado por Aoyama e Matsumoto (2009) e Matsumoto (2005). Aparentemente, selo e trapa não são eficientes de Aoyama ido ao sistema de falhas axiais profundas que conectam reservatórios profundos de óleo/gás, atestados pelo poço METI-D em arenitos tufáceos a cerca de 1200mbsf (Okui *et al.*, 2008).

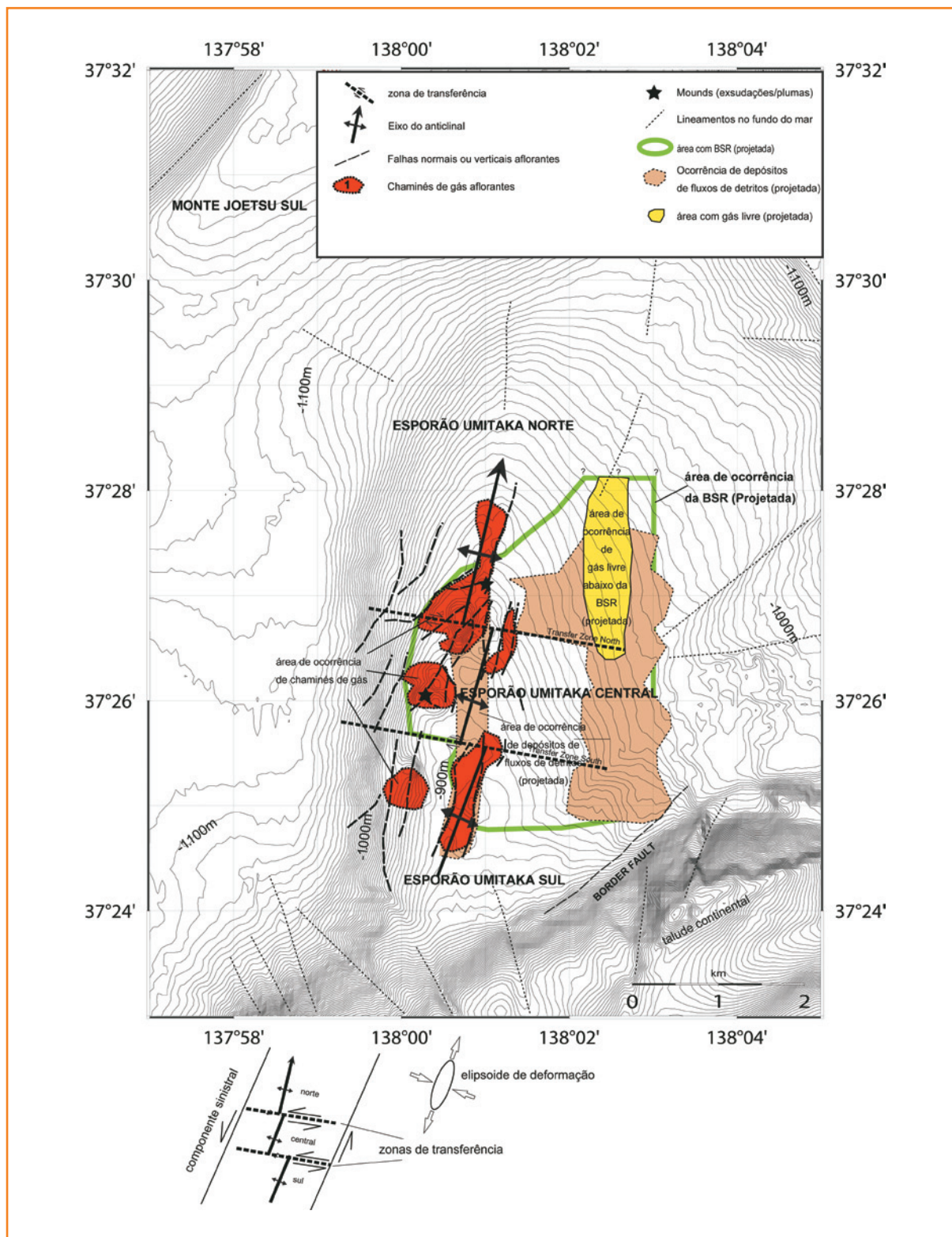
Acumulações de gás livre imediatamente abaixo da BSR também estão conectadas, sendo um dos componentes destas intensas exsudações. Análises isotópicas dos gases contidos nos sedimentos e presentes nas plumas (Ishizaki, 2008) indicam, assinatura tipicamente termogênica (>-60‰ em $^{-13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) nas zonas localizadas imediatamente na crista do anticlinal, próximo às exsudações, enquanto nos sedimentos distantes destas zonas a assinatura isotópica é tipicamente biogênica (<-60‰ em $^{-13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) (fig. 4).

Figura 11

Mapa baseado na interpretação das linhas 2D monoclinais. As feições relacionadas à presença de hidratos e gás livre estão projetadas no fundo do mar. Um esquema sobre a tectônica resultante no anticlinal é mostrado no canto inferior esquerdo. Consultar texto para detalhes.

Figure 11

2D SCS based map of the seafloor, where deeper features are projected. A tectonic model of the structure is shown in the bottom left corner. See text for details.



O caráter termogênico destas exsudações (Hiruta *et al.*, 2009; Matsumoto *et al.*, 2009), associado ao tamanho e intensidade das plumas, sugere que estes gases são provenientes de zonas profundas e não podem ser originados por processos biogênicos rasos.

Alta pressão e grande volume de gás são necessários para manter estas plumas gigantes, constantes por tanto tempo. Isto só é possível quando o gás migra de grandes profundidades, abaixo da zona de estabilidade de hidratos.

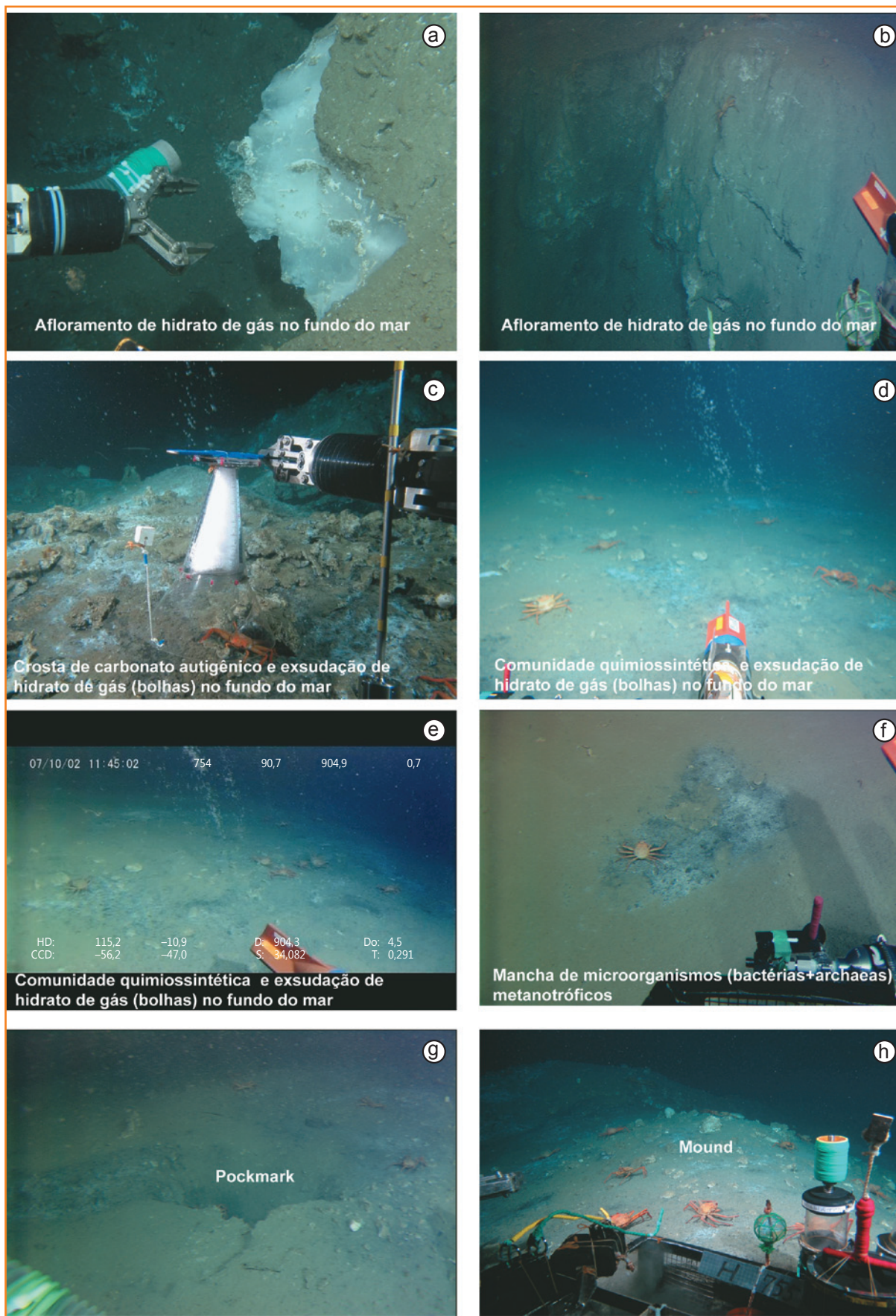


Figura 12
Fotos submarinas feitas através do ROV *Hyper Dolphin* da JAMSTEC: (a) e (b) afloramentos de hidratos em paredes de *pockmarks* expostas; (c) crosta de carbonatos autigênicos formada pela oxidação anaeróbica do metano (AOM); (d), (e) e (f) exsudações de bolhas gasosas revestidas por fina película hidratada que servem como fonte de carbono para uma comunidade quimiossintética, formada por tapetes de *archaeas*+bactérias, caranguejos e peixes de fundo; (g) depressão (*pockmark*); (h) monte submarino (*mound*). Consultar texto para detalhes.

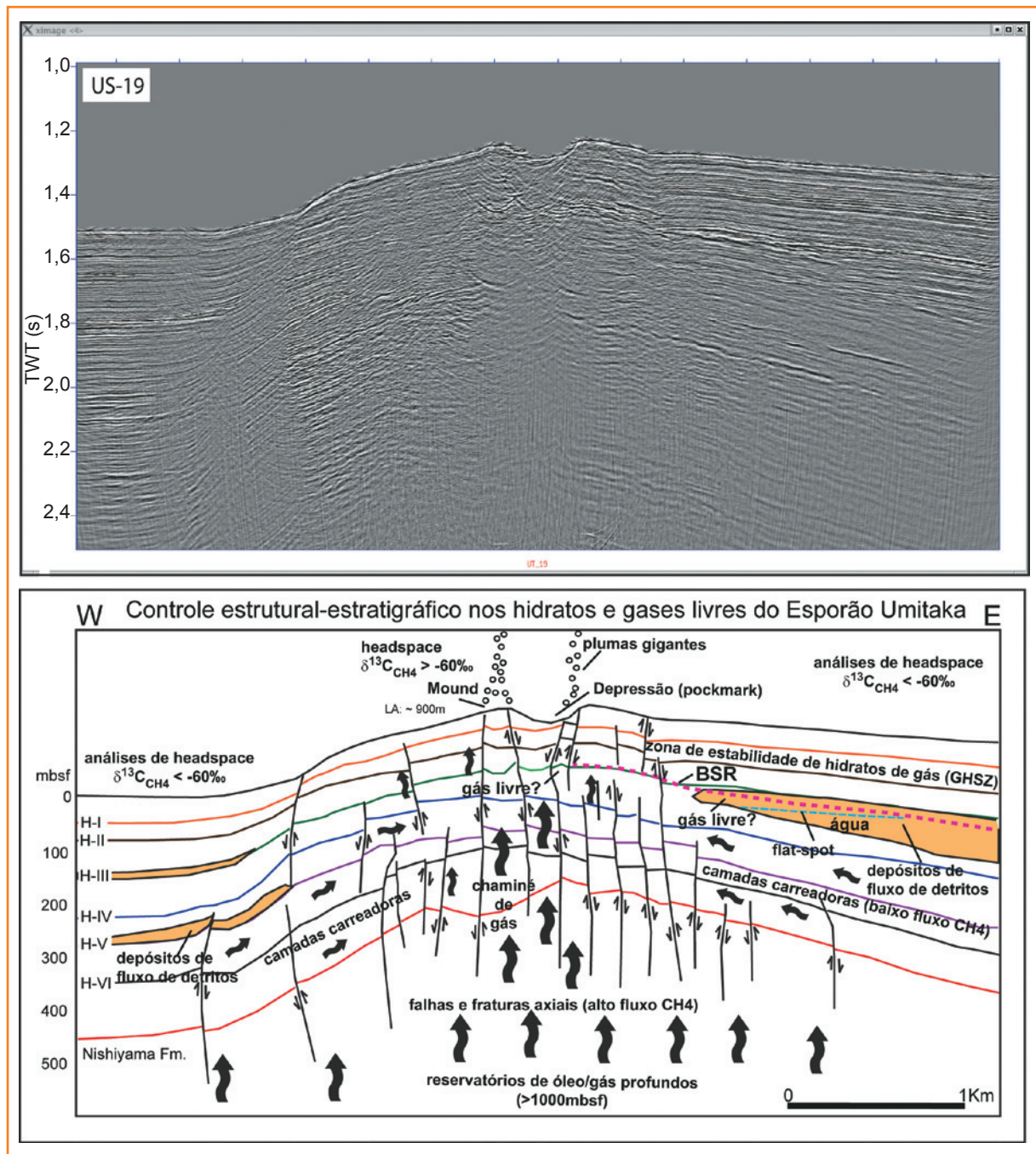
Figure 12
Undersea photos by ROV Hyper Dolphin from JAMSTEC: (a) and (b) hydrate outcrops at exposed walls of pockmarks; (c) authigenic carbonate crusts formed as a result of the anaerobic oxidation of methane (AOM); (d), (e) and (f) gas bubbles covered by a hydrate film that release organic carbon supplying food to a chemiossintetic community, composed by archaeas+bacterial mat, crabs and demersal fish; (g) depression (pockmark); (h) undersea mound. See text for details.

Figura 13

Modelo estrutural-estratigráfico para a ocorrência de hidratos e gases livres no Esporão Umitaka, baseado na seção transversal US-19. O tamanho das setas indica a amplitude da migração preferencial. A geometria do anticlinal, os falhamentos de plano axial e as camadas carreadoras focalizam o fluxo de migração de gás para a porção axial central da estrutura, formando intensas plumas de metano e afloramentos de hidratos no fundo do mar. Consultar figura 4 para localização da seção. Consultar texto para detalhes.

Figure 13

Structural-stratigraphic model for gas hydrate and free-gases occurrence for the Umitaka Spur, based on dip SCS US-19. Arrow size indicate the amplitude of gas migration. The anticline geometry, axial-plain faults and carrier beds concentrates the gas migration flux into the central axial part of the structure, inducing giant plumes and gas hydrate outcrops at the seafloor. See figure 4 for sections location. See text for details



Anomalias de amplitude associadas à BSR são observadas, principalmente, no flanco leste do anticlinal. Também é nesta região que se localizam os depósitos de fluxos de detritos (fig. 8), interpretados aqui como tendo condições permoporosas para acumulação de hidratos e de gás livre acima e abaixo da BSR, respectivamente.

A pouca eficiência do selo e do trapeamento desfavorece acumulações convencionais de hidrocarbonetos em profundidade. Por outro lado, o escape intenso e constante de gases termogênicos alimenta a zona de

estabilidade de hidratos até atingir seu ponto de saturação máxima. Parte destes gases fica retida abaixo da BSR devido à cimentação dos grãos pela cristalização dos hidratos no espaço poroso acima, apesar da baixa espessura de sedimentos (<250m). Em condições normais, esta coluna sedimentar não suportaria uma acumulação pressurizada de gás.

Os hidratos estariam agindo, neste caso, como selo para uma acumulação rasa não convencional de gás. Entretanto, em função da atividade tectônica ainda presente, falhas e fraturas continuam abertas,

servindo de dutos para a migração de gases excedentes até o fundo do mar.

A combinação de falhas, camadas carreadoras, contatos geológicos e geometria do anticlinal, associada a uma fonte de gás termogênico, induz a migração de gases para a zona axial da estrutura, além de aportar gases para a zona de estabilidade de hidratos, favorecendo a cristalização dos mesmos.

Tais concentrações de gases induzem a um decréscimo de velocidade abaixo da BSR, causando um forte contraste de impedância acústica entre a zona rica em hidratos acima e a zona com gás livre abaixo. As feições estruturais e estratigráficas controlam, aparentemente, a formação e distribuição de hidratos, a distribuição das chaminés de gases e as plumas gasosas na coluna d'água. Controlam também a distribuição dos *mounds* e *pockmarks*. Um modelo geológico foi construído com base na seção sísmica US-19, localizada na parte central da estrutura (fig. 13).

sumário e conclusões

Este estudo possibilitou chegar às seguintes conclusões:

- 1) a Formação Haizume (Pleistoceno) pode ser dividida em seis refletores sísmicos principais, denominados neste trabalho como H-I, próximo ao topo, até H-VI, próximo à base, recobrindo os sedimentos da Formação Nishiyama (Plioceno). Falhamentos normais e verticais deslocam estes refletores, indicando que o tectonismo continua ativo até o presente. Estes falhamentos conectam reservatórios profundos (>1.000mbsf), portadores de hidrocarbonetos, à zona de estabilidade de hidratos (GHSZ) e ao fundo do mar. Depósitos de fluxo de detritos são comuns ao longo da sedimentação quaternária, inclusive dentro da GHSZ, podendo representar potenciais reservatórios de hidratos.
- 2) o Esporão Umitaka é um anticlinal assimétrico com um complexo sistema de falhas axiais de direção NE-SW. Neste sistema axial são observadas falhas normais, reversas e verticais de baixo rejeito, assemelhando-se a fraturas. O centro do anticlinal é a região mais fraturada

devido ao formato dômico causado pela compressão W-E e por falhas de transferências que fragmentam o eixo da estrutura em um padrão sinistral. A combinação de falhas axiais, geometria do anticlinal e o deslocamento através de camadas carreadoras e contatos litológicos induzem a migração de gás para o topo da parte central axial da estrutura.

- 3) o sistema de falhas axiais atravessa tanto os reservatórios profundos quanto as regiões mais rasas, tornando o selo e o trapeamento ineficientes para acumulações convencionais de hidrocarbonetos. Entretanto, este vazamento contribui com o aporte de gás para a GHSZ, induzindo a formação de hidratos. O excesso de gases é levado até o fundo do mar, onde forma intensas exsudações e plumas gigantes de metano na coluna d'água.
- 4) anomalias de amplitude abaixo da BSR, associadas a um contato sub-horizontal entre fluidos, sugerem a existência de acumulações não convencionais de gás, cujo selo é a zona de sedimentos cimentada por hidratos acima.

agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem a orientação do professor Ryo Matsumoto, ao qual agradeço imensamente. Agradeço aos colegas Luiz A. Santos, Fernando Collo Correa e Castro, Dennis James Miller e Renato Oscar Kowsmann, cujos comentários e discussões técnicas foram fundamentais. Agradecimentos especiais a Adriano Roessler Viana, Almério Barros França, Dimas L. Coelho, Edison José Milani, Luiz Antonio Freitas Trindade, Mario Carminatti e Sylvia Maria Couto dos Anjos pelo valioso suporte gerencial durante os estudos. Aos colegas Akihiro Hiruta, Gilmar Vital Bueno e Nilo Siguehiko Matsuda por todo o apoio pessoal e logístico. Agradecimentos aos revisores e editores do *Boletim de Geociências da Petrobras* pelos comentários e sugestões.

Esta pesquisa foi suportada financeiramente pelo Ministério da Educação, Cultura, Esportes e Tecnologia do Japão (MEXT) (n^{os} 19204049 e 16201002), em conjunto com o Programa

Tecnológico de Fronteiras Exploratórias (Profex) do Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes).

referências bibliográficas

AOYAMA, C.; MATSUMOTO, R. Acoustic surveys of methane plumes by quantitative echo sounder in Japan Sea and estimate of the seeping amount of the methane hydrate bubbles. **Journal of Geophysics**, Indiana, v. 118, n. 1, p. 156-174, 2009.

BERNDT, C.; BÜNZ, S.; CLAYTON, T.; MIENERT, J.; SAUNDERS, M. Seismic character of bottom simulating reflectors: examples from the mid-Norwegian margin. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v.21, n. 6, p. 723-733, June 2004.

EDMONDS, B.; MOORWOOD, R.; SZCZEPANSKI, R. A. Practical model for effect of salinity on gas formation. In: EUROPEAN PRODUCTION OPERATIONS CONFERENCE AND EXHIBITION, 1996, Stavanger, Norway. **Proceedings...** London: SPE, 1996. Paper 35569

FREIRE, A. F. M.; MENEZES, T. R.; MATSUMOTO, R.; SUGAI, T.; MILLER, D. J. Origin of the organic matter in the Late-Quaternary sediments of the eastern margin of Japan Sea. **Journal of the Sedimentological Society of Japan**, Fukuoka, v. 68, n. 2, p. 117-128, 2009.

FREIRE, A. F. M. **An integrated study on the gas hydrate area of Joetsu Basin, eastern margin of Japan Sea, using geophysical, geological and geochemical data**. 2010. 247 f. Thesis (PhD) – University of Tokyo, Tokyo, 2010.

FREIRE, A. F. M.; SUGAI, T.; MATSUMOTO, R. O uso de cinzas vulcânicas para correlações estratigráficas na margem leste do Mar do Japão. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 18, n.1, p. 97-121. nov. 2009/maio 2010.

FREIRE, A. F. M.; MATSUMOTO, R.; SANTOS, L. A. Structural-stratigraphic control on the Umitaka Spur gas hydrates of Joetsu Basin in the eastern margin of the Japan Sea. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 28, n. 10, p. 1967-1978, Nov. 2011.

FREIRE, A. F. M.; MATSUMOTO, R.; AKIBA, F. Geochemical analysis as a complementary tool to

estimate the uplift of sediments caused by shallow gas hydrates in mounds at the seafloor of Joetsu Basin, eastern margin of Japan Sea. **Journal of Geological Research**, Cairo, p. 1-14, 2012.

HIRUTA, A.; SNYDER, G. T.; TOMARU, H.; MATSUMOTO, R. Geochemical constraints for the formation and dissociation of gas hydrate in an area of high methane flux, eastern margin of the Japan Sea. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 279, n. 3-4, p. 326-339, Mar. 2009.

HOROZAL, S.; LEE, G. H.; YI, B. Y.; YOO, D. G.; PARL, K. P.; LEE, H. Y.; KIM, W.; KIM, H. J.; LEE, K. Seismic indicators of gas hydrate and associated gas in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications of heat flows derived from depths of the bottom-simulating reflector. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 258, n. 1-4, p. 126-138. Mar. 2009.

HYNDMAN, H. D.; DAVIS, E. E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Richmond, v. 97, n. B5, p. 7025–7041, May 1992.

ISHIZAKI, O. **Influence on the marine environment of active methane plumes off Naoetsu, eastern margin of Japan Sea**. 2008. 79 f. Thesis (PhD.) – University of Tokyo, Tokyo, 2008.

JOLIVET, L.; TAMAKI, K.; FOURNIER, M. Japan Sea, opening history and mechanism: a synthesis. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Richmond, v. 99, n. B11, p. 22237-22259, Nov. 1994.

KOU, W. W-H.; SMITH, M. A.; AHMED, A.; KUZELA, R. Direct seismic indicators of gas hydrates in the Walker Ridge and Green Canyon areas, deepwater Gulf of Mexico. **The Leading Edge**, Tulsa, v. 26, n. 2, p. 152-155, Feb. 2007.

KVENVOLDEN, K. A. Gas hydrates as a potential energy resource: a review of their methane content. In: HOWELL, D. G. (Ed.). **The future of energy gases**. Washington: United States Government Printing Office, 1993, p. 555-561. (U.S. Geological Survey Professional Paper; 1570).

- MATSUMOTO, R. Methane plumes over a marine gas hydrate system in the eastern margin of Japan Sea: A possible mechanism for the transportation of subsurface methane to shallow waters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GAS HYDRATES, 5., 2005, Trondheim. **Proceedings**...Trondheim: Torstein Austvik, Statoil R&D Centre, 2005. p. 749-754.
- MATSUMOTO, R.; OKUDA, Y.; HIRUTA, A.; TOMARU, H.; TAKEUCHI, E.; SANNO, R.; SUZUKI, M.; TSUCHINAGA, K.; ISHIDA, Y.; ISHIZAKI, O.; TAKEUCHI, R.; KOMATSUBARA, J.; FREIRE, A. F. M.; MACHIYAMA, H.; AOYAMA, C.; JOSHIMA, M.; HIROMATSU, M.; SNYDER, G.; NUMANAMI, H.; SATOH, M.; MATOBA, Y.; NAKAGAWA, H.; KAKUWA, Y.; OGIHARA, S.; YANAGAWA, K.; SUNAMURA, M.; GOTO, T.; LU, H.; KOBAYASHI, T. Formation and collapse of gas hydrate deposits in high methane flux area of the Joetsu Basin, Eastern Margin of Japan Sea. **Journal of Geography**, Indiana, v. 118, n. 1, p. 43-71, 2009.
- NAKAMURA, K. Possible nascent trench along the eastern Japan Sea as the convergent boundary between Eurasian and North American Plates. **Bulletin Earthquake Research Institute University of Tokyo**, v. 58, n. 3, p. 711-722, 1983.
- OKUI, A.; KANEKO, M.; NAKANISHI, S.; MONZAWA, N.; YAMAMOTO, H. An integrated approach to understanding the petroleum system of a frontier deep-water area, offshore Japan. **Petroleum Geosciences**, London, v. 14, n. 3, p. 1-12. p. 223-233, Aug. 2008.
- OTOFUJI, Y.; MATSUDA, T.; NOHDA, S. Opening mode of the Japan Sea inferred from the palaeomagnetism of the Japan Sea. **Nature**, London, v. 317, n. 6038, p. 603-604. Oct. 1985.
- SAEKI, T.; INAMORI, T.; NAGAKUBO, S.; WARD, P.; ASAKAWA, E. 3D seismic structure below mounds and pockmarks in the deep water southwest of Sado Island. **Journal of Geography**, Indiana, v. 118, n. 1, p. 93-110, 2009.
- SENO, T. Synthesis of the regional stress fields of the Japanese islands. **The Island Arc**, Carlton, v. 8, n. 1, p. 66-79, Mar. 1999
- SINGH, S. C.; MINSHULL, T. A.; SPENCE, G. D. Velocity Structure of a Gas Hydrate Reflector. **Science**, New York, v. 260, n. 5105, p. 204-207, Apr. 1993.
- SLOAN JR., E. D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates. **Nature**, London, v. 426, n. 6964, p. 353-359, Nov. 2003.
- SON, B-K; YOSHIMURA, T.; FUKUSAWA, H. Diagenesis of dioctahedral and trioctahedral smectites from alternating beds in Miocene to Pleistocene rocks of the Niigata Basin, Japan. **Clays and Clay Minerals**, Chantilly, v. 49, n. 4, p. 333-346, Aug. 2001.
- SUZUKI, U. Petroleum geology of the Sea of Japan, northern Honshu. **Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology**, Tokyo, v. 44, n. 5, p. 291-307, 1979.
- TAKEUCHI, A. Recent Crustal Movements and Strains Along the Eastern Margin of Japan Sea Floor. In: ISEZAKI, N. *et al.* (Eds.). **Geology and geophysics of the Japan Sea**. Tokyo: Terra Scientific, 1996. p. 385-398. (Japan-URSS Monography Series; v. 1).
- TAMAKI, K.; ISEZAKI, N. Tectonic synthesis of the Japan Sea based on the collaboration of the Japan-URSS Monograph Project. In: ISEZAKI, N. *et al.* (Eds.). **Geology and geophysics of the Japan Sea**. Tokyo: Terra Scientific, 1996. p. 385-398. (Japan-URSS Monography Series; v. 1).
- TOMARU, H.; LU, H.; SNYDER, G. T.; FENH, U.; HIRUTA, A.; MATSUMOTO, R. Origin and age of pore waters in an actively venting gas hydrate field near Sado Island, Japan Sea: interpretation of halogen and ¹²⁹I distributions. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 236, n. 3-4, p. 350-366, Jan. 2007.

expanded abstract

Gas hydrate is an ice-like solid compound composed of methane and water molecules. Since the discovery of gas hydrate, often called “methane hydrate”, in deep sea sediments in late 1980’s during the Deep Sea Drilling Project, marine gas hydrate has been attracting interest with regard to future energy resources as well as environmental mediators as an enormous carbon sink. Although exploration of marine gas hydrate has rapidly increased the knowledge about its occurrence, origin and significance, there is very little knowledge about the accumulation mechanisms, factors controlling the emplacement, and evolution of gas hydrate systems in marine sediments.

Gas hydrate has often been identified as anomalous reflectors called bottom-simulating reflectors (BSRs) in seismic profiles, and believed to be a layer parallel with the bottom surface around few hundred meters below the seafloor (mbsf). However, recent observations of the ocean floor and geochemical studies have revealed various occurrences of gas hydrate even in the shallow subsurface.

Since 2004, integrated exploration of geology, geochemistry, and geophysics has clarified (reviewer suggests indentified) massive accumulation of gas hydrate associated with active methane seeps on the two ridges named Umitaka Spur and Joetsu Knoll located in the Joetsu Basin, eastern margin of the Japan Sea. The structures are asymmetric anticlines formed along an incipient subduction that extends throughout the western side of the Japanese islands, suggesting that the accumulation of gas and gas hydrate in the Joetsu Basin is closely and perhaps genetically related with the tectonics of Japan Sea basin.

This study aims to understand the structural-stratigraphic control of the gas hydrates on the basis of 2D single-channel seismic (SCS) profiles, performed during research cruises in the study area by R/V Natsushima from JAMSTEC, under the supervision of the Department of Earth and Planetary Science of the University of Tokyo. The study recognized chimney-like structures which seem to be strongly controlled by a complex anticlinal axial fault system. Seismic profiles exhibit high amplitude events with pull-up structures, probably due to massive and dense accumulation of the gas hydrate above. A strong BSR is widely developed, in particular, within gas chimneys and in the eastern flank of Umitaka Spur. The anticlinal axial fault system, the convex shape of the spur, and carrier beds as conduits induce gas migration to the top of the Umitaka Spur, providing strong seepages and giant plumes in the sea water column. A well-developed conduit system carries a large amount of thermogenic methane and forms massive gas hydrate buildup within the shallow part of gas chimneys.

The surface sediments of the spur are largely clayey hemipelagic but, SCS profiles revealed chaotic zones that suggest debris-flow deposits. BSR is often strengthened within the debris-flow units as well as in gas chimneys. So, debris flow deposits are expected to contain high concentrations of gas hydrate if there are favorable permeability and porosity conditions to be considered as a potential target of shallow gas hydrate reservoirs. Enhanced reflectors below BSR suggest free-gas accumulation, where a strong flat-spot indicates a contact between two fluids, perhaps gas and water. In this case, this is an unconventional gas accumulation located at around 180-200 mbsf, sealed above by sediments cemented by gas hydrate cristalization along the base of the gas hydrate stability zone.

autor



Antonio Fernando Menezes Freire
Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)
P&D em Geociências

fernandofreire@petrobras.com.br

Antonio Fernando Menezes Freire formou-se como técnico de geologia pela Escola Técnica Federal da Bahia (ETFBA) em 1981, tendo trabalhado na Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) até 1987, quando ingressou na Petrobras. Formou-se em geologia pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia (UFBA/IGEO) em 2003, tendo sido reclassificado como geólogo da Petrobras em 2004 através de novo concurso público. Em 2006, concluiu o mestrado em Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar pela UFBA/IGEO. Concluiu o doutorado em Estudos do Meio Ambiente Natural pela Escola de Ciências de Fronteira da Universidade de Tóquio (Japão) em 2010, tornando-se especialista na geologia dos hidratos de gás. Além dos hidratos, suas principais áreas de interesse são a geoquímica de petróleo e gás, além da sedimentologia, estratigrafia e tectonossedimentação.

