

# BREVES COMUNICAÇÕES, DEBATES, ANÁLISES, REFLEXÕES

## NOTES, DISCUSSION, ANALYSIS, REFLECTIONS

Esta seção destina-se à reflexão, ao pensamento geocientífico, a breves comunicações. É o espaço reservado para a discussão menos formal da matéria geológica e geofísica. Nela, os geocientistas poderão expor seus pontos de vista a respeito de temas polêmicos, estimulando o salutar e necessário debate científico em nossa comunidade especializada; apresentar, através de breve comunicação, resultados relevantes obtidos em trabalhos ou pesquisas em desenvolvimento; analisar algum importante artigo surgido na literatura; apresentar retrospectivas históricas e reflexões em torno de matéria específica; discorrer sobre alguma obra recém-editada e julgada interessante para a Geologia do Petróleo; comentar, criticamente, eventos ocorridos no Brasil ou no exterior; discutir, dos pontos de vista geocientífico e geopolítico, as tendências das diversas áreas da Geologia do Petróleo.

Publica, também, resumos de teses de interesse da linha da Revista.

*This section is reserved for geoscientific thoughts and ideas, informal discussions on geology and geophysics, and technical notes. Here geoscientists can help stimulate vital and profitable scientific debate within our specialized community by sharing their points of view on controversial issues. This space is also where readers will find notes on significant results from current studies or research, analyses of major articles from the technical literature, presentations of historical retrospects and reflections on specific topics, comments on recently published works linked to the field of petroleum geology, critical assessments of the latest events in Brazil or abroad, plus geoscientific and geopolitical discussion of trends within petroleum geology.*

*Pertinent theses and dissertation abstracts also appear in this section.*

### ZONAS DE CISALHAMENTO E A MIGRAÇÃO PRIMÁRIA DE HIDROCARBONETOS

#### SHEAR ZONES AND PRIMARY HYDROCARBON MIGRATION

Nos últimos anos, com o desenvolvimento do conceito de zonas de cisalhamento (*shear zones*), a exploração mineral tem experimentado um grande avanço na formulação de modelos que explicam satisfatoriamente a ocorrência de depósitos minerais não supergênicos (Sibson, 1987; Sibson, 1989). Tais depósitos têm sua gênese ligada à maciça percolação de fluidos, das mais diversas naturezas e composições, através da litosfera.

A migração de fluidos é também tema de alta relevância na exploração de hidrocarbonetos líquidos e gasosos. Embora os processos químicos envolvidos na geração do petróleo sejam razoavelmente bem conhecidos, os mecanismos responsáveis pela expulsão do HC formado das rochas geradoras permanecem ainda sob uma aura nebulosa e não inteiramente entendidos (Magara, 1978). O fraturamento hidráulico natural de rochas geradoras tem sido invocado

como mecanismo dominante em regiões que apresentam pressões de formação anormalmente altas (Mandl, Harkness, 1987), porém é incapaz de explicar a migração primária em áreas que apresentam gradientes hidrostáticos normais.

Objetiva-se, com esta breve comunicação, introduzir noções básicas sobre zonas de cisalhamento e apresentar os princípios de um mecanismo potencialmente responsável pela extração dos hidrocarbonetos dos níveis geradores e sua colocação no meio permo-poroso de uma bacia sedimentar. Almeja-se ainda familiarizar o leitor com o tema e provocar o debate.

Zonas de cisalhamento são, em essência, corredores com deformação localizada. Em tais regiões, a deformação ocorre internamente a uma zona de margens paralelas e com espessura mensurável, ao invés de se processar através um simples plano. A deformação ao longo da zona é do tipo não-coaxial e pode ocorrer em regime rúptil (*brittle*), rúptil-dúctil ou dúctil, dependendo das condições ambientais e da natureza da porção de litosfera atingida no processo. Um dos principais fatores que determinam se uma rocha vai se deformar rúptil ou ductilmente é a taxa de deformação (*strain rate*). Dependendo das demais variáveis ambientais uma rocha, sofrendo uma taxa de deformação relativamente

baixa, tende a se deformar plasticamente. A deformação ruptural ocorre quando a taxa de modificação estrutural é tão rápida que não permite o reajustamento no campo plástico. As demais variáveis do ambiente de deformação são: temperatura, pressão confinante, *stress* diferencial, tipo de fluido e pressão de poros.

Zonas de cisalhamento ocorrem em qualquer ambiente tectônico, seja ele extensional, compressional ou de rejeito direcional (*strike-slip*). Elas são ainda feições longilíneas, onde o seu comprimento excede em muito as outras dimensões, e que possuem, quando em escala crustal, a tendência de espessamento em profundidade. Uma falha normal lítrica de baixo ângulo, feição comumente observada em bacias sedimentares, poderia ser um exemplo de zona de cisalhamento sob regime extensional. Deformação pervasiva na região onde a zona de falha assume baixo ângulo (zona de cisalhamento dúctil), e deformação distribuída em discretas zonas de falha a níveis rasos (zona de cisalhamento rúptil), caracterizam este tipo de zona de cisalhamento, ocorra ela a nível de embasamento ou no interior das bacias.

As zonas de cisalhamento produzem diferentes tectonitos (Sibson, 1977). Estas litofácies são produtos finais modificados, em vários graus de deformação, das rochas que

bordejam estas zonas. Estes produtos variam de milonitos a brechas inconsolidadas e, em geral, com exceção das brechas, possuem como característica básica entre eles a redução do tamanho do grão e a orientação preferencial dos seus elementos texturais. Os milonitos são termos que indicam deformação plástica, enquanto que os cataclasitos e as brechas permitem inferir a predominância da deformação do tipo rúptil. Uma diferença fundamental entre estes dois modos de deformação é o incremento de volume que ocorre no caso das zonas de cisalhamento rúpteis. Este aumento de volume durante a deformação viabiliza a materialização dos depósitos minerais associados a estas zonas.

A redução granulométrica e a reorientação de feições estruturais que ocorrem nas zonas de cisalhamento são o resultado da atuação, a nível de matriz, grãos e cristais, de um conjunto de processos conhecidos como "mecanismos de deformação" (Knipe, 1989). Os mecanismos que atuam numa determinada zona, em um instante determinado, dependem das condições ambientais às quais estão submetidas as rochas, bem como da sua composição mineralógica e grau de anisotropia. No interior de uma bacia sedimentar existe deformação nas fases sin e pós-deposicional, pré e pós-litificação, envolvendo processos que ocorrem tanto na diagênese como no metamorfismo de baixo grau. Dentre os mecanismos que ocorrem a baixas temperaturas, e que portanto são os candidatos mais prováveis a serem contemporâneos à fase de geração de hidrocarbonetos, estão: rotação de corpo rígido, fraturamento, falhamento, clivagem, budinagem, venulação, dissolução por pressão (*pressure solution*) e recristaliza-

ção. Deformação à baixa temperatura implica em níveis térmicos inferiores a um terço da temperatura de fusão dos minerais componentes do arcabouço da rocha (Groshong, 1988). Sob estas condições, cristais e grãos individuais sofrem taxas de deformação não superiores a 20%, o que resulta numa rocha destituída de sinais macroscópicos muito evidentes deste processo (Groshong, 1988). A identificação tentativa dos mecanismos e o reconhecimento de sua atuação no desenvolvimento da trama de deformação permitem deduzir o sentido de cisalhamento de uma zona, bem como a orientação e magnitude dos esforços responsáveis.

Um dos aspectos fundamentais das zonas de cisalhamento é a sua independência de escala. Elas ocorrem com as mesmas características geométricas e exibem idênticas propriedades mecânicas em qualquer escala de observação (Tchalenko, 1970), apresentando, assim, comportamento fractal (Baxter, White, 1988). A dificuldade inicial de se reconhecer o alcance deste aspecto tem impedido a expansão da aplicação dos conceitos básicos de zonas de cisalhamento a temas de conteúdo prático na exploração de petróleo. Embora os efeitos da deformação imposta por zonas de cisalhamento no meio poroso seja matéria em estudo (Mitra, 1988; Jones, Preston, 1987; Genna, 1988), o papel dos mecanismos de deformação na migração primária dos hidrocarbonetos não tem sido objetivamente abordado. Para avançarmos neste último tema, examinaremos brevemente a questão da dinâmica de fluidos nas zonas de cisalhamento.

O conhecimento do padrão geral de fluxo de fluidos em zonas de ci-

salhamento, principalmente na região de deformação rúptil, tem evoluído com observações em áreas intensamente falhadas, de atividade recente. Em um desses estudos (Sibson, 1981), foi identificado comportamento variável da posição do lençol freático imediatamente antes e após um abalo sísmico. Em geral, o lençol sofre repentino rebaixamento momentos antes da rutura, e volta a uma posição acima da original momentos depois do choque. Estas observações deram ensejo ao desenvolvimento de um modelo denominado "bombeamento sísmico" (*seismic pumping*) (Sibson *et al.* 1975; Sibson, 1981). Durante a fase de acúmulo de esforço, que precede o evento principal, os fluidos presentes numa unidade de volume rochoso são dirigidos para singularidades (micro-fraturas) de onde são bombeados reversa e ascendente após o choque. Ao se analisar em gráfico cartesiano a resistência das rochas ao *stress* aplicado contra o tempo (fig. 1), constata-se que uma pequena queda na taxa de incremento de *stress* precede a rutura, ao final da fase linear de acúmulo elástico de *stress*. O modelo de bombeamento sísmico admite que durante esta fase que precede a rutura, o *stress* é absorvido através do desenvolvimento de micro-fraturas tracionais e de cisalhamento (*tension and shear fractures*), para onde ocorre migração dos fluidos presentes nas vizinhanças. O fluxo ocorre pela relativa baixa pressão de poros que se estabelece nas micro-fraturas. Na continuação do processo, e a cada vez que a região de rutura é atingida, o fluido é expulso ascendentemente, dando início a um novo ciclo.

No caso das zonas dúcteis, o fluxo de fluidos é mais homogêneo e

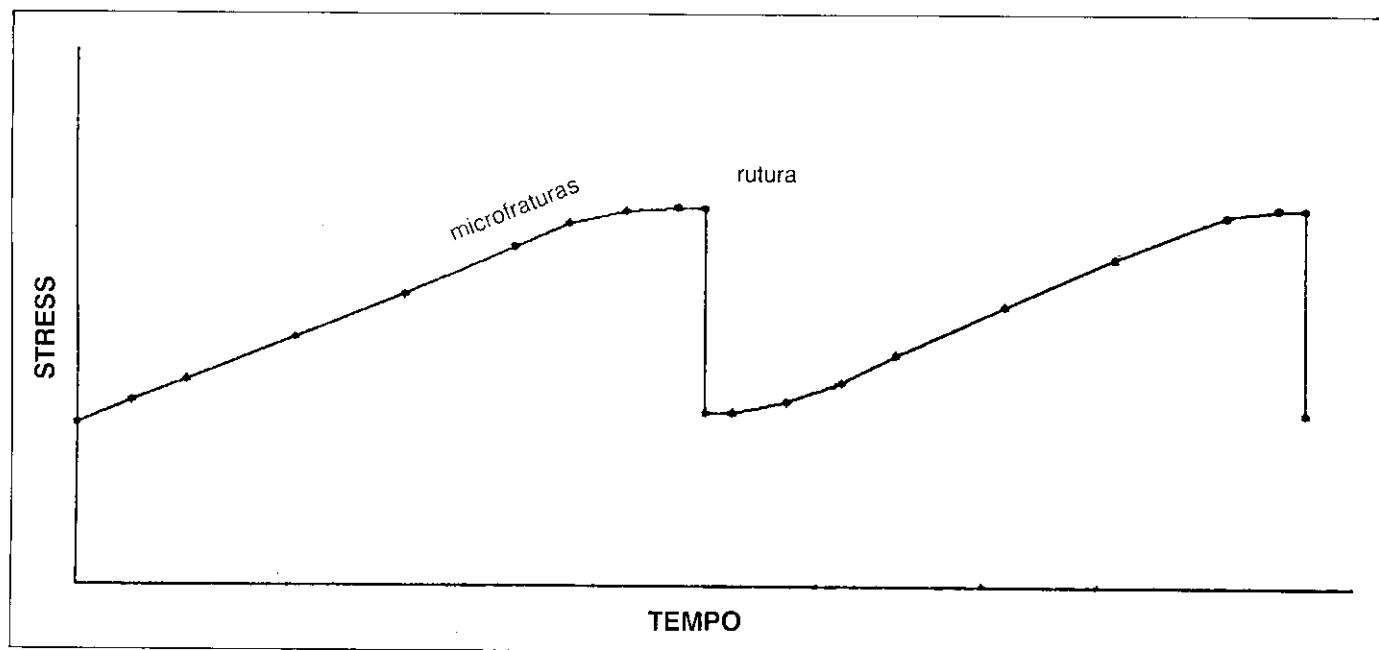


Fig. 1 - O ciclo sísmico. O stress aumenta até onde o microfraturamento começa a ficar importante. O aumento da densidade do microfraturamento leva à ruptura, depois da qual o ciclo recomeça.

Fig. 1 - The seismogenic cycle. Stress increases up until where microfracturing begins to gain importance. The increase in the density of microfracturing leads to rupturing, after which the cycle begins again.

contínuo, devido ao caráter assísmico e progressivo da deformação. A expulsão dos fluidos, neste caso, resulta da rotação das micro-fraturas (micro-reservatórios) dentro do corredor de cisalhamento. Durante a progressão da deformação, os elementos estruturais presentes numa zona de cisalhamento são submetidos a mecanismos rotacionais, o que os coloca temporariamente em posições adversas dentro de um novo campo de esforço local, o que inviabiliza, por exemplo, a manutenção de uma fratura aberta. A eventual posição desfavorável da fratura em relação à componente compressional do cisalhamento drena o micro-reservatório transiente que se formou durante a permanência de uma determinada fratura no campo dilatante de um par cisalhante. Assim, as zonas de cisalhamento possuem a propriedade de catalizar o fluxo de fluidos numa determinada região do perfil litosférico. A nível de crosta superior, incluindo o inte-

rior de bacias sedimentares, este fluxo é parcialmente responsável pela manutenção da dinâmica de fluidos baciais, em adição aos processos mais conhecidos envolvendo compactação, fluxo aquatermal, osmose, recarga e fluxo de águas meteóricas.

Se analisarmos o padrão de circulação de fluidos associado a zonas de cisalhamento no interior de uma bacia sedimentar, a ocasião propícia para que o hidrocarboneto gerado no interior das rochas pelíticas geradoras seja transferido para as microrregiões de mais baixa pressão de poros são os instantes imediatamente anteriores a um sismo, na região rúptil, e aqueles durante o deslocamento plástico, provavelmente assísmico, de pacotes de sal ou de folhelhos, na região dúctil. Na liberação do esforço, seja ele instantâneo no caso do abalo, ou gradual na deformação plástica, o HC presente nas micro-fraturas ou zonas dilatantes é então expul-

so. A expulsão por bombeamento obedece ao padrão de fluxo estabelecido pelo gradiente de pressão hidrostática da bacia que, em geral, dirige-o ascendente. A ciclicidade do processo garante a mázima transferência de fluidos ascendentes na bacia, a qual pode ocorrer simultaneamente à fase de migração primária dos hidrocarbonetos gerados. A eficiência deste mecanismo de migração ora proposto é difícil de ser avaliada. Entretanto, ele certamente contribui, de maneira significativa, nos casos em que não existe direta relação espacial entre gerador e reservatório, e onde pode ser documentada movimentação estrutural durante o intervalo de tempo no qual ocorre a geração de hidrocarbonetos.

Como conclusão mais importante, está a constatação de que as zonas de cisalhamento exibem e obedecem muitos dos mecanismos e modelos bastante conhecidos de sistemas de falhas transcorrentes

ou de transferência, tendo, portanto, seu controle geométrico de certa forma facilmente previsível. A nossa capacidade de identificar a rota de migração primária dos hidrocarbonetos reside assim, tão somente, na habilidade de prever as zonas de liberação de tensão cisalhante ao longo de uma região falhada. Ainda sob este prisma, a questão da reativação de falhas, e a sua intermitente função como dutos de migração, também pode ser melhor entendida.

Com o advento do imageamento sísmico em três dimensões, e o avançado estágio de conhecimento geológico de algumas de nossas bacias, torna-se desejável aliar mais esta técnica a tantas outras que podem contribuir, de alguma maneira, para o estabelecimento da rota de migração e acúmulo de hidrocarbonetos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAXTER, J. L., WHITE, S. Shear zones the fairways to gold mineralization: structural geology workshop manual. *Hermitage Holdings Pty*, 1988. 259 p.
- GENNA, A. Déformations synsédimentaires hydroplastiques liées à la tectonique pyrénéenne compressive dans la molasse éocène du Minervois. Paris: *C. R. Acad. Sci. Paris*, v. 306, s. 2, p. 1.109-1.114, 1988.
- GROSHONG JR., R. H. Low-temperature deformation mechanisms and their interpretation. *Geol. Soc. of America Bulletin*, v. 100, p. 1.329-1.360, 1988.
- JONES, M.E., PRESTON, R.M.F. *Deformation of sediments and sedimentary rocks*. London: Geological Society of London, 1987. 350p. (Geological Society of London. Special publication, 29).
- KNIFE, R. J. Deformation mechanisms: recognition from natural tectonites. *Journal of Structural Geology*, v. 11, n. 1-2, p. 127-146, 1989.
- MAGARA, K. Compaction and fluid migration: practical petroleum geology. Elsevier, *Developments in Petroleum Science*, v. 9, 1978. 319 p.
- MANDL, G., HARKNESS, R.M. Hydrocarbon migration by hydraulic fracturing. In: JONES, M.E., PRESTON, R.M.F. *Deformation of sediments and sedimentary rocks*. London: Geological Society of London, 1987. p.39-53.
- MITRA, S. Effects of deformation mechanisms on reservoir potential in central appalachian overthrust belt. *AAPG Bulletin*, v. 72, n. 5, p. 536-554, 1988.
- SIBSON, R. H. Earthquake faulting as a structural process. *Journal of Structural Geology*, v. 11, n. 1-2, p. 1-14, 1989.
- SIBSON, R. H. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. *Geology*, v. 15, p. 701-704, 1987.
- SIBSON, R. H. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of Geol. Soc. London*, v. 133, p. 191-213, 1977.
- SIBSON, R. H. Fluid Flow Accompanying faulting. In: Earthquake Prediction and an International Review, 1981, Washington: *Maurice Ewing Series*, 4, p. 593-603, 1981.
- SIBSON, R. H., MOORE, J. McM., RANKIN, A. H. Seismic pumping: a hydrothermal fluid transport mechanism. *Journal of Geol. Soc. London*, v. 131, p. 653-659, 1975.
- TCHALENKO, J. S. Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geol. Soc. of America Bulletin*, v. 81, p. 1.625-1640, 1970.

**Renato Pimenta de Azevedo**

1 - Divisão de Interpretação (DINTER), Distrito de Exploração do Norte (DENOR), Rodovia Arthur Bernardes, 5511, CEP 66800, Belém, Pará, Brasil.