

## ANÁLISE DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM COM APLICAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO ESTRUTURALMENTE CONTROLADOS: O CASO DO CAMPO PETROLÍFERO DE XARÉU (BACIA DO CEARÁ)\*

Patrícia Rose de CARVALHO COSTA<sup>1,3</sup>, Alex Francisco ANTUNES<sup>2,3</sup>, Emanuel Ferraz JARDIM DE SÁ<sup>2,4</sup>, Fernando César ALVES DA SILVA<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Curso de Geologia (CG/CCET/UFRN), Campus Universitário, Caixa Postal 1596, CEP 59078-970, Natal/RN - patigeologia@hotmail.com

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/CCET/UFRN), Campus Universitário, Caixa Postal 1596, CEP 59078-970, Natal/RN

<sup>3</sup> Bolsista ANP/PRH-22

<sup>4</sup> Departamento de Geologia (DG/CCET/UFRN) - ANP/PRH-22 - Pesquisador CNPq

\* Trabalho realizado com o apoio financeiro do CT-PETRO/FINEP/PETROBRAS

**Resumo** – Este trabalho analisa o padrão de fraturamento em meso-escala no Campo de Xaréu (Bacia do Ceará, Nordeste do Brasil). Foram estudados testemunhos de três poços verticais, que amostram siliciclásticos e carbonatos (seções rifte e transicional da Bacia) dispostos ao longo de uma seção transversal à estrutura do campo, a qual envolve falhas normais listricas e um *roll-over*. A técnica envolve uma reorientação dos testemunhos, baseada nos mergulhos das camadas recuperados de mapas estruturais. Distinguiu-se três gerações principais de estruturas: (1) cisalhamentos hidropásticos paralelos à estratificação, relacionados a zonas de descolamento distensionais e/ou aos flancos do *roll-over*; (2) falhas normais NW-SE (ambos os grupos podem ser relacionados a um contexto de abertura oblíqua da margem equatorial transformante); (3) falhas com películas de argilominerais recristalizados e fibras de calcita e sílica. Da análise da orientação das estruturas (3) pôde ser inferido um sistema distensional com eixo  $\sigma_3$  na direção NE/ENE. As mesmas são tentativamente associadas, temporalmente, ao evento que controlou o Vulcanismo Macau/Mecejana na Província Borborema.

Palavras-Chave: testemunhos; reorientação; fraturas.

**Abstract** – The meso-scale fracture pattern in the Xaréu Oil Field (Ceará Basin, northeast Brazil) was analysed on the basis of cores of three vertical wells. These cores sample siliciclastic and carbonatic rocks ascribed to the rift and transitional sequences in the Ceará Basin, along a traverse section to the main field structure, which encompasses listric extensional faults, and a roll-over anticline. The technique developed involves core re-orientation, based on the bed dips recovered from structural maps. Three main generations of structures were recognized: (1) layer-parallel hydroplastic shears, related to extensional detachment zones and/or to the roll-over limbs; (2) extensional NW-SE trending faults (both groups may be related to an oblique-opening setting of the Equatorial transform margin); and (3) faults with clay smears and calcite and silica fibers. From the orientation analysis of (3) structures it was possible to infer an extensional system with  $\sigma_3$  oriented along a NE to ENE direction. These structures are interpreted as being time-related to the Macau/Mecejana Volcanism, in the Borborema Province.

Keywords: cores; re-orientation; fractures.

## 1. Introdução

Em um reservatório fraturado, a análise dos padrões de juntas e pequenas falhas constitui uma importante ferramenta para caracterizar rotas de migração e sítios de acumulação de óleo. Nesse contexto, é preciso conhecer a geometria, cinemática e idade dos eventos de fraturamento. O Campo de Xaréu, situado na Sub-Bacia de Mundaú (Bacia do Ceará), vem sendo alvo deste tipo de estudo, em diferentes escalas de abordagem.

Este trabalho apresenta a metodologia de definição do padrão de fraturamento em meso-escala, através da análise de testemunhos de três poços verticais dispostos ao longo de uma seção transversal ao Campo Petrolífero de Xaréu (figura 1). Os resultados obtidos são comparados e conjugados com informações de seções sísmicas e outros dados geológicos. Os testemunhos amostram rochas siliciclásticas e carbonáticas das seções rift e transicional, daquela bacia (Formações Mundaú e Paracuru, respectivamente). O arcabouço estrutural do Campo envolve falhas normais lítricas ladeando uma estrutura *roll-over*.

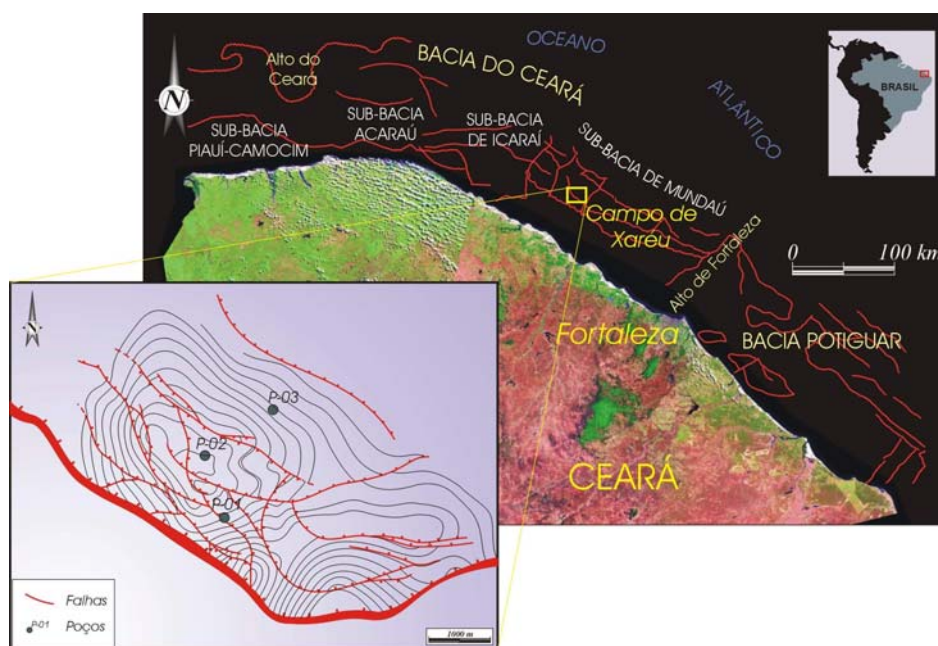


Figura 1: Localização geográfica e contexto geológico do Campo Petrolífero de Xaréu (Bacia do Ceará).

## 2. A Reorientação de Testemunhos

Para a definição do padrão de fraturamento de rochas da Sub-Bacia de Mundaú (Bacia do Ceará) foi realizada a análise de testemunhos de três poços verticais dispostos ao longo de uma seção transversal ao Campo Petrolífero de Xaréu. Estes testemunhos amostram rochas siliciclásticas e carbonáticas e são aqui denominados de P-01, P-02 e P-03 (figura 1). Pelo fato dos testemunhos não serem originalmente orientados, foi preciso efetuar uma reorientação expedita dos mesmos.

Testemunhos orientados são empregados para facilitar as medidas de algumas propriedades direcionais das rochas, tais como porosidade, permeabilidade, acamamento, fraturamento, estruturas de fluxo *etc.*, além de serem de grande importância na modelagem de reservatórios petrolíferos anisotrópicos. Muito embora testemunhos orientados possam suprir o geólogo com informações a respeito da atitude do acamamento e de falhas e fraturas, geralmente se assume que tais dados não podem ser obtidos a partir de testemunhos cuja orientação original foi perdida, o que nem sempre é o caso. Atualmente, diversas técnicas e ferramentas podem ser utilizadas de modo a propiciar a reorientação de testemunhos originalmente não-orientados. O método aqui empregado se trata de um equivalente expedito e visual daquele desenvolvido por Hesthammer & Henden (2000), que enfatiza uma abordagem mais matemática.

No caso dos poços estudados, para a aplicação do método de reorientação dos testemunhos foram utilizados, essencialmente, os dados de mapas e seções estruturais do Campo de Xaréu. O método consiste no seguinte: com o testemunho não-orientado em mãos e conhecendo-se sua localização no mapa estrutural confeccionado, o primeiro passo é a determinação da direção e o sentido de mergulho do acamamento nas proximidades do poço, obtida a partir da análise das curvas de contorno estrutural do mapa. O segmento do testemunho a ser reorientado é disposto sobre uma rosa-dos-ventos contendo a direção do acamamento determinado a partir do mapa de contorno estrutural; o testemunho é rotacionado até que o sentido de mergulho das camadas observado nele coincida com aquele marcado na rosa-dos-ventos, podendo-se, então, determinar a atitude das estruturas nele presentes.

Para a aplicação da técnica de reorientação desenvolvida, bem como para a aplicação de quaisquer outras, é preciso que as camadas no testemunho não sejam horizontais. A reorientação foi feita com base nos mergulhos das camadas, obtidos a partir de mapas estruturais de horizontes selecionados. Com este referencial estabelecido (o que não é possível no caso de camadas horizontalizadas), foram coletados os dados de orientação de juntas, pequenas falhas e estruturas lineares associadas.

### 3. Estruturas nos Testemunhos

Como descrito nos aspectos metodológicos, para efetuar a reorientação dos testemunhos e, desta forma, analisar do padrão de fraturamento, faz-se necessário o conhecimento da estrutura regional do campo de petróleo em estudo. Através de dados sísmicos, é conhecido que o arcabouço estrutural do Campo de Xaréu envolve falhas normais lítricas ladeando um estrutura *roll-over*, com direção NW.

Pela análise estrutural dos testemunhos, foi possível distinguir três gerações principais de estruturas:

As estruturas precoces ( $D_1$ ) apresentam caráter hidroplástico e são caracterizadas por cisalhamentos penetrativos, paralelos à estratificação das rochas. Estes cisalhamentos imprimem forte deformação em marcadores semicirculares (concreções, nódulos, clastos e microfósseis), que permitem, por vezes, inferir o transporte tectônico para NE (figura 2). Lineações penetrativas, em geral com orientação NE-SW, podem ser observadas ao longo dos planos de cisalhamento (figura 3). A origem dessas estruturas pode estar relacionada a zonas de descolamento das falhas distensionais, que originariam movimentos predominantemente para NE (*down-dip*) ou a efeitos de cisalhamentos ao longo das camadas, nos flancos do *roll-over* (envolvendo um mecanismo de deslizamento flexural), responsáveis pela origem de movimentos *up-dip*, tanto para NE como para SW.

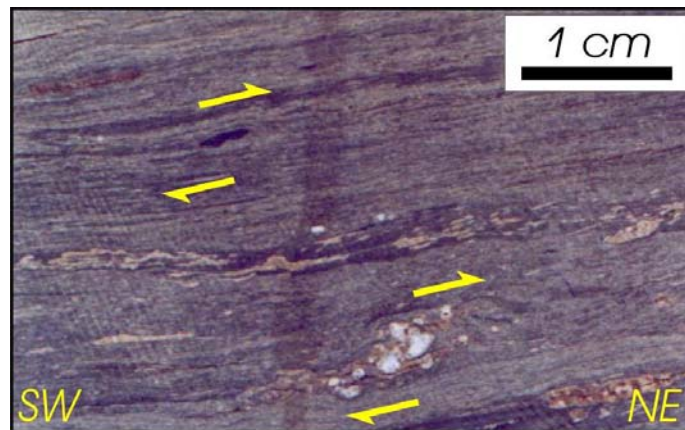


Figura 2: Folhelho negro fortemente deformado com porfiroclastos sigmoidais indicando transporte tectônico para ENE.

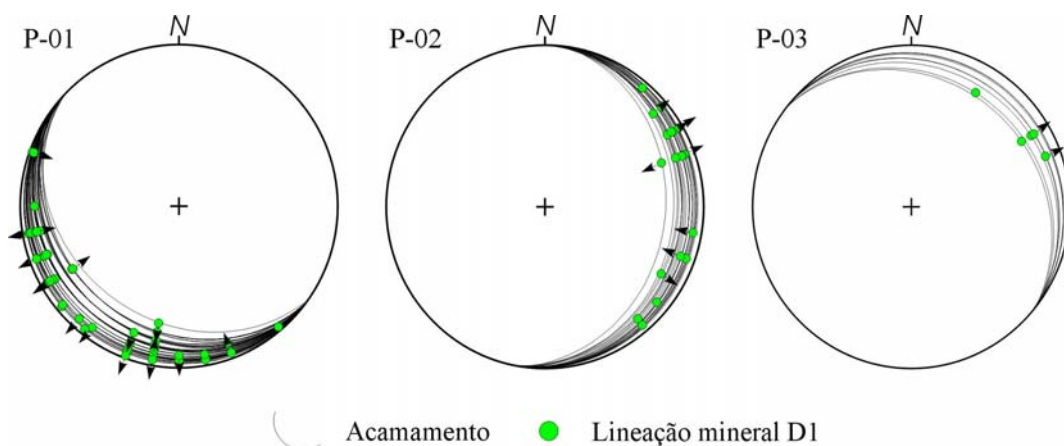


Figura 3: Estereogramas de Schmidt (hemisfério inferior) para as estruturas  $D_1$  mapeadas nos testemunhos de sondagem.

O segundo conjunto de estruturas ( $D_2$ ) é caracterizado por falhas normais que truncam em alto ângulo as estruturas anteriores (figura 4). Estas falhas possuem direção principal NW-SE, exibindo mergulhos que variam para

NE e para SW. Associadas às falhas ocorrem juntas distensionais subverticais, preenchidas por calcita (figura 5a). Tais estruturas também apresentam caráter hidroplástico.

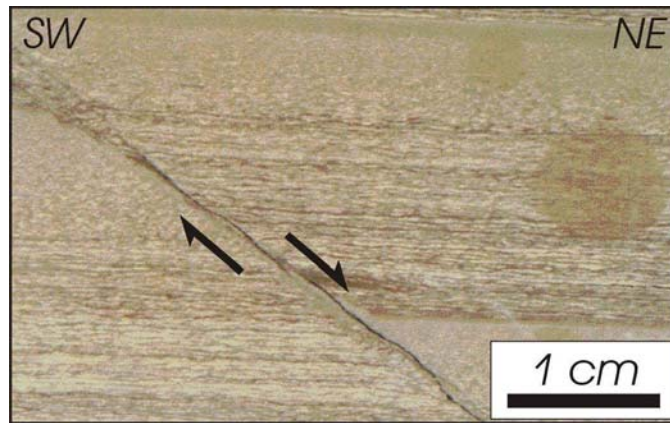


Figura 4: Ostracodito afetado por mesofalha normal de direção NW-SE.

As estruturas  $D_1$  e  $D_2$  podem ser relacionadas a uma mesma fase de deformação, com  $D_2$  operando em um estágio um pouco mais tardio. Ambos os conjuntos de estruturas são compatíveis com o campo de tensões associado à abertura da Margem Equatorial Atlântica ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  horizontais e com direções NW-SE e NE-SW, respectivamente) em regime de transcorrência ou transtração dextral ao longo de fraturas NW a E-W, no Neocretáceo (a partir do Aptiano).

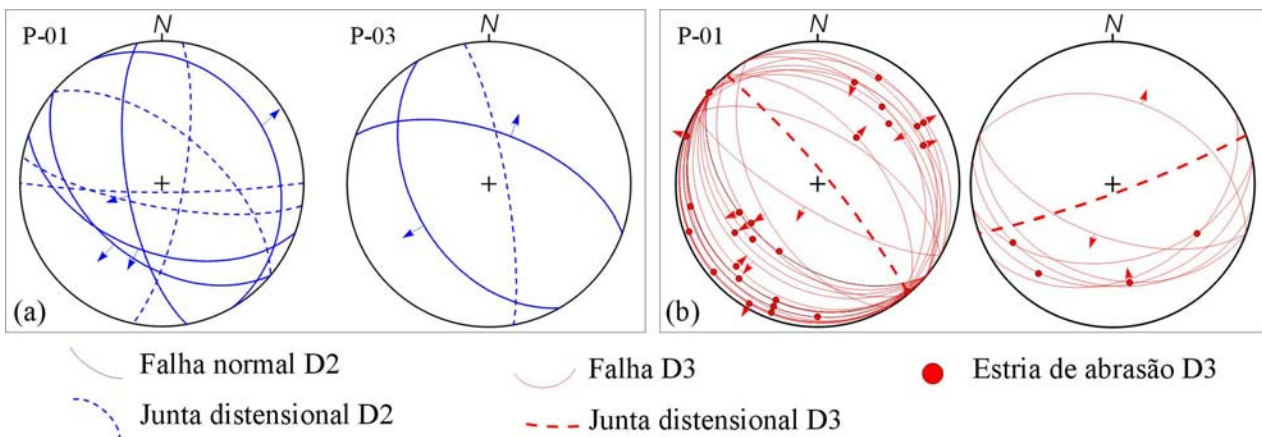


Figura 5: Estereogramas de Schmidt (hemisfério inferior) para as estruturas  $D_2$  e  $D_3$  mapeadas nos testemunhos de sondagem.

A terceira geração de estruturas ( $D_3$ ), de caráter estritamente frágil, caracteriza-se por falhas de direções variadas (E-W, NE-SW, NNW-SSE – figura 5b), oblíquas ou paralelas à laminação sedimentar. As mesmas exibem películas de argilominerais recristalizados (figura 6), estrias e fibras minerais de calcita e sílica.

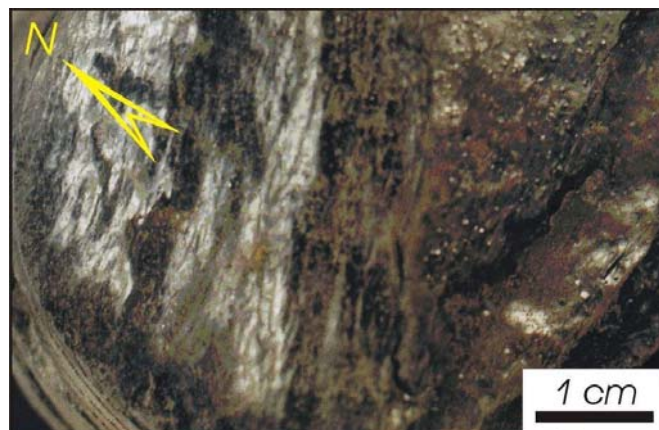


Figura 6: Folhelho negro com película de argilominerais recristalizados desenvolvendo estrias.

#### 4. Discussões

Da análise da orientação das estruturas  $D_3$  pôde ser inferido um sistema distensional com o eixo de máxima distensão ( $\sigma_3$ ) na direção NE/ENE. A presença de películas de argilominerais recristalizados e fibras de carbonato e sílica nos espelhos de falha indica uma deformação em T mais alta, em relação aos eventos precedentes, o que pode estar relacionado à percolação de fluidos aquecidos por atividade vulcânica. Este conjunto de estruturas é, então, tentativamente associado ao domeamento e *hot spot* neógenos, na Província Borborema (Vulcanismo Macaú-Mecejana). Este vulcanismo foi originado durante a passagem da placa Sul-Americana sobre uma pluma mantélica, gerando, assim, uma distensão geral no plano horizontal, com eixo de máxima distensão ( $\sigma_3$ ) orientado na direção NE-SW, em uma composição com o campo de tensões ativo ao longo da Margem Equatorial Atlântica.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Petróleo Brasileiro S/A (PETROBRAS - UN RN/CE) pela gentil permissão ao acesso aos testemunhos de sondagem utilizados neste trabalho, à Agência Nacional do Petróleo (ANP) pela concessão de bolsas de estudo, e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e à PETROBRAS através do projeto “Caracterização Geomecânica de Reservatórios Heterogêneos para Aumento do Fator de Recuperação através da Perfuração de Poços Multi-Laterais” (CT-PETRO/FINEP/PETROBRAS), pelo financiamento das pesquisas.

#### 6. Referências

HESTHAMMER, J. & HENDEN, J. O. Information on fault orientation from unoriented cores. *AAPG Bull.*, v. 84, nº 4, p. 472-488, 2000.