

EXPERIMENTOS COM MODELAGEM FÍSICA DE PROCESSOS TECTÔNICOS NO CENTRO DE PESQUISAS DA PETROBRÁS

Peter Szatmari e José Ribeiro Aires⁽¹⁾

RESUMO — A percepção atual da importância da geologia estrutural e especialmente da correta análise de estruturas em seções sísmicas resultou na criação de laboratórios especializados em modelagem tectônica em várias companhias de petróleo. Os equipamentos da PETROBRÁS, construídos no CENPES com a orientação do consultor Peter Cobbold, modelam processos importantes para a pesquisa de petróleo no Brasil, como rifteamento, movimentos transpressionais e tensionais e fluxo de sal. As camadas rúptil e dúctil da litosfera são modeladas — com base em estudo comparativo de suas características físicas — respectivamente por areia e por um silicone especial; a astenosfera, por mel. O artigo descreve e ilustra modelagem de extensão e compressão crustais; do estruturamento decorrente do fluxo de sal com sedimentação simultânea; e da separação dos continentes sul-americano e africano, por rotação diferencial.

(Originais recebidos em 11-XII-86.)

1 — INTRODUÇÃO

Como tem afirmado CLOOS (1968), um dos pais da modelagem tectônica, "Desde que o primeiro geólogo demonstrou na saia de sua esposa como se formam dobras, existe modelagem física de processos tectônicos". No entanto, os primeiros trabalhos, restritos a um grupo muito pequeno de pesquisadores, visavam, em sua maior parte, a esclarecer processos de deformação plástica, especialmente os de dobramento. Foi apenas nos últimos cinco anos que houve uma reativação, em nível internacional, desse tipo de pesquisa: tanto as companhias de petróleo como as universidades começaram a perceber o significado do estudo dos processos modelados da geologia estrutural para a correta interpretação de processos tectônicos de média e grande escala.

Um dos mais importantes laboratórios nesse campo é o do Conseil National de Recherche Scientifique — CNRS, orientado pelo Professor Peter Cobbold, na Universidade de Rennes (França). Dr. Cobbold era estreito colaborador do Professor John Ramsay quando este introduziu a metodologia moderna da geologia estrutural na Inglaterra, onde o Dr. Cobbold estabeleceu seu primeiro laboratório de tectônica experimental. A PETROBRÁS estabeleceu contato

com o Dr. Cobbold no início de 1984 e construiu, com base nos planos desse pesquisador, mas inteiramente com recursos do CENPES, seu Laboratório de Geotectônica. Desde a sua instalação, em junho de 1985, o laboratório tem realizado uma grande variedade de testes com modelagem física, que visam à melhor compreensão de processos tectônicos significativos no intuito de se compreender melhor a formação e o estruturamento de bacias sedimentares do Brasil. Apresentar-se-ão aqui alguns desses experimentos a fim de ilustrar a utilidade da modelagem física.

O que significa, afinal, modelagem física de processos tectônicos? A deformação dos materiais que compõem a crosta terrestre pode ser modelada tanto fisicamente como matematicamente. A modelagem matemática trata esses materiais como corpos contínuos constituídos de um número finito de elementos: a deformação destes elementos sob a ação de forças externas pode ser modelada numericamente. Embora o processo seja de grande valor para a compreensão das regras gerais que determinam a deformação, o fato de o método tomar os corpos geológicos como contínuos não permite estudar adequadamente nem a formação e a propagação de fraturas, nem a deformação por meio de falhas.

1 - Setor de Geologia, Divisão de Exploração, Centro de Pesquisas.

Esses processos, portanto, podem ser melhor estudados por meio de modelagem física, especialmente se esta for acompanhada por estudos paralelos de modelagem matemática. Na modelagem física, os corpos geológicos, em vez de serem vistos como contínuos ideais, são representados por materiais reais, cujas características físicas ou são iguais às das dos corpos geológicos, ou, entre si, apresentam as mesmas relações que os parâmetros dos materiais correspondentes apresentam nos corpos geológicos. Nota-se que estas condições permitem certa variedade na escolha de materiais, dependendo do critério a ser aplicado embora exija um estudo rigoroso das características físicas tanto dos materiais usados como dos corpos geológicos a serem modelados.

Três tipos básicos de substâncias devem ser modeladas:

- a) Rochas rúpteis, como as que constituem a maior parte da seqüência sedimentar e do embasamento cristalino da crosta superior. Seu rompimento segue a lei de Navier-Coulomb, sem dependência do tempo.
- b) Rochas dúcteis, como vários evaporitos (halita, carnalita), a crosta inferior e, pelo menos, parte do manto litosférico. Essas rochas reagem ao esforço com fluência viscosa em estado sólido e com deformação contínua dependente do tempo.
- c) Rochas quase fundidas, como as da astenosfera, cuja temperatura se aproxima do ponto de fusão. Essas rochas também reagem aos esforços com fluência, mas sua viscosidade é bem mais baixa do que a do grupo anterior.

Como os esforços mais importantes que governam o comportamento rúptil das rochas são os gravitacionais, faz-se necessário, na modelagem do primeiro grupo, diminuir a coesão dos materiais em proporção igual à diminuição de sua dimensão vertical (HUBBERT, 1937; RAMBERG, 1967; VENDEVILLE *et alii*, 1987). Assim, se representarmos dezenas de quilômetros de espessura por alguns centímetros, a coesão deve ser um milhão de vezes menor, aproximando-se, portanto, de zero. A areia seca é um desses materiais, cuja coesão é desprezível. Não obstante, ela rompe, segundo a lei de Navier-Coulomb, com o ângulo de fricção interna $F1 \approx 30^\circ$ (VENDEVILLE *et alii*, 1987), igual ao da maioria das rochas, condicionando a formação de falhas de gravidade com mergulho de 60° .

Ao se usar um material de baixa coesão para modelar a parte rúptil da crosta, mantém-se a relação entre a coesão e o peso. Modelagem deste tipo foi empregada por alguns dos pioneiros da modelagem física, como CLOOS (1968) e, mais recentemente, por MORSFIELD (1977) e VENDEVILLE *et alii* (1987). Um caminho alternativo para manter essa relação é usar as próprias rochas, aumentando a força gravitacional por centrífuga, de acordo com a diminuição do peso, como foi recomendado por RAMBERG (1967) e realizado recentemente por DIXON & SUMMERS (1985), entre outros.

Na modelagem, além de se diminuir as dimensões lineares, diminui-se também o tempo em que as deformações dúcteis se sucedem. Ao escolher alguns dias para representar alguns milhões de anos, diminuimos o tempo 10^8 vezes. Para obtermos deformações comparáveis, precisamos então diminuir 10^{16} vezes as viscosidades dos materiais usados. Isso significa usar materiais com viscosidades da ordem de 10^4 Pa.s para modelar a crosta inferior e de 10^2 Pa.s para modelar a astenosfera.

Para modelar a crosta inferior, utilizamos, seguindo indicações do laboratório do CNRS (VENDEVILLE *et alii*, 1987), uma massa de silicone especial (*pink gomme* GS1R, fabricado por Rhone-Poulenc, na França) — material newtoniano com viscosidade de 10^4 Pa.s. Para modelar a astenosfera, usamos, ainda conforme indicações do CNRS, mel ou xarope de glicose — líquidos newtonianos com viscosidade de 10^2 Pa.s.

A fim de permitir a flutuação desses três materiais — areia, silicone e mel — um sobre o outro, é preciso diminuir a densidade ($1,3 \text{ g/cm}^3$) da areia seca pela adição de pó de etilcelulose, cuja densidade é de $0,3 \text{ g/cm}^3$. As densidades do silicone ($1,16 \text{ g/cm}^3$) e do xarope ($1,4 \text{ g/cm}^3$) podem ficar inalteradas.

Quando o intuito é modelar a flutuação negativa dos sedimentos mais densos sobre o sal menos denso, durante processos halocinéticos, deixam-se inalteradas as densidades da areia seca e do silicone.

2 — EXPERIMENTOS EXTENSIO-NAIS

Os experimentos de extensão e compressão foram feitos em caixas de acrílico (foto 1) que permitiram o uso simultâneo dos três materiais acima menciona-

dos. Motores de passo, comandados por um sistema eletrônico, tornaram possíveis taxas muito baixas de extensão ou compressão. A espessura da areia que representa a crosta rúptil foi de cerca de 4 mm, a do silicone, de cerca de 10 mm.

A extensão inicial (foto 2) resultou no aparecimento de pequenas estruturas tipo *rift* na superfície. Esses experimentos demonstraram dois fatos de grande importância: primeiro, que os *riffts*, embora de um modo geral se tenham formado perpendicularmente à direção de extensão, foram sempre compostos de segmentos diagonais ao eixo de extensão, o que indica a presença simultânea de falhamento normal e transcorrente (ZANOTTO & SZATMARI, 1985). Outro fenômeno que chamou a atenção foi que uma significativa irregularidade de relevo — visível na margem esquerda da foto 2 — que havia sido marcada antes do início do experimento, em vez de facilitar a formação dos *riffts*, tendia a estabilizar uma grande área do modelo ao seu redor.

À medida que a extensão continuava, os *riffts* iam-se propagando, sempre preservando, no entanto, sua configuração composta de segmentos diagonais em zig-zague. As áreas caracterizadas por intensa formação de *riffts* se separavam das áreas estáveis por falhas transcorrentes (foto 3). À medida que a extensão aumentava, o silicone aparecia nos *riffts*, num processo que pode representar também a formação de crosta oceânica. Complexos remanescentes da crosta rúptil, orientados diagonalmente à extensão, continuavam presentes dentro dos *riffts*. Esses processos de extensão oblíqua, bem como a preservação de blocos rígidos isolados dentro das zonas estendidas, ajudam a compreender não só o rifteamento nas bacias do Recôncavo, de Tucano e de Potiguar (MILANI *et alii*, 1987; FRANÇOLIN & SZATMARI, 1985), como também a movimentação ao redor de fragmentos crustais da margem equatorial brasileira (FRANÇOLIN & SZATMARI, 1985; ZANOTTO & SZATMARI, 1985). A foto 4 mostra, em detalhe, o interior dos *riffts* e a junção curvilínea entre a zona de rifteamento e a falha transcorrente adjacente.

As caixas construídas em acrílico transparente permitem observar o modelo de vários lados. Na face paralela à extensão (foto 5), nota-se o adelgaçamento da camada de silicone, correspondente à litosfera, e a subida do mel, correspondente à astenosfera, nas zonas de maior exten-

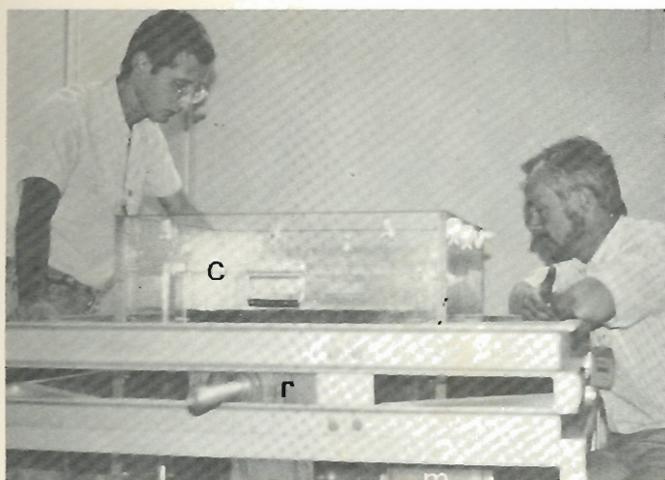


Foto 1 - Modelador geodinâmico do CENPES. m – motor de passo, r – redutor, c – caixa de modelagem.



Foto 2 - Visão de cima de um experimento extensional, mostrando o aparecimento dos primeiros rifts (r); área estabilizada ao redor de uma depressão préexistente (d); seta indica a direção de extensão.

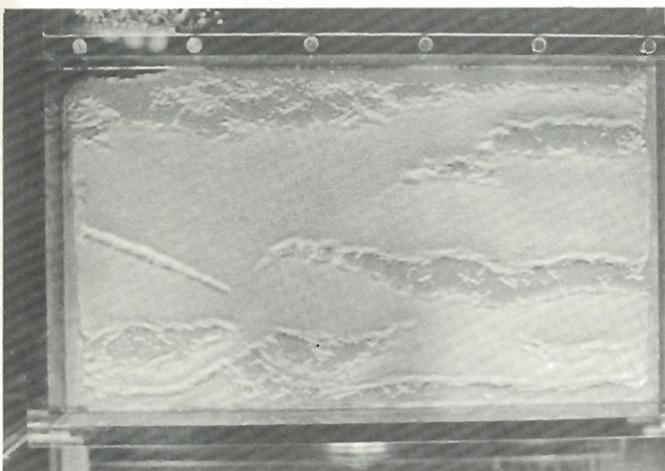


Foto 3 - Mesmo experimento da foto 2, em fase mais avançada de extensão. Ressalta-se a alternância de elementos oblíquos.

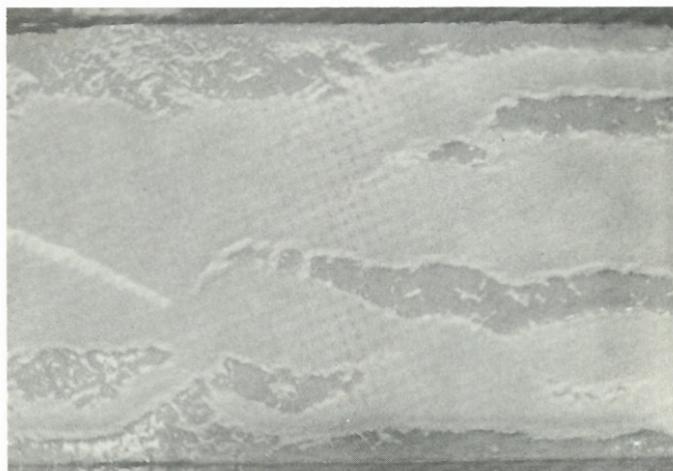


Foto 4 - Detalhe da foto 3.

são.

3 – EXPERIMENTOS DE COMPRESSÃO

Uma simples inversão no comando do controle é suficiente para transformar os experimentos de extensão em experimentos de compressão. Uma das paredes de acrílico (foto 6), mergulhada no mel, vem-se aproximando da parede oposta, comprimindo as camadas de silicone e de areia. Rugas alongadas aparecem na superfície da areia (foto 6), fornecendo uma imagem muito real dos fenômenos em áreas compressionais. Gradativamente estas rugas se inclinam (foto 7) e se transformam em empurrões. Diversas áreas da superfície do modelo exibem graus diversos de dobramento (foto 8).

Uma variante desse experimento (foto 9) visava a examinar o processo de compressão atuante sobre uma crosta de espessura variável. Na área central do modelo, a espessura da areia, correspondente à crosta rúptil, foi aumentada. Com isso, aumentou-se a resistência dessa área, que se tornou cratônica. Durante a compressão, formaram-se, nos dois lados dessa área cratônica, zonas de compressão oblíqua, onde a compressão foi associada ao cisalhamento. Essas zonas móveis foram úteis na interpretação das zonas móveis com compressão oblíqua identificadas na Bacia de São Francisco (CHANG *et alii*, 1987).

4 – EXPERIMENTOS COM FLUXO DE SAL EM AMBIENTE EXTENSIONAL

Entre os experimentos feitos no laboratório geotectônico, os realizados com fluxo de sal em ambiente extensional são da maior relevância, uma vez que podem ser aplicados imediatamente aos trabalhos exploratórios da PETROBRÁS.

Como camadas de evaporitos aptianos estão presentes em muitas das bacias da margem oriental brasileira, o fluxo de sal foi de importância primordial para a localização das acumulações de petróleo na Bacia de Campos.

Vários autores (BACCOCOLI *et alii*,

1980; BARROS *et alii*, 1982; FIGUEIREDO *et alii*, 1983; FIGUEIREDO & MOHRIAK, 1984; GUARDADO *et alii*, 1986) ressaltam o controle que o fluxo de sal exerce nessa bacia sobre a deposição dos sedimentos, desde os calcários albianos até os turbiditos terciários. FIGUEIREDO & MOHRIAK (1984) apontam o relacionamento entre a estruturação dos calcários albianos — nos quais o fluxo do sal sotoposto produziu falhas de crescimento com *rollovers* — e a deposição dos turbiditos cretáceos, cujas areias foram canalizadas pelos baixos criados por essas falhas.

Nas áreas de produção de petróleo na Bacia de Campos, esse fluxo percorre em condições de extensão. O ambiente extensional resulta não da extensão do embasamento — que durante e após a deposição do sal já se encontra parcialmente estabilizado — mas sim da do próprio sal, que sofre extensão nas áreas que servem como fonte do fluxo.

Para modelar esse processo, é necessário utilizar a gravidade como motor do fluxo, de modo que, em vez das caixas de modelagem, nas quais a extensão resulta da ação de motores, usa-se uma superfície de acrílico inclinada com um mergulho de 1 a 10 graus. Sobre essa superfície é colocada, ainda antes de sua inclinação, uma camada uniforme de silicone, que, nesse caso, representa uma camada dúctil de sal. Variações na modelagem — como por exemplo o uso de uma superfície basal irregular abaixo do sal modelado, como foi sugerido pelo geólogo Lincoln Guardado, do Setor de Interpretação da Bacia de Campos, ou ainda a colocação do silicone sobre uma superfície já inclinada, de tal modo que sua espessura aumente em direção à bacia — introduzem modificações importantes no processo.

A essência do experimento consiste na sedimentação simultânea à extensão provocada pelo fluxo de sal. Enquanto o silicone, que representa o sal, flui para baixo na superfície inclinada, vai-se sedimentando, periodicamente, areia em cima dele. A extensão do silicone durante seu fluxo faz com que o corpo rúptil de areia se estenda, formando *riffts*. O peso de novos sedimentos fora desses *riffts* e a menor espessura desses sedimentos dentro deles fazem com que o silicone suba e, às vezes, alcance a superfície.

Embora esse processo de certa forma reproduza aquele do rifteamento dentro de caixa mecanicamente estendida, a si-

multaneidade da sedimentação e do deslize gravitacional introduz mudanças essenciais no processo. Apenas um aspecto importante do fenômeno natural deixa de ser modelado: a dissolução do sal no fundo do mar. As formas mais evidentes em seções sísmicas, no entanto, estão sendo fielmente reproduzidas pela modelagem.

Na primeira fase do processo (foto 10), aparecem estreitas fraturas na parte inferior do sal em deslize. Essas fraturas, que se ampliam à medida que o processo avança (foto 11), podem ou estar paralelas à borda distal do modelo ou distribuir-se com um "padrão ziguezague" semelhante àquele observado nos experimentos de extensão, que reflete a ação simultânea do movimento de extensão pura e da transcorrência. Gradativamente, essas fraturas podem invadir a areia sobre o modelo inteiro (foto 12), formando blocos da camada rúptil separados por cadeias do sal modelado (foto 13). O aparecimento dessas cadeias de sal na superfície depende apenas da relação entre a taxa de extensão — função do ângulo de deslize — e a taxa de sedimentação.

Depois de vários dias em deslize, extensão e sedimentação concomitantes, interrompe-se o processo, horizontaliza-se a superfície, e o modelo é seccionado. As seções assim obtidas (fotos 14 e 15) apresentam boas analogias com as seções sísmicas obtidas em áreas extensionais de fluxo salino (fig. 1 a e b). Observa-se a presença de cadeias altas de sal que diferenciam-se de domos por estes serem limitados por falhas de crescimento e pela falta total de estruturas de dobramento ou arraste ao redor delas. As camadas sedimentares em geral inclinam-se na direção dessas cadeias. Essas estruturas positivas de sal correspondem àquelas encontradas com frequência abaixo de falhas de crescimento na Bacia de Campos (FIGUEIREDO *et alii*, 1983; GUARDADO *et alii*, 1986). Algumas vezes elas são simétricas (foto 14), indicando extensão igual nos dois lados; outras vezes, elas são fortemente assimétricas (foto 15), refletindo a irregularidade do espaço aberto pela extensão que elas estão preenchendo.

Depois que a morfologia dessas cadeias de sal já é suficientemente conhecida em seções, retira-se toda a seqüência sedimentar que se encontra em cima do silicone, para poder observar a distribuição das cadeias de sal em planta (fotos 16 e 17). Nota-se que elas são em geral

estreitas, alongadas, quase paralelas e separadas por amplas faixas planas, onde os sedimentos sobrepostos não sofreram perturbação alguma. Localizadamente, no entanto, observa-se um *offset* nas cadeias, indicando movimentos transcorrentes ao longo de zonas dúcteis de cisalhamento dentro do sal (foto 17).

5 — EXPERIMENTOS COM FLUXO DE SAL COM EXTENSÃO E COMPRESSÃO SIMULTÂNEAS

Experimentos desse tipo são especialmente valiosos para a simulação dos processos de fluxo de sal na margem continental oriental do Brasil. O fluxo de sal na natureza depende da inclinação da superfície basal do sal, de modo que mudanças bruscas da inclinação resultam em aceleração ou desaceleração do movimento. Em áreas de aceleração, aumentam as feições extensionais, enquanto em áreas onde o fluxo de sal está bloqueado, formam-se estruturas compressivas. Essas últimas, com a subsequente reorganização do material, podem transformar-se em domos salinos.

No experimento em que o contraste entre as feições extensionais e compressivas é mais nítido, o fluxo do silicone foi barrado na margem inferior do modelo. Empregou-se primeiro uma inclinação de cinco graus; posteriormente, a superfície foi nivelada e a inclinação foi aumentada para dez graus. Inclinações muito menores, mesmo de apenas um grau, resultam em estruturas semelhantes quando os experimentos têm uma duração mais prolongada.

Na primeira fase do experimento, (foto 18), formam-se estruturas rasas, tipo *rift*, perto da margem superior do modelo. Essas estruturas resultam da fuga do sal declive abaixo. Ao mesmo tempo, na área compressiva, mostrada na parte direita da figura, vão-se formando dobras, à medida que os sedimentos fluem em direção à barreira inferior. A foto 19 mostra, em detalhe, as estruturas tensionais, e a foto 20, as compressivas; nesta última, ressalta-se o lado mais íngreme das dobras de onde a gravidade remove a camada superficial de areia colorida, e aparece a areia inferior branca. Enquanto as estruturas tensionais são côncavas para baixo, as compressivas são convexas na direção do fluxo, numa distribuição que reflete bem as observações geológicas, especialmente na Bacia de Campos.

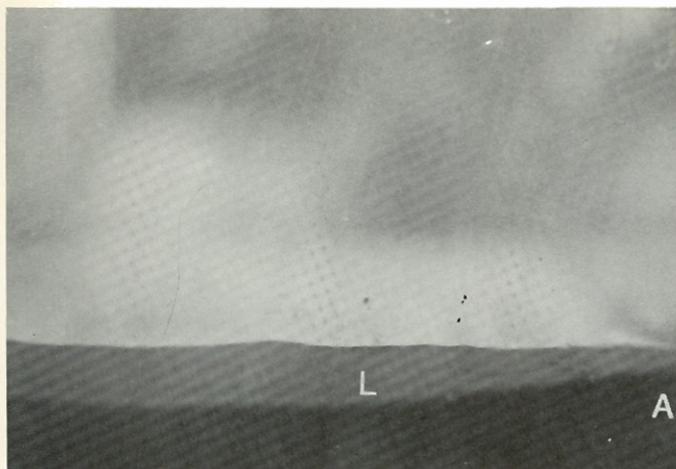


Foto 5 - Aspecto lateral de um experimento extensional. Observe-se a ascensão da astenosfera (A) abaixo da litosfera (L) afinada pela extensão.

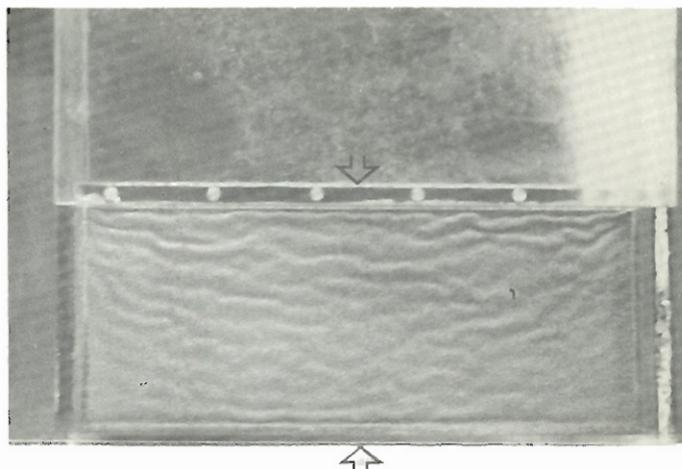


Foto 6 - Dobras alongadas formadas pela compressão do modelo (as setas mostram a direção da compressão).

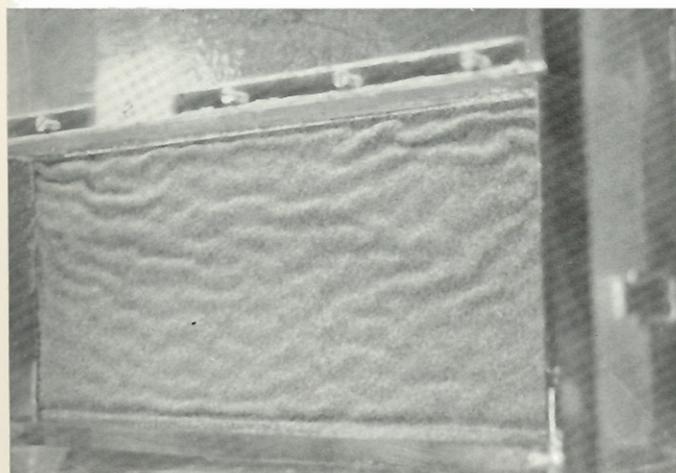


Foto 7 - Fase mais adiantada do experimento compressional.

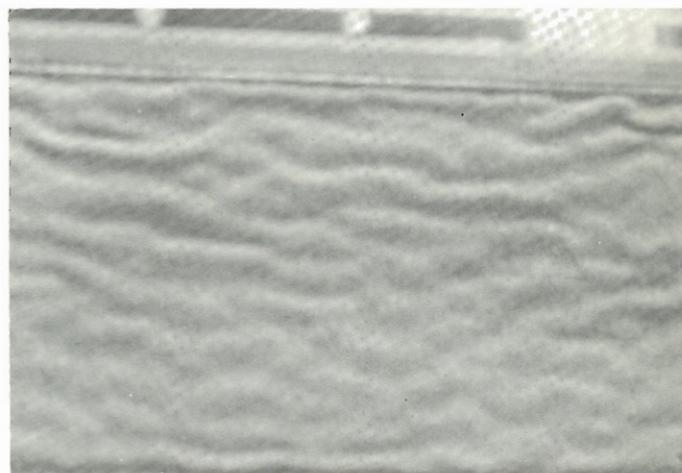


Foto 8 - Detalhe da foto 7.

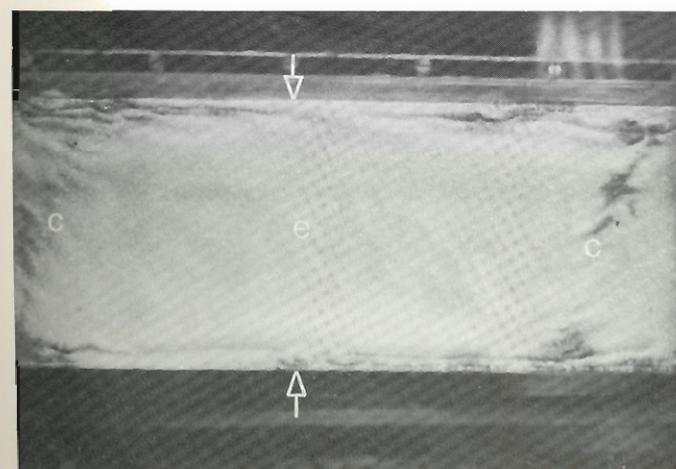


Foto 9 - Formação de zonas de cisalhamento convergente (c) nos dois lados de uma área com crosta mais espessa (e), durante compressão.

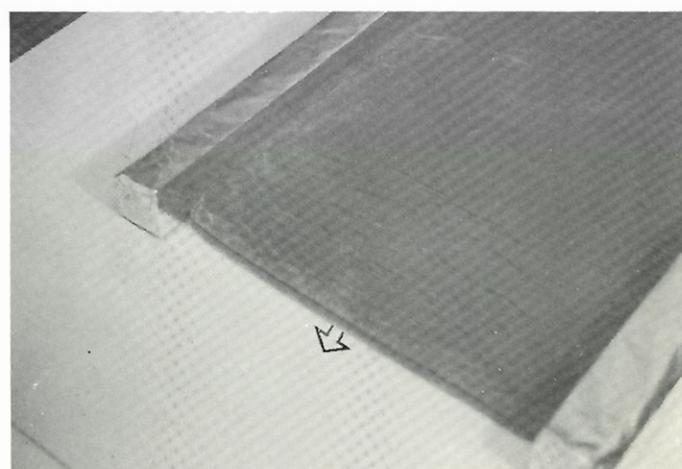


Foto 10 - Fase inicial do processo de fluxo de sal em ambiente extensivo. Note-se o aparecimento de fraturas na superfície do modelo (a seta indica direção de fluxo).

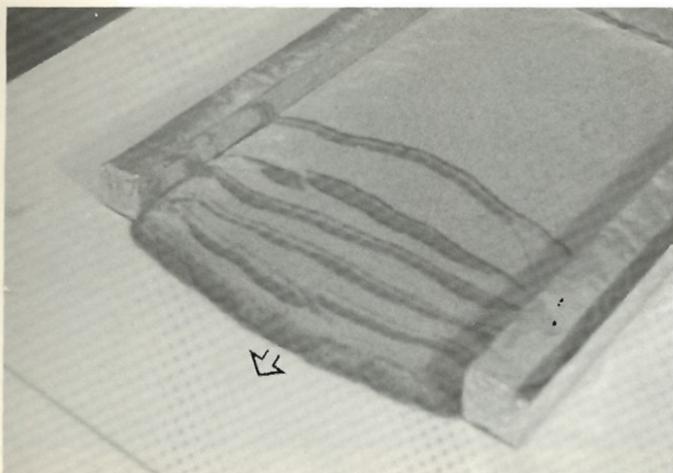


Foto 11 - Fase mais avançada do fluxo extensional de sal. Note-se o aparecimento do silicone nas zonas retas de rifts, que refletem a acumulação prévia do silicone na área rifteada.



Foto 12 - Outro experimento de fluxo de sal associado à extensão. O "padrão ziguezague" dos rifts, na superfície do modelo, reflete movimentos transtensionais.



Foto 13 - Detalhe do padrão mostrado na foto 12.

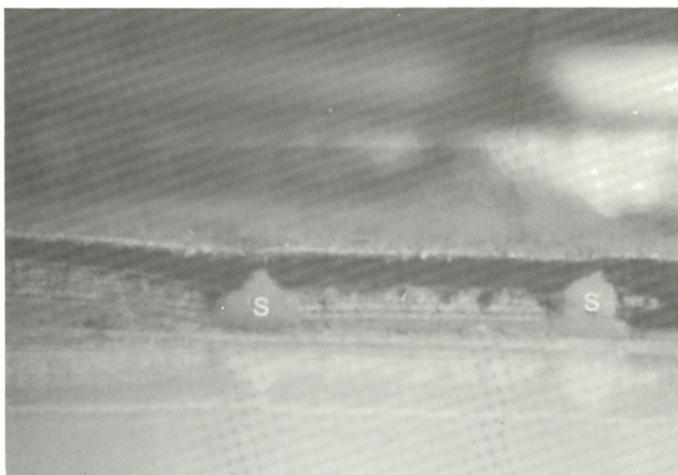


Foto 14 - Seção vertical do modelo de fluxo extensional. Note-se a formação de cadeias de "sal" (s) sob as falhas de crescimento.

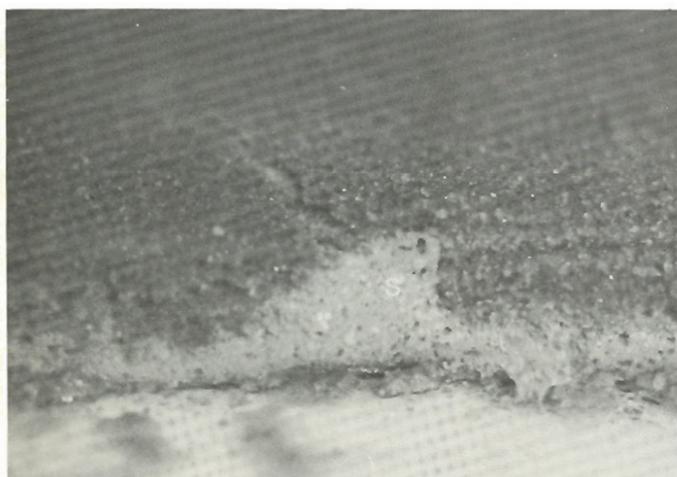


Foto 15 - Detalhe da seção de uma cadeia de "sal" (s). Note-se a ausência de perturbação nas camadas sedimentares adjacentes.

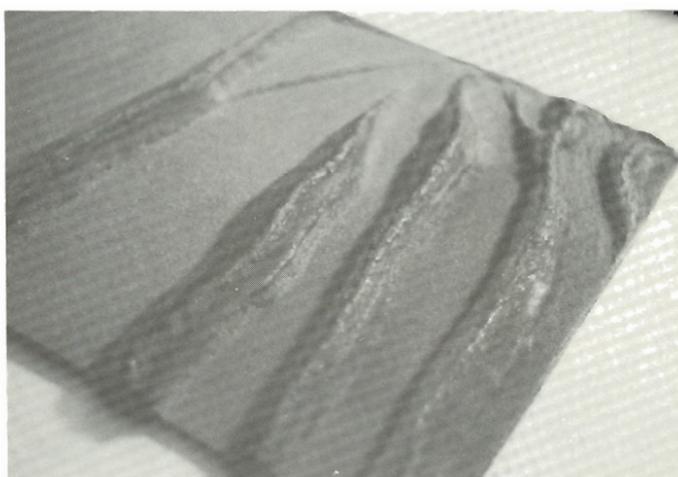


Foto 16 - Aspecto do topo estruturado do "sal" após a retirada dos sedimentos. Note-se o sub-paralelismo das cadeias.

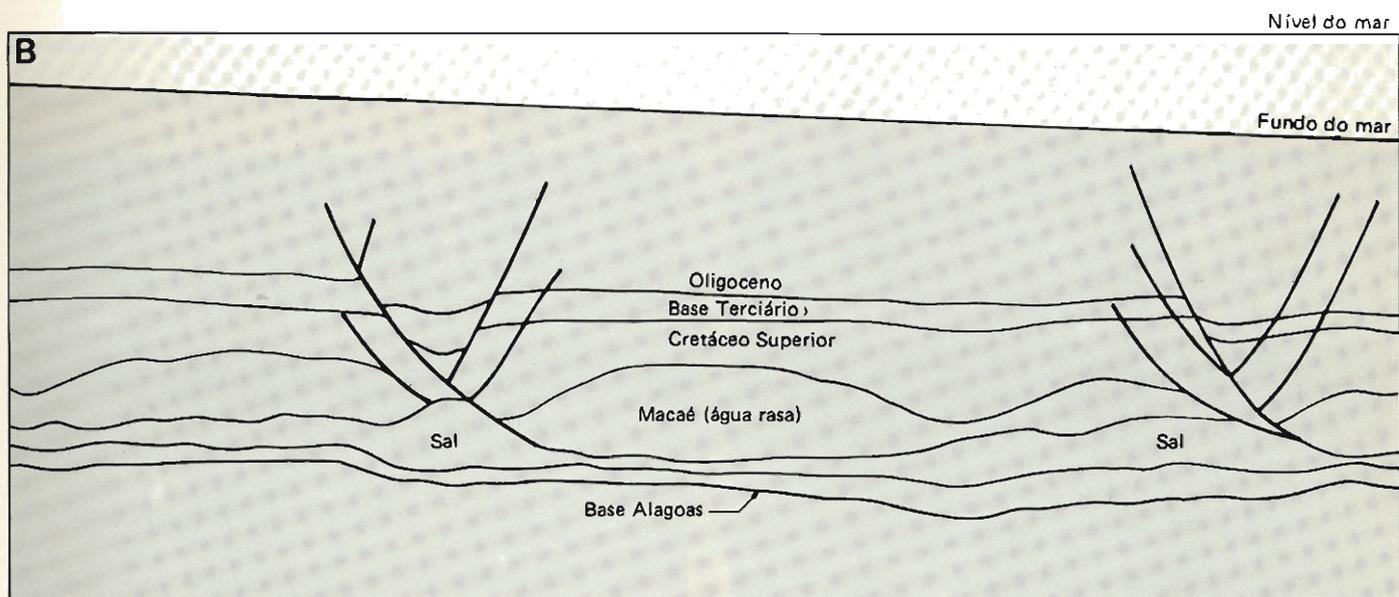
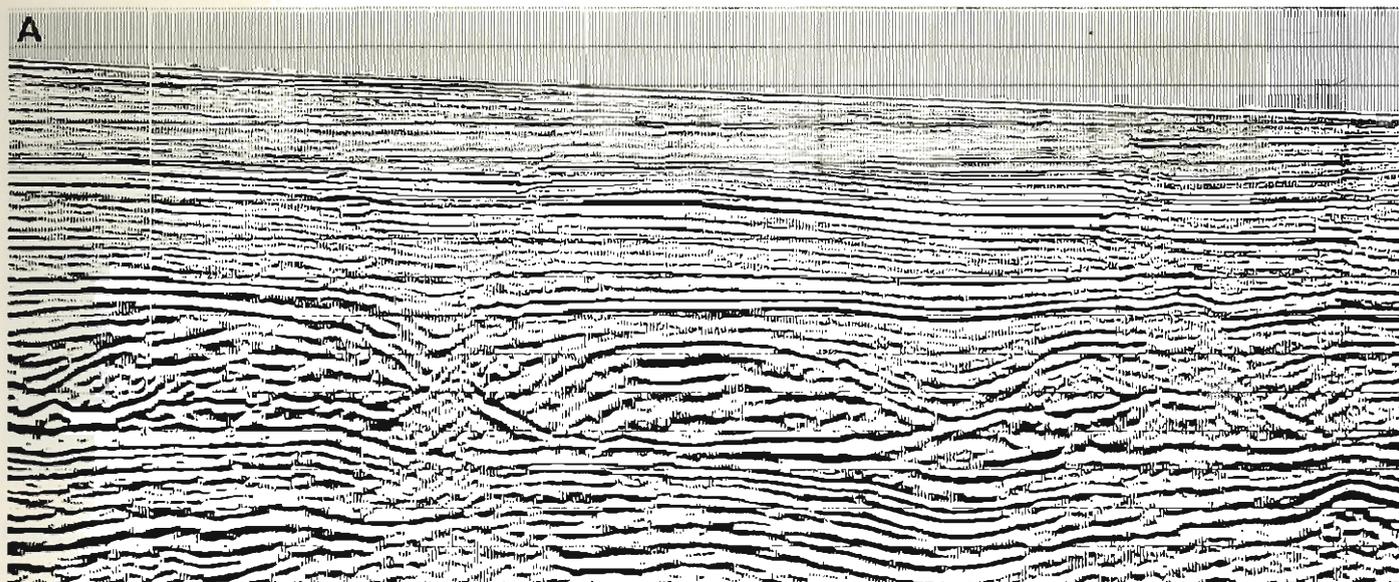


Fig. 1 - A - Linha sísmica na Bacia de Campos, passando através de estruturas extensionais resultantes de fluxo de sal. B - Interpretação da linha pelo geólogo Lincoln Guardado.

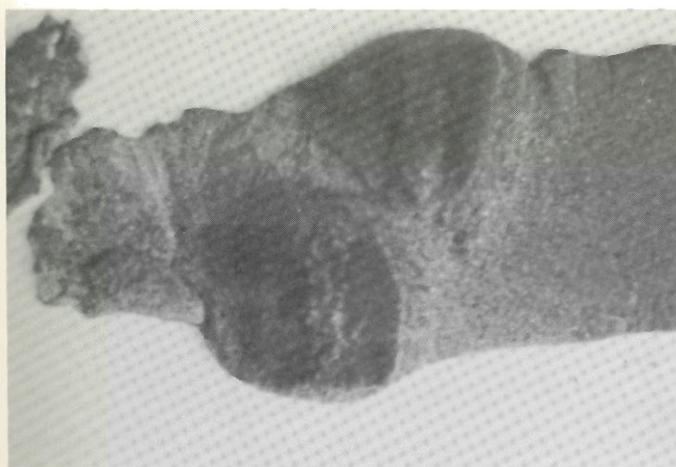


Foto 17 - Detalhe de um *offset* ao longo de uma cadeia de "sal".

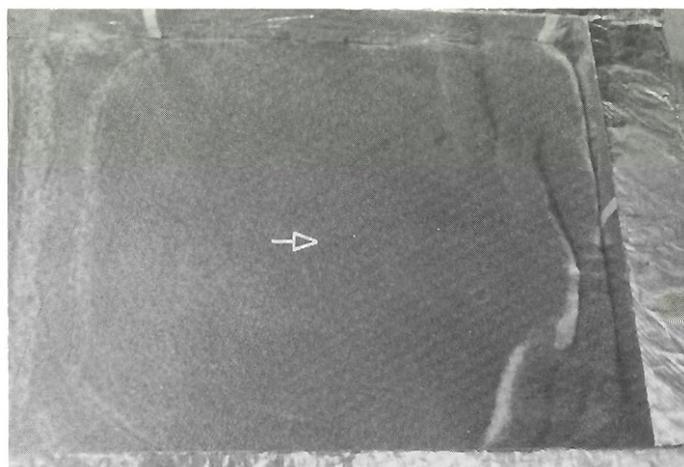


Foto 18 - Visão geral do experimento de fluxo de "sal" com extensão (esquerda) e compressão (direita) simultâneas (a seta indica direção do fluxo).

As fotos de 21 a 23 mostram uma fase posterior do experimento. O progressivo fluxo do sal resulta na formação de novas áreas extensionais, nas quais o silicóne levanta-se atingindo a superfície. Isso resulta da interrupção da sedimentação, método usado nesse experimento, para ressaltar o estruturamento do material dúctil na superfície do modelo. Com o aparecimento progressivo de novas estruturas extensionais na parte superior do modelo e de novas dobras em sua parte inferior, a área sem estruturação diminui progressivamente durante o experimento. Na foto 22, que mostra em detalhe a área estendida, nota-se que as estruturas mais antigas ficam abandonadas e fossilizadas (sem deformação posterior), em decorrência do escape total do sal de debaixo delas. Essas estruturas aparecem com cor branca na superfície do modelo. Na parte inferior do modelo, mostrado em detalhe na foto 23,

nota-se a formação de calhas entre as antigas e as novas dobras que surgem devido ao fluxo barrado do sal. Tanto essas calhas quanto a grande planície que separa as áreas extensivas e compressivas correspondem a depressões propícias à deposição de turbiditos. Esse modelo é especialmente importante na interpretação da sedimentação e estruturação terciárias na parte da Bacia de Campos recoberta por águas profundas (GUARDADO *et alii*, 1986).

Ao terminar o experimento, o modelo foi seccionado (fotos 24 e 25). Os cortes mostram muito bem o estruturamento complexo. Na parte esquerda da foto 24, aparecem estruturas halocinéticas resultantes de extensão. Na parte direita dessa mesma foto — em detalhe na foto 25 — observa-se o complexo relacionamento entre a estruturação do silicóne correspondente ao sal e a dos sedi-

mentos sobrepostos. Notam-se as bruscas mudanças na espessura do silicóne e a presença de falhas de empurrão. A sobreposição dos blocos foi facilitada pela intrusão, nas falhas, de delgadas fatias de silicóne. Esperar-se-ia encontrar estruturas desse tipo nas províncias dos domos de sal nas bacias de Campos e de Santos. Algumas dessas fatias de sal podem ainda estar presentes nestas bacias associadas a dobras complexas, enquanto outras podem ter sido remobilizadas posteriormente. Parece útil aproveitar as fotografias obtidas e transformá-las em seções sísmicas, para, então, comparar essas seções sísmicas com as obtidas nas bacias de Campos e de Santos.

6 — EXPERIMENTOS COM SEPARAÇÃO CONTINENTAL

Uma característica especial de separação entre a África e a América do Sul — co-

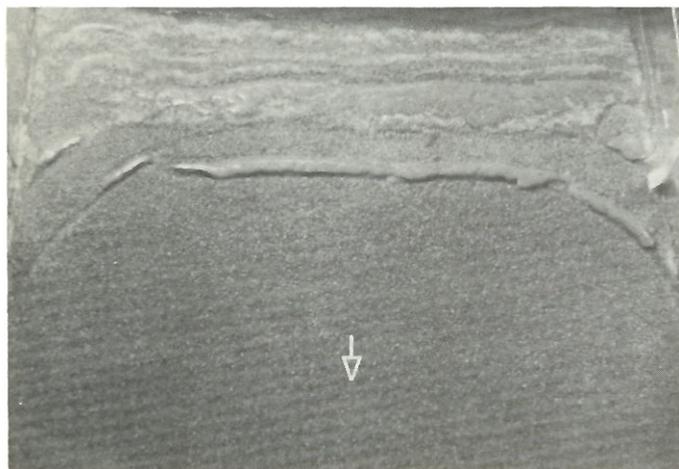


Foto 19 - Detalhe da foto 18: área extensional.

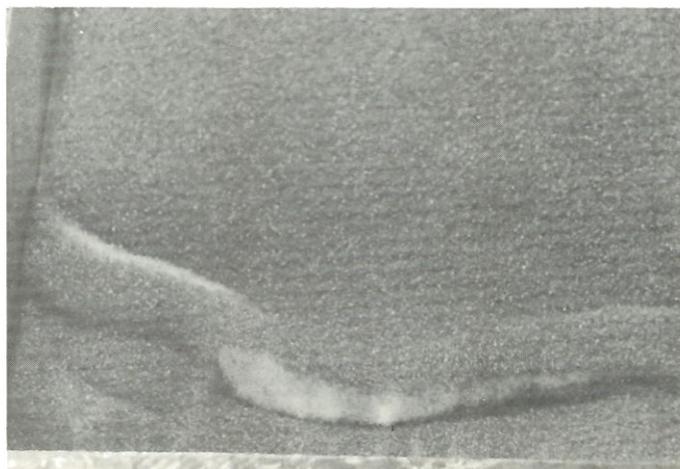


Foto 20 - Detalhe da foto 18: área compressional.

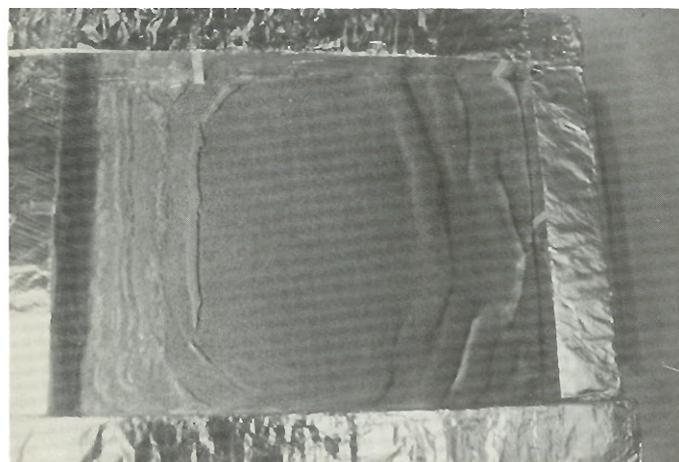


Foto 21 - Visão geral do experimento em uma fase mais avançada. A área não afetada pelo fluxo diminuiu em relação à apresentada na foto 18.

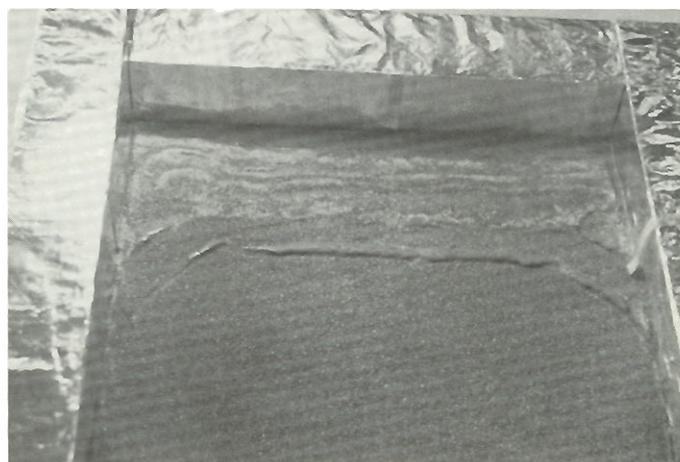


Foto 22 - Detalhe da foto 21: área extensional. Note-se o surgimento de novos rifts na direção do fluxo.

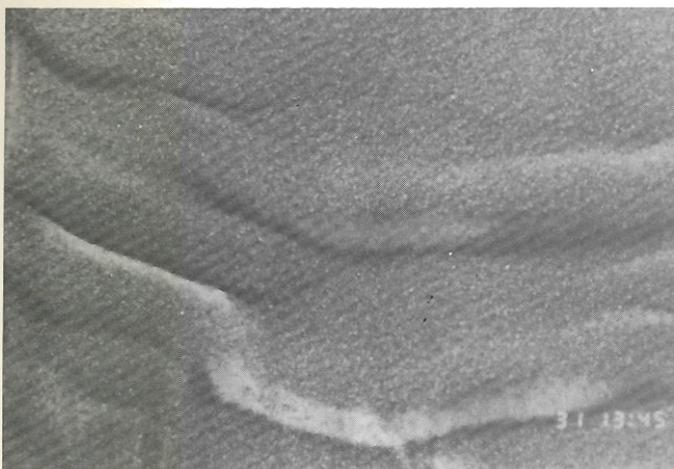


Foto 23 - Detalhe da foto 21: área compressional. Note-se a formação de bacias propícias à deposição de turbiditos.

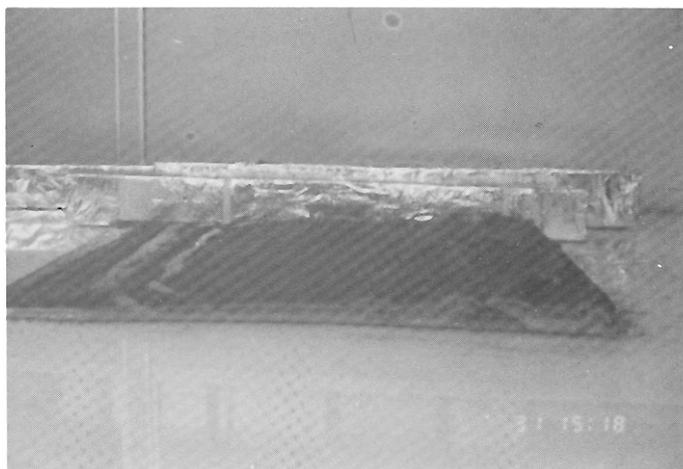


Foto 24 - Aspecto do modelo seccionado após horizontalização. Note-se a ascensão do "sal" tanto no ambiente extensional (esquerda) como no compressional (direita).

nhecida há muito tempo, mas apenas quantificada no trabalho de RABINOWITZ & LA BREQUE (1978) — é o fato de que, desde o início dessa separação até o fim do Aptiano, o pólo da rotação relativa entre esses dois continentes se encontrava na parte nordeste do Brasil. Estudos posteriores (SZATMARI *et alii*, 1984 e 1985; MILANI, 1985; LANA, 1985; MILANI *et alii*, 1987) indicavam que o pólo de rotação se encontrava entre o fim oriental da Bacia de Jatobá e o da Bacia do Araripe. Todas as bacias eocretáceas do nordeste brasileiro teriam surgido como resultado de movimentos transtensionais durante essa rotação. É, portanto, de grande importância modelar esse processo rotacional para melhor compreender a formação das bacias bem como sua estruturação precoce.

Esse trabalho foi efetuado por meio de vários experimentos. Usaram-se apenas duas camadas, uma de silicone e uma de areia sobreposta, esta última representando a crosta rúptil. Não houve sedimentação durante os experimentos. As duas camadas foram colocadas em um prato circular, no qual já se encontrava uma chapa de acrílico com os contornos da margem continental brasileira desde o Ceará até Salvador. Durante o experimento, essa chapa foi rotacionada ao redor do pólo indicado acima, por meio de um motor de passo, comandado pelo controlador.

Já no início do experimento, aparecem nitidamente duas feições importantes. A primeira que se mostra na parte superior da foto 26, corresponde ao Alto

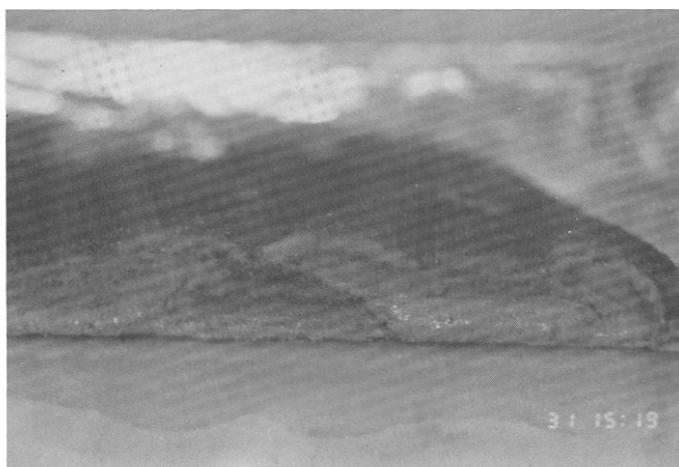


Foto 25 - Detalhe da foto 24 na área compressional, mostrando a intrusão do "sal" nas falhas de empurrão.

Ferrer-Urbano Santos e representa uma zona compressional entre os continentes africano e sul-americano, cujo movimento foi convergente nesse trecho. Para o sudeste, essa zona convergente passa em outra divergente, formando uma bacia, que corresponde aos primórdios da Bacia Potiguar. A segunda feição, que aparece na parte inferior da mesma foto, consiste em várias fraturas extensionais semiparalelas, que correspondem aos inícios das bacias de Recôncavo-Tucano e de Sergipe-Alagoas.

Numa fase mais adiantada de rotação (foto 27), o sistema do sul evolui numa complexa rede de fraturas, ressaltando a presença de *rifts* de direção norte-sul e nordeste-sudoeste, correspondentes aos *rifts* precoces neocomianos de Sergipe-Alagoas e do Recôncavo. De considerá-

vel interesse é o aparecimento de uma feição transtensional de direção leste-oeste, que corresponde ao lineamento de Pernambuco: como não houve nenhuma descontinuidade ali, no substrato, essa feição resultou apenas do processo cinemático. As áreas transtensional no sul e transpressional no norte são ligadas por fraturas transcorrentes ao longo da margem, apenas perceptíveis na foto 27. Essa zona de transcorrência corresponde ao segmento da margem entre as bacias Potiguar e Sergipe-Alagoas, onde não houve formação significativa de bacias sedimentares durante o Neocomiano.

As fotos 28 e 29 mostram uma fase mais adiantada de extensão na área transtensional entre a Falha de Pernambuco e Salvador. Na foto 28, ressalta-se o semi-

paralelismo dos *grabens* de direção norte-sul em Sergipe-Alagoas e sua junção com o sistema complexo de fraturas transcorrentes em parte transtensionais de direção nordeste-sudoeste. É bem evidente o movimento levôgiro do sistema inteiro, e muito boa a correlação com os principais sistemas de fraturas conhecidos na área. A foto 29 mostra o mesmo sistema na fase máxima de extensão, antes do fim do experimento.

Ao terminar esses experimentos, foi removida a camada de areia, e observou-se o complexo sistema de falhas transcorrentes tensionais e compressionais, evidenciado na superfície do silicone (foto 30). Ao norte, resalta-se como linha branca o Arco Ferrer-Urbano Santos, que termina para leste na depressão escura da Bacia Potiguar. Entre esta e o sistema transtensional do Recôncavo-Tucano e de Sergipe-Alagoas, observa-se um grande número de falhas transcorrentes. O sistema transtensional dessas bacias evidencia-se dentro do silicone, em parte através de cadeias abaixo dos *rifts*, em parte através de depressões alongadas e escuras abaixo da zona transtensional da margem continental.

7 - CONCLUSÕES

Experimentos com modelagem física fornecem uma ferramenta poderosa para

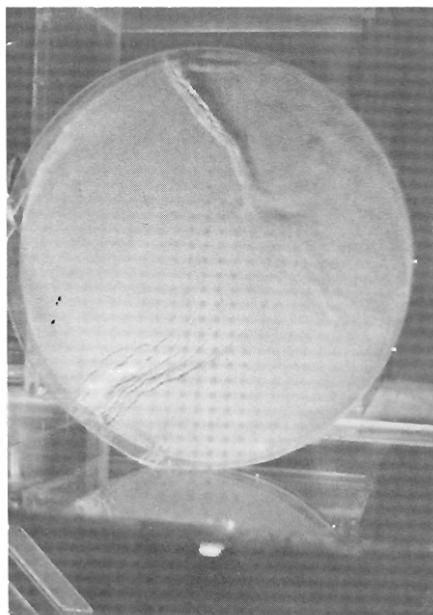


Foto 26 - Experimento simulando a separação da América do Sul/África.

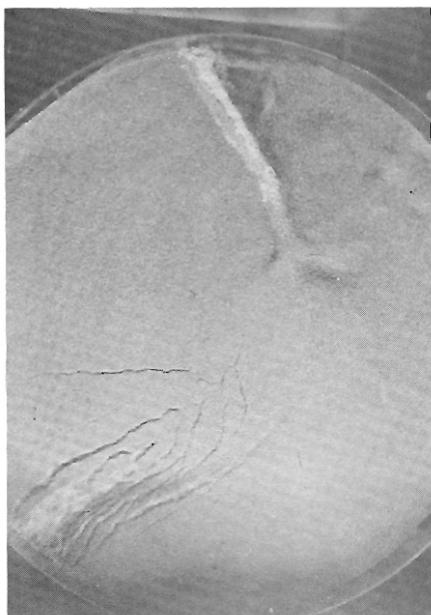
o conhecimento de processos tectônicos. Controlam-se suas variáveis mais importantes: a magnitude e a taxa de esforços, de deformações e de sedimentação, as dimensões, a estratificação de densidade e as propriedades físicas dos materiais envolvidos. Pode-se modelar tanto partes substanciais da litosfera em

escala continental, como processos de falhamento ou fluxo em escala de poucos quilômetros.

Os experimentos apresentados aqui permitem tirar as seguintes conclusões:

- 1) Em ambiente de extensão crustal, os *rifts* formam-se obliquamente — em vez de perpendicularmente — à direção de extensão, com a presença constante de movimentos transtensionais.
- 2) Na presença de camadas dúcteis subjacentes, é mais provável a formação de *rifts* isolados do que a de uma extensão uniforme da crosta.
- 3) Em ambiente de compressão crustal, dobramento generalizado antecede a empurrões.
- 4) Espessura homogênea do sal antes do começo do fluxo resulta em extensão generalizada nos sedimentos sobrepostos, com a presença de *rifts* oblíquos.
- 5) Um aumento forte da espessura do sal em direção ao futuro fluxo causa, ao contrário, extensão restrita à área do sal espesso, com a predominância de falhas de crescimento perpendiculares à extensão.
- 6) Durante o fluxo extensional, os baixos criados pelas falhas de crescimento são sotopostos por almofadas de sal, freqüentemente limitadas por falhas.

A



B

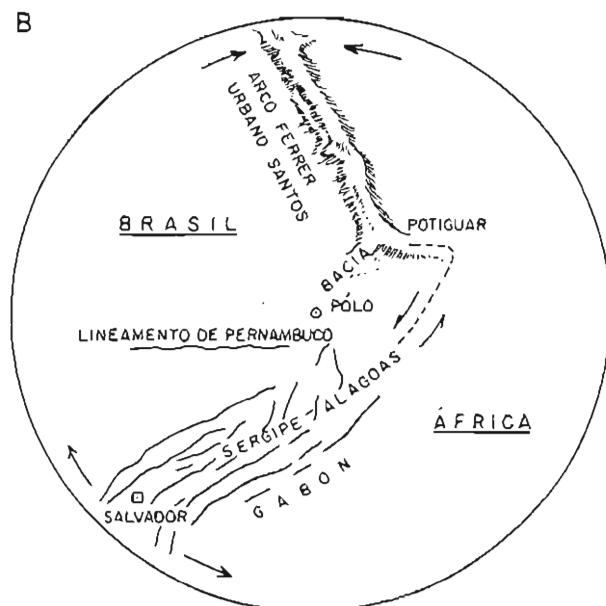


Foto 27 - Estágio mais avançado da separação. Note-se a passagem do regime compressional do Arco Ferrer-Urbano Santos para o regime extensional da Bacia Potiguar, a falta de feições compressionais ou extensionais entre esta e a Bacia de Sergipe-Alagoas, e o conjunto de falhas de extensão e de transtensão nesta última. O lineamento de Pernambuco forma-se espontaneamente, delimitando a microplaca sergipana. A) Experimento, B) Interpretação.

- 7) A velocidade do fluxo aumenta com a inclinação, com a espessura do sal e com a espessura dos sedimentos sobrepostos.
- 8) Onde o fluxo de sal é bloqueado, formam-se estruturas compressionais (dobras e empurrões) nos sedimentos sobrepostos, acompanhadas de intrusões de sal que podem levar à formação de domos.
- 9) As estruturas tensionais acima do sal são côncavas e tornam-se mais jovens em direção ao fluxo; as estruturas compressionais são convexas e tornam-se mais velhas nesta mesma direção. A área plana entre os dois tipos de estruturas diminui com o tempo.
- 10) Uma separação de dois continentes por rotação diferencial, ao redor de um pólo contido dentro deles, cria, ao longo da margem, um sistema de falhas transtensional e um sistema transpressional, separados por uma faixa de transcorrência pura.
- 11) A distribuição de falhas no modelo de separação rotacional mostra boa correspondência com aquela observada no nordeste brasileiro, com sistemas de falhas normais e transtensionais na faixa correspondente à Bacia Sergipe-Alagoas, e transpressionais na faixa correspondente à porção ocidental do Atlântico Equatorial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos geólogos do DEPEX, especialmente a Lincoln Guardado pela valiosa cooperação; ao mes-trando Rizzo por sua participação em um dos experimentos; aos geólogos K. Chang, R. Kowsmann e F. Pellon pelos comentários que enriqueceram o manuscrito, e à PETROBRÁS por ter permitido a publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACOCOLI, G.; MORALES, R. G. & CAMPOS, O. A. J. The Namorado oil field: a major oil discovery in the Campos basin, Brazil. In: HAL-BOUTY, M. T., ed. *Grand oil and gas fields of the decade 1968-1978*, Tulsa, OK, AAPG, 1980, p. 329-38.
- BARROS, M. C. et alii. *Distribuição e modelo deposicional das areias turbidíticas maestrichtianas/albianas na Bacia de Campos*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS / DEPEX / CENPES, 1982. (Relatório interno).
- CHANG, H. K.; MIRANDA, F. P. &

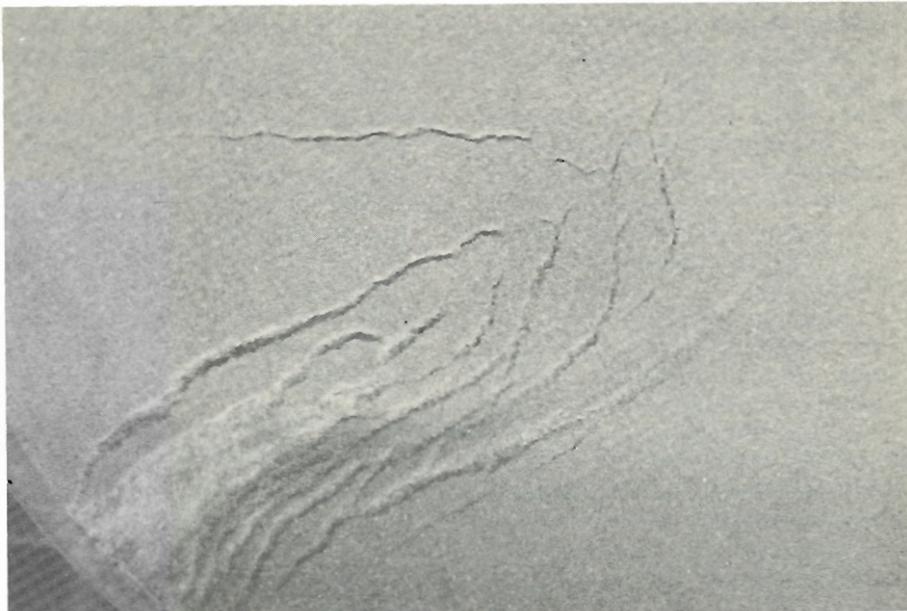


Foto 28 - Padrão das fraturas que definem a microplaca sergipana. (Veja também a foto 27). Note-se o rifteamento transtensional na Bacia Sergipe-Alagoas, com o aumento da extensão para sudeste.

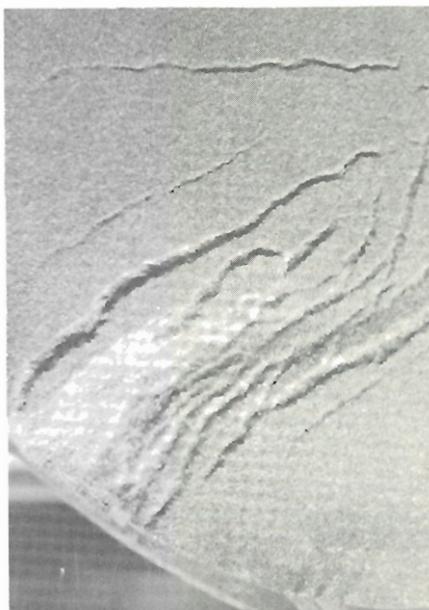


Foto 29 - Detalhe da foto anterior.

- CASTRO, J. C. *Estudo geológico da Bacia do São Francisco*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES, 1987. Em impressão. (Relatório interno).
- CLOOS, E. Experimental analysis of Gulf Coast fracture patterns. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 52 (3), 420-44. 1968.
- DIXON, J. M. & SUMMERS, J. M. Recent developments in centrifuge modelling of tectonic processes: equipment, model construction techniques and rheology of model



Foto 30 - Cadeias e zonas de cisalhamento dúctil no topo do silicone, ao final do experimento. O silicone representa as camadas dúcteis encontradas na parte inferior da crosta e superior do manto.

- materials. 83-102, 1985.
- FIGUEIREDO, A. M. F. & MOHRIAK, W. U. A tectônica salífera e as acumulações de petróleo da Bacia de Campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de

- Janeiro, 1984. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*. Rio de Janeiro, SBG, 1984.
- FIGUEIREDO, A. M. F. *et alii*. Fatores que controlam a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos (com ênfase nos arenitos turbidíticos). Rio de Janeiro, PETROBRÁS/DEPEX/CENPES, 1983. (Relatório interno).
- FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATMARI, P. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 9., Fortaleza, 1985. *Anais*. [s.n.t.].
- EDUARDO, L. R.; PERES, W. E. & SOUZA CRUZ, C. E. Depositional model and seismic expression of the turbidites in the Campos Basin, offshore Brazil. *In*: AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS ANNUAL CONVENTION, Atlanta, Georgia, 1986. *Proceedings* [s.n.t.].
- HOSFIELD, W. T. An experimental approach to basement controlled faulting. *Geologie en Mijnbouw*, 56 (4), 363-70, 1977.
- HUBBERT, K. M. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 48: 1459-520, 1937.
- LANA, M. C. *Rifteamento na Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil*, Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, 1985. 124 p. Tese de mestrado.
- LANA, M. C. & MILANI, E. J. A microplaca do nordeste brasileiro - um elemento dinâmico no rifteamento cretácico inferior. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, Goiânia, 1986. *Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia*. [s.n.t.].
- MILANI, E. J. *Aspectos da evolução tectônica das bacias do Recôncavo e Tucano Sul, Bahia, Brasil*, Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, 1985. 131 p. Tese de mestrado.
- MILANI, E. J. Tectônica cisalhante na evolução do rift do Recôncavo-Tucano-Jatobá. *Rev. Bras. Geociências*, 15 (4): 287-72, 1985.
- MILANI, E. J.; LANA, M. C. & SZATMARI, P. Mesozoic rift basins around the NE - Brazilian micro-plate (Recôncavo-Tucano-Jatobá, Sergipe-Alagoas). *In*: AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS. *Memoir*. Tulsa, 1987. Em impressão.
- RABINOWITZ, P. D. & LA BRECQUE, J. The Mesozoic South Atlantic Ocean and evolution of its continental margins. *J. Geophys. Res.*, 84B (811): 5973-6002, 1979.
- RAMBERG, H. *Gravity, Deformation and the Earth's crust*, London, Academic Press, 1967. 214 p.
- SZATMARI, P. *et alii*. Mecanismo tectônico do rifteamento sul-atlântico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*. Rio de Janeiro, SBG, 1984. p. 1589-601.
- VENDEVILLE, B. *et alii*. Physical models in extensional tectonics at various scales. *In*: COWARD, M. P.; DEWEY, J. F. & HANCOCK, P. L., ed. *Continental extensional tectonics*. London, Geological Society of London, 1987. Em impressão.
- ZANOTTO, O. & SZATMARI, P. Mecanismo de rifteamento da porção ocidental da margem norte brasileira. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 9., Fortaleza, 1985. *Anais* [s.n.t.].

ABSTRACT

The recent perception of the enormous importance of the correct cognizance of structures and their mechanism of formation, by universities and oil companies alike, has resulted in the appearance of laboratories that are specialized in tectonic modeling. The laboratory at CENPES, built locally under the direction of Professor Cobbold, of the University of Rennes, France, specializes in modeling tectonic processes important for oil exploration in Brazil, such as rifting, convergent and especially divergent strike slip, and salt flow.

These processes are modeled, using two or three layers and choosing materials whose physical properties (rupture point, viscosity, density) stand in appropriate relationship both with each other and with the principal layers to be modeled. Sand of uniform grain size and free of any salt is used to model the brittle upper crust; a special variety of silicone to model the lower crust and the mantle lithosphere, as well as ductile layers such as salt, while honey is used to represent the asthenosphere.

Three-layer experiments of extension show rifting along characteristically

zig-zagging segments, which reflect oblique movement along faults. As extension advances, the ductile material appears on the floor of the rifts.

Three-layer compressional experiments reproduce complex patterns of folds and faults, permitting also the modeling of convergent strike slip around more rigid blocks.

Two-layer experiments with salt flow on an inclined surface reproduce both extensional and compressional structures. Both extension and compression are accompanied by sedimentation which substantially changes fault angles, block movements and the shape of the upward intruding ductile material. These experiments reproduce the complex salt structures of the Campos and Santos basins and recreate the relief that controlled turbidite deposition.

Two-layer rotational experiments serve to model the mechanism of separation between South America and Africa and to reproduce strike slip faults and transtensional basins forming during the early Cretaceous time in Northeastern Brazil.