

SIMULAÇÃO EM LABORATÓRIO DOS PRINCIPAIS POTENCIAIS ESPONTÂNEOS OBSERVADOS EM POÇOS DE PETRÓLEO PARA FINS DIDÁTICOS

LABORATORY SIMULATIONS OF MAIN SPONTANEOUS POTENTIALS OBSERVED IN OIL WELLS FOR EDUCATIONAL PURPOSES

Fabio Ullmann Furtado de LIMA, Raíssa Esmeraldino NESI

Centro de Ensino Superior da Foz do Itajai - Universidade do Estado de Santa Catarina (Cesfi - UDESC), Departamento de Engenharia do Petróleo. E-mail: fuflima@gmail.com; raissanesi@hotmail.com

Introdução

- O Método do Potencial Espontâneo
- Perfis SP em poços de petróleo e o ambiente do poço
- O potencial de junção líquida
- O potencial de membrana

Objetivos

Materiais e métodos

- Cálculo das resistividades dos fluidos utilizados e efeito de polarização de eletrodo
- Simulação do potencial de junção líquida
- Simulação do potencial de membrana

Resultados e discussões

- Resistividades dos fluidos utilizados e efeito de polarização de eletrodo
- Simulação dos potenciais de junção líquida e de membrana

Conclusão

- Agradecimentos
- Referências

RESUMO - Este trabalho foca na simulação em laboratório dos principais potenciais espontâneos observados em poços de petróleo. O potencial de junção líquida foi simulado utilizando uma caixa preenchida com areia e dividida por uma membrana porosa. De um lado, foi adicionada água salgada (simulando a zona virgem nas rochas reservatório) e do outro, fluido de perfuração (simulando a zona lavada). Na situação 1 (2), as medições foram realizadas sem (com) a adição de água salgada. Na situação 1 (2), foi medido um potencial de $0,40 \pm 0,09$ mV ($-22,65 \pm 0,31$ mV) e assim, o efeito de potencial de junção líquida foi demonstrado. O potencial de membrana foi simulado utilizando uma segunda caixa preenchida com areia e água salgada na parte inferior (simulação do arenito com água de formação) e argila na parte superior (simulação do folhelho). Na situação 1 (2), os potenciais foram medidos sem (com) a adição do fluido de perfuração sobre a argila. O potencial medido para a situação 1 (2) foi de $-1,91 \pm 0,10$ mV ($0,62 \pm 0,12$ mV). Da comparação entre as medidas das situações 1 e 2, uma diferença de potencial positiva foi observada, ou seja, o potencial de membrana foi simulado. **Palavras-chave:** Potencial espontâneo. Potencial de membrana. Potencial de junção líquida. Poços de petróleo.

ABSTRACT - This work focuses on laboratory simulations of the main spontaneous potentials observed in oil wells. Liquid junction potential was simulated using a box filled with sand and divided by a porous membrane. On one side, brine was added (simulating the virgin zone in the reservoir rocks) and on the other side, drilling fluid was added (simulating the washed zone). In the first (second) situation, the measurements were carried out without (with) the addition of brine. In the first (second) situation, a potential of 0.40 ± 0.09 mV (-22.65 ± 0.31 mV) was measured and thus, the liquid junction potential was demonstrated. Membrane potential was simulated using a second box filled with sand and brine at the bottom (simulating the sandstone with the water formation) and clay at the top (simulating the shale). In the first (second) situation, the potentials were measured without (with) the addition of drilling fluid on the clay. The measured potential for the first (second) situation was -1.91 ± 0.10 mV (0.62 ± 0.12 mV). From the comparison between the measurements of the first and second situations, a positive potential difference was observed, that is, the membrane potential was simulated.

Keywords: Spontaneous potential. Liquid junction potential. Membrane potential. Oil wells.

INTRODUÇÃO

O Método do Potencial Espontâneo

O aumento da demanda por recursos energéticos com o advento da Segunda Guerra Mundial propiciou um rápido desenvolvimento de tecnologias aplicadas em poços de petróleo. Na década de 30, a descoberta acidental do fenômeno do potencial espontâneo em perfuração de poços foi entendido como sendo resultante do contato entre a lama de perfuração e a água de formação de um horizonte mais

permeável. Assim, o perfil de potencial espontâneo (*Spontaneous Potential* - SP) consistia em registrar os valores de potencial elétrico naturalmente existentes no ambiente do poço. A premissa do método fundamenta-se no fato de que se pode medir uma diferença de potencial entre dois eletrodos fixos na ausência de qualquer campo elétrico criado artificialmente. Inicialmente, este procedimento era utilizado para discriminar horizontes contendo água salgada dos horizontes

contendo óleo ou gás. Frente a uma formação com água salgada a resistividade elétrica é baixa e a amplitude SP normalmente mais alta (em módulo), ao contrário de horizontes com óleo ou gás nos quais a resistividade é alta e o sinal SP quase nulo (Dotti, 2008).

Atualmente, os perfis SP têm o objetivo de discriminar as regiões das rochas reservatórios e geradoras, tendo a vantagem de ser um método simples tanto instrumental como na operação do campo, e de baixo custo envolvido. Além disso, através dos perfis SP pode-se inferir a argilosidade de reservatórios. Os potenciais espontâneos são potenciais naturais existentes, oriundos de atividades eletroquímicas ou mecânicas (eletrocinéticas) dos fluidos em subsuperfície (Gallas, 2005).

O método do potencial espontâneo em casos ambientais ou de engenharia, tem sua mais importante utilização no estudo da movimentação da água em subsuperfície, e o potencial associado é denominado de potencial eletrocinético. As anomalias SP são criadas pelo fluxo em fluidos, de calor ou de íons no subsolo. O seu estudo tem sido benéfico para identificar camadas permeáveis relacionadas à aquíferos (água subterrânea), para a prospecção de depósitos de sulfetos metálicos (Sato & Money, 1960; Logn & Bolviken, 1974; Corry, 1985), para a avaliação de fontes geotermiais (Anderson & Johnson, 1976; Corwin & Hoover, 1979), para a localização de zonas de perda de água em grandes barragens (Olgivy et al., 1969), para pesquisas arqueológicas (Wynn & Sherwood, 1984), e nas tentativas de previsão de terremotos (Mizutani et al., 1976; Corwin & Morrison, 1977; Di Maio & Patella, 1991) e erupções vulcânicas (Di Maio & Patella, 1994; Di Maio et al., 1996). Os potenciais podem ainda estar relacionados à corrosão, contatos entre rochas de diferentes propriedades elétricas e atividade bioelétrica de materiais orgânicos. Quando

falando de prospecção mineral, as anomalias SP, geralmente negativas, são associadas à existência de corpos de sulfetos maciços que agem como condutores, sendo explicado por reações eletroquímicas. Este fenômeno ocorre na interface corpo/rocha encaixante nos níveis acima e abaixo do nível freático (Gallas, 2005).

Perfis SP em poços de petróleo e o ambiente do poço

Os perfis SP em poços se baseiam nas medidas da diferença de potencial natural existente entre dois pontos: um eletrodo fixado em superfície e geralmente imerso em fluido de perfuração (eletrodo peixe) e outro deslocando-se ao longo do poço. Em poços de petróleo, geralmente os potenciais gerados são devido às diferenças entre a mobilidade dos íons dos sais minerais presentes na água de formação, ou seja, dos Na⁺ (cátions) e Cl⁻ (ânions). Os principais potenciais observados em poços de petróleo são: o potencial de junção líquida e o potencial de membrana.

Um processo de filtração forçada da lama de perfuração sobre as camadas permo-porosas dentro de um poço de petróleo ocorre devido à pressão hidrostática, e separa os elementos sólidos e líquidos da lama.

O filtrado (parte líquida) se movimenta radialmente para dentro do meio poroso, retirando a água de formação próxima as paredes do poço.

De acordo com a penetração do filtrado de lama, são denominadas 3 zonas distintas (tendo como base o centro do poço): a zona lavada, a zona invadida e a zona virgem (Figura 1). Na zona lavada há o predomínio nos poros da rocha do filtrado da lama, na zona invadida há valores intermediários entre o filtrado de lama e a água de formação e na zona virgem, encontra-se apenas o fluido original (a água de formação). A profundidade da invasão aumenta com o tempo de perfuração, a permeabilidade do meio e com o diâmetro do poço.

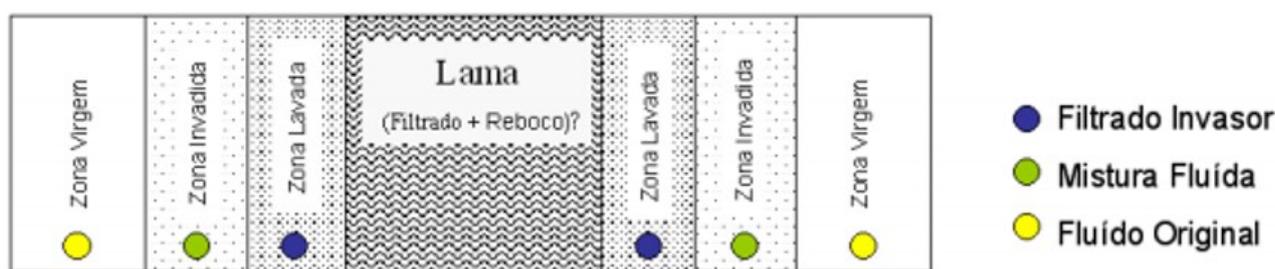


Figura 1 - Representações das zonas lavada, invadida e virgem de acordo com a penetração radial em um poço de petróleo do filtrado de lama. Fonte: Dotti, 2008.

O potencial de junção líquida

O potencial de junção líquida surge pela diferença das mobilidades dos íons existente entre soluções justapostas no ambiente do poço devido ao gradiente de concentração de sais minerais (Telford et al., 1976). Em íons de mobilidades diferentes, os mais móveis se difundem com maior rapidez.

Isso faz com que ocorram duas regiões, cada uma com predominância de íons com sinais opostos, o que estabelece uma diferença de potencial. Esse potencial é desenvolvido em poços de petróleo na interface entre a zona invadida pelo filtrado de lama e a água de formação (geralmente salgada). Como os ânions Cl^- têm maior mobilidade do que os cátions Na^+ , existe um fluxo de Cl^- da zona virgem para a zona invadida (figura 2), na região das rochas permeáveis (região dos arenitos). Podemos interpretar a partir de um

perfil SP o efeito de junção líquida da seguinte maneira: quanto mais negativo o potencial medido, mais poroso e permeável será o arenito (rocha reservatório).

O potencial de membrana

Os argilominerais são minerais silicáticos que possuem uma assimetria em suas estruturas cristalinas que permite a aglomeração de cargas negativas em suas superfícies, além da presença de íons de oxigênio (presença de SiO_2).

O efeito de membrana ocorre quando partículas de argilominerais presentes nos folhelhos das rochas geradoras agem como uma membrana catiônica, permitindo a passagem de cátions (Na^+) mas retendo os ânions (Cl^-) (Figura 2) (Telford et al., 1976).

Assim, o potencial de membrana em um perfil SP pode ser interpretado da seguinte forma: quanto mais positivo o potencial medido, maior a argilossidade da formação (rocha geradora/folhelho).

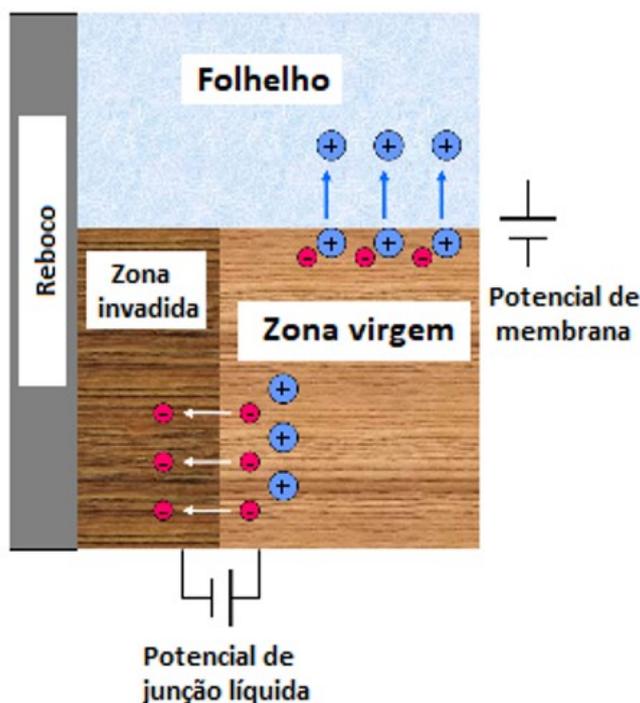


Figura 2 - Representação do fluxo de íons gerando o potencial de junção líquida na região dos arenitos (reservatórios) e gerando o potencial de membrana na região dos folhelhos – (rochas geradoras).

OBJETIVOS

Deseja-se simular em laboratório, de forma simples, os principais potenciais espontâneos medidos em perfis geofísicos de poços de petróleo (perfis SP). Mais especificamente, deseja-se mostrar com base em experimentos simples o efeito de junção líquida (medido na região dos arenitos – rochas reservatórios) e de membrana (medido na região dos folhelhos – rochas geradoras). Queremos mostrar também que a

escolha correta do eletrodo para a realização das medidas de potencial espontâneo é importante, devido ao efeito conhecido como polarização de eletrodo. Estes experimentos podem ser ferramentas úteis no processo ensino-aprendizagem, podendo ser apresentados de forma didática aos alunos de cursos ou disciplinas específicas de Geofísica ou Engenharia de Petróleo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente tópico descreve os materiais utilizados e as metodologias adotadas neste trabalho. Os seguintes materiais foram utilizados: multímetro *Politem* (POL-41) com eletrodo de sulfato de cobre – CuSO_4 (Figura 3a) e ponta de prova (Figura 3b), fluido de perfuração de base aquosa tendo grandes

concentrações de carbonato de cálcio e cloreto de sódio em sua composição (Figura 3c), *becker* de 500 ml e 600 ml (Figura 3c), água da torneira, água salgada, água com CuSO_4 (Figura 3d), caixas de plástico (Figura 3d), balde de 10 L (Figura 3e), areia (quartzosa) (Figura 4a) e argila (preta e vermelha) (Figura 4b).

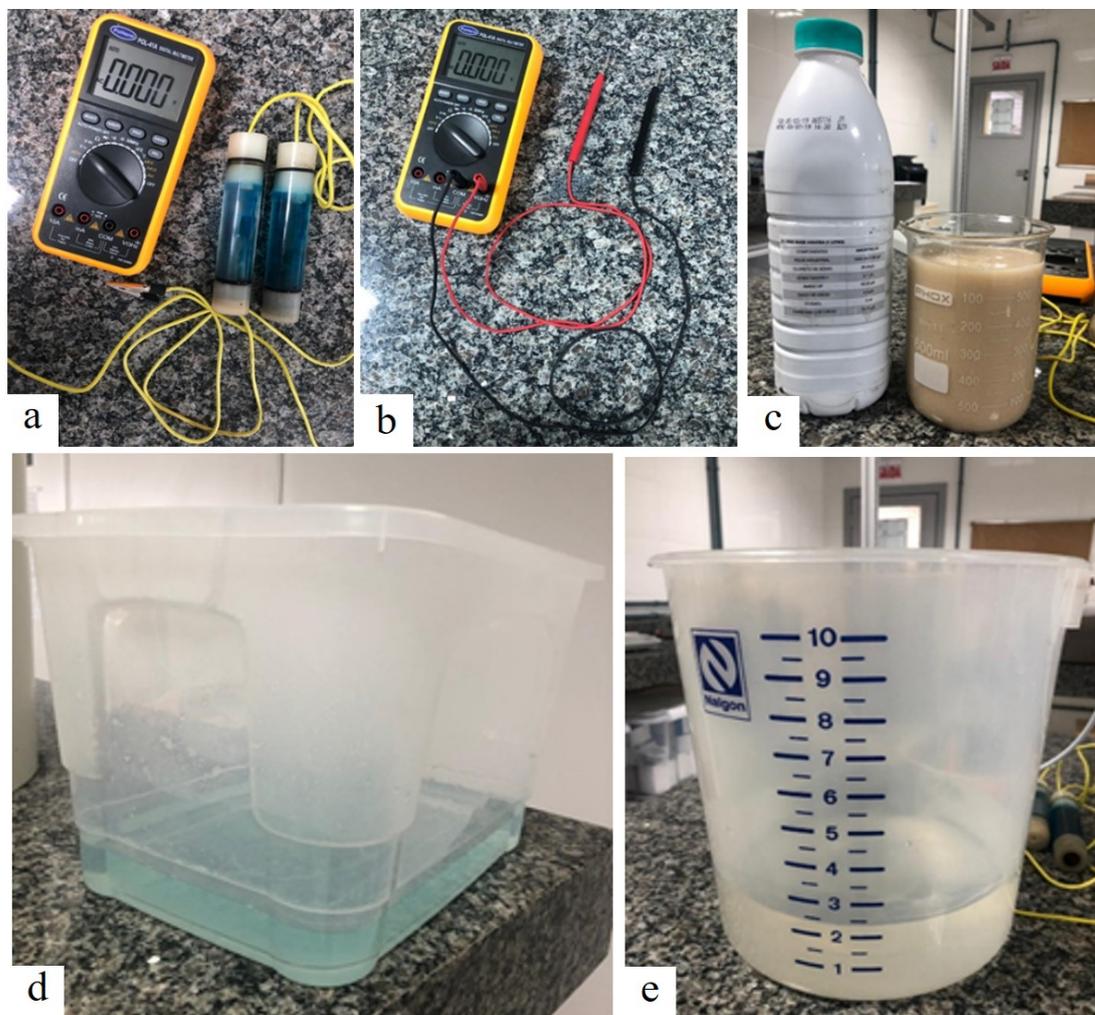


Figura 3 - (a) Multímetro com eletrodos de sulfato de cobre (CuSO_4), (b) multímetro com pontas de prova, (c) *becker* com fluido de perfuração, (d) caixa plástica com água e CuSO_4 e (e) balde de 10 L com água da torneira/ água salgada.

Cálculo das resistividades dos fluidos utilizados e efeito de polarização de eletrodo

É sabido que as resistividades do fluido de perfuração e da água da formação podem influenciar nos valores dos potenciais medidos nas regiões dos arenitos (reservatórios) e folhelhos (geradoras). Sendo assim, é importante controlar os valores das resistividades dos fluidos envolvidos no processo de perfuração em um poço de petróleo, para que os potenciais medidos em um perfil SP sejam interpretados corretamente. A escolha do eletrodo para as medições de potenciais espontâneos também é significativa. Deve-se utilizar um eletrodo pouco

polarizável, pois o efeito de polarização de eletrodo pode se sobrepor aos potenciais espontâneos que se deseja medir. Assim, nesta primeira parte do trabalho, serão testados e comparados dois tipos de eletrodos: um metálico (ponta de prova do multímetro) e o outro de CuSO_4 .

Foram colocados em diferentes recipientes as amostras de água da torneira, de água salgada, de fluido de perfuração e da solução de CuSO_4 (usada no eletrodo). Foram medidos individualmente as resistências e potenciais dos fluidos com a ponta de prova do multímetro e com o eletrodo de CuSO_4 , anotando-se 15 vezes

os seus valores. Em seguida, as dimensões dos recipientes também foram registradas para o posterior cálculo das resistividades dos fluidos utilizando a Lei de Ohm (equação 1). Na equação 1, ρ é resistividade do condutor ($\Omega.m$), R é a resistência elétrica (Ω), L é o comprimento do espécime (m) e A é a área da seção transversal (m^2).

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (1)$$

Simulação do potencial de junção líquida

O potencial de junção líquida foi simulado utilizando uma caixa plástica preenchida com areia, dividida por uma membrana porosa, onde de um lado foi adicionado água salgada para simular a zona virgem, e do outro lado adicionou-se fluido de perfuração para simular a zona lavada (Figura 4a). A membrana de separação foi retirada para o início das medições, os eletrodos de $CuSO_4$ foram introduzidos em cada lado da caixa e 10 medições de potenciais foram feitas. Posteriormente, foi feita a média das 10 medidas de potencial obtidas e a incerteza associada foi calculada. Foram executadas inicialmente

medições de potencial sem a adição da água salgada e do fluido de perfuração (situação 1) e após, medições foram feitas com a adição da água salgada e do fluido (situação 2). O potencial de junção líquida foi verificado baseado nas diferenças entre as medidas de potenciais das situações 1 e 2.

Simulação do potencial de membrana

O efeito de potencial de membrana foi simulado adicionando-se na parte inferior de uma segunda caixa plástica, areia com água salgada (simulando o arenito com a água de formação) e na parte superior uma camada de argila (simulando o folhelho) (Figura 4b). Os eletrodos de $CuSO_4$ foram introduzidos em cada lado da caixa e assim foram medidos 10 vezes os valores do potencial utilizando o multímetro. Na situação 1, os potenciais foram medidos sem a adição do fluido de perfuração sobre a argila; e depois foram anotados 10 novos valores de potenciais com a adição do fluido de perfuração sobre a argila, na parte superior da caixa (situação 2). O efeito de potencial de membrana foi observado tendo como base a comparação entre as medidas médias das situações 1 e 2.

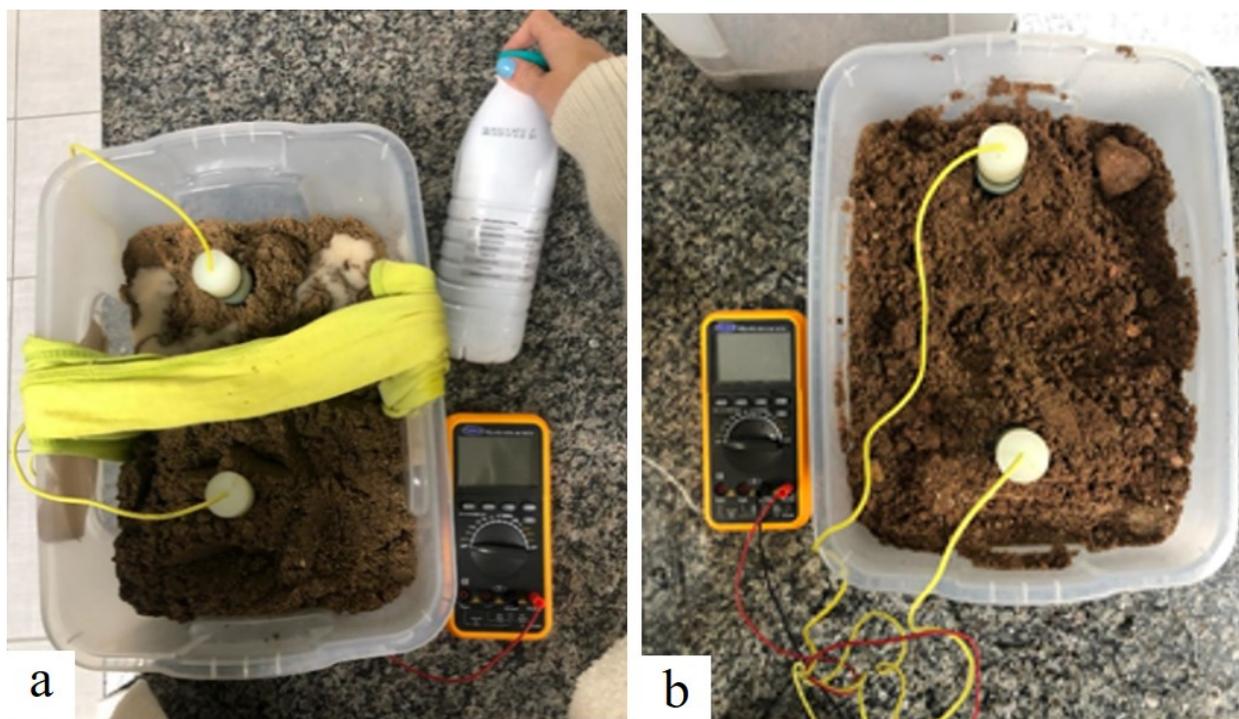


Figura 4 - (a) Caixa com areia e água salgada de um lado e fluido de perfuração do outro com eletrodos de $CuSO_4$ inseridos em ambos os lados da membrana porosa; e (b) caixa com areia e água salgada na parte inferior e argila na parte superior, com eletrodos de $CuSO_4$ inseridos na camada de argila.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resistividades dos fluidos utilizados e efeito de polarização de eletrodo

Nesta primeira parte do trabalho, foram executadas as medidas das resistências dos

fluidos utilizando o multímetro e os seguintes eletrodos: ponta de prova do multímetro e o

eletrodo de CuSO_4 . O objetivo aqui é obter os valores de resistividades dos fluídos utilizados no experimento através da segunda Lei de Ohm (equação 3). O efeito de polarização de eletrodo foi verificado a partir da comparação entre os valores de resistividades obtidos para ambos os eletrodos utilizados.

A tabela 1 mostra as resistividades calculadas para a água (da torneira), para o fluido de perfuração, para a água salgada e para a solução de CuSO_4 .

Em ordem decrescente de resistividades, foram encontrados os seguintes valores utilizando a ponta de prova do multímetro: $(97,89 \pm 16,44) \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ (fluido de perfuração), $(65,59 \pm 3,92) \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ (água da torneira), $(13,00 \pm 2,18) \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ (água salgada), $(9,90 \pm 1,34) \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ (solução de CuSO_4). Já os valores de resistividades em ordem decrescente utilizando os eletrodos de CuSO_4 foram de: $3131,23 \pm 165,39 \Omega \cdot \text{m}$ (água da torneira), $1329,73 \pm 247,71 \Omega \cdot \text{m}$ (fluido de perfuração), $849,55 \pm 34,81 \Omega \cdot \text{m}$ (água salgada) e $337,86 \pm 41,04 \Omega \cdot \text{m}$ (solução de CuSO_4). Comparando os valores obtidos pela ponta de prova do multímetro e pelo eletrodo de CuSO_4 , observam-se discrepâncias. Por exemplo, o fluido mais resistivo segundo a ponta de prova do multímetro (o eletrodo de CuSO_4) é o fluido de perfuração (água da torneira). Além disso, são notadas

grandes diferenças nas ordens de grandezas entre os valores obtidos utilizando a ponta de prova do multímetro e o eletrodo de CuSO_4 . Os valores de resistividades obtidos a partir do eletrodo de CuSO_4 mostram ordens de grandezas mais coerentes com os valores esperados para os fluídos utilizados. Durante o experimento, quando foram efetuadas as 15 medições de resistência para o posterior cálculo das resistividades, observou-se uma maior instabilidade (estabilidade) das medidas com o tempo quando utilizadas(os) as pontas de prova (os eletrodos de CuSO_4). Isso é explicado pelo efeito de polarização de eletrodo.

A ponta de prova do multímetro é feita de um metal sólido (aço inoxidável), sendo assim um bom condutor de eletricidade. Além disso, coloca-se a ponta de prova metálica diretamente em contato com o meio para a execução das medidas, gerando o efeito de polarização de eletrodo. Já o eletrodo de CuSO_4 também consiste de um metal (cobre - Cu) mergulhado em uma solução contendo o próprio metal (CuSO_4). Neste, o contato entre o meio e o eletrodo de Cu não é direto, e sim é utilizado um material poroso (madeira ou cerâmica) embebido na solução de CuSO_4 para que se processe uma passagem lenta e suave das cargas do meio para o interior do eletrodo, reduzindo bastante o efeito de polarização do eletrodo.

Tabela 1- Resistividades dos fluidos utilizados no experimento.

Fluídos	Resistividade ($\Omega \cdot \text{m}$)	
	Ponta de prova	Eletrodo de CuSO_4
Água (torneira)	$(65,59 \pm 3,92) \times 10^4$	$3131,23 \pm 165,39$
Água salgada	$(13,00 \pm 2,18) \times 10^4$	$849,55 \pm 34,81$
Fluido de perfuração	$(97,89 \pm 16,44) \times 10^4$	$1329,73 \pm 247,71$
Solução de CuSO_4	$(9,90 \pm 1,34) \times 10^4$	$337,86 \pm 41,04$

Simulação dos potenciais de junção líquida e de membrana

O efeito de junção líquida foi simulado utilizando uma caixa totalmente preenchida com areia úmida e dividida por uma membrana porosa. O eletrodo de CuSO_4 foi introduzido em ambos os lados da membrana porosa da caixa, a membrana foi retirada e foram anotados 10 valores de potenciais (situação 1). Encontrou-se um valor médio de $0,20 \pm 0,09 \text{ mV}$ para a situação 1. Em uma segunda situação, foi inserida água salgada em um dos lados da membrana porosa e fluido de perfuração do outro

e medidos 10 valores de potencial. O valor médio obtido foi de $-22,65 \pm 0,31 \text{ mV}$.

Essa diferença pode ser explicada porque a água salgada possui NaCl , onde os ânions Cl^- têm maior mobilidade do que os cátions Na^+ , deslocando-se mais rapidamente para a camada de areia com fluido de perfuração devido às diferenças de concentrações entre as duas soluções. Assim, foi gerado um acúmulo de cargas negativas na região do fluido de perfuração (zona lavada), explicando o potencial negativo. Vale lembrar que o valor da resistividade calculada para a água salgada

usando o eletrodo de CuSO_4 foi um valor menor (mais condutiva) que a resistividade calculada para o fluido de perfuração (menos condutivo), sendo então esperado uma deflexão negativa no perfil SP. Assim, a diferença de potencial negativa encontrada entre as situações 1 e 2 é coerente com o efeito de junção líquida.

Em uma segunda caixa, foi colocada areia com água salgada em sua parte inferior e argila em sua parte superior, para simular o efeito de membrana. Na situação 1, ou seja, sem a adição do fluido de perfuração sobre a argila, foi encontrado o valor médio de potencial de $-1,91 \pm 0,10$ mV. Já em uma situação 2, ou seja, com a

adição de fluido de perfuração sobre a argila, foi encontrado um potencial médio de $0,62 \pm 0,12$ mV. Assim, da comparação entre as situações 1 e 2, observa-se uma diferença de potencial positiva, significando que o potencial de membrana foi simulado. A explicação vem da assimetria da estrutura cristalina dos argilominerais, que acumulam cargas negativas em suas superfícies. Assim, os cations Na^+ da água salina presente na camada de areia abaixo são atraídos para cima pela argila quando o fluido de perfuração foi adicionado, resultando na diferença de potencial positiva entre as situações 1 e 2.

CONCLUSÕES

Foram simulados em laboratório os principais potenciais espontâneos observados em perfis SP, ou seja, o potencial de junção líquida e o potencial de membrana. Os resultados encontrados foram coerentes aos potenciais observados em um ambiente de poço de petróleo, onde um potencial negativo (positivo) foi medido no que seria a região das rochas reservatórios (geradoras) equivalente ao potencial de junção líquida (de membrana).

O potencial de junção líquida foi simulado utilizando uma caixa com areia, onde uma membrana porosa separava duas regiões distintas. O objetivo foi simular as zonas virgem e lavada de uma rocha reservatório em um poço de petróleo. Foi observada uma diferença de potencial negativa entre duas situações da simulação: uma sem e outra com a adição de água salgada de um lado da caixa e fluido de perfuração do outro. Este potencial é gerado devido a maior mobilidade dos ânions (íons de Cl^-) em relação aos cátions (íons de Na^+) da solução salina. Este fato equivale ao que acontece nos ambientes dos poços quando a lama

de perfuração adentra as formações originais, gerando um gradiente de concentração entre a zona lavada e a zona virgem e fazendo os íons de maior mobilidade (Cl^-) migrarem da zona virgem para as paredes do poço.

O potencial de membrana, foi simulado utilizando uma caixa preenchida com areia e água salina em sua parte inferior e argila em sua parte superior. Neste caso, a areia com água salgada simula a zona virgem de uma rocha reservatório abaixo da argila, que simula a rocha geradora. A argila é um mineral silicático que possui uma assimetria em sua estrutura cristalina e tende a aglomerar ânions em sua superfície, atraindo os cátions (Na^+) presentes na água salgada. A diferença de potencial entre uma situação 1 (sem adição do fluido de perfuração sobre a argila) e 2 (após a adição de fluido de perfuração sobre a argila) foi positiva. Essa situação é equivalente ao que ocorre no ambiente dos poços na interface do arenito com a água de formação e da rocha geradora, onde potenciais positivos são medidos na região da rocha geradora.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o professor Francisco Germano Martins (francisco.martins@udesc.br), coordenador do Laboratório de Fluidos de Perfuração e Escoamento da Udesc Balneário Camboriú (LABFLU - <https://www.udesc.br/cesfi/laboratorios/fluidos>), pelo fornecimento do fluido de perfuração utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, L.A. & JOHNSON, G.R. Applications of the self-potential method to geothermal exploration in Long Valley, California. *Jour. Geophys. Res.* **81**: 1527-1532, 1976.
- CORRY, C.E. Spontaneous polarization associated with porphyry sulphide mineralization. *Geophysics*, **50**: 1020-1034, 1985.
- CORWIN, R.F. & HOOVER, D.B. The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics*, **44**: 226-245, 1979.
- CORWIN, R.F. & MORRISON, H.F. Self-potentials variations preceding earthquakes in central California. *Geophys. Res. Lett.*, **4**: 171-174, 1977.
- DI MAIO, R. & PATELLA, D. Basic theory of electrokinetic effects associated with earthquakes. *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **33**: 145-154, 1991.

- DIMAIO, R. & PATELLA, D. Self-potential anomaly generation in volcanic areas. *Acta Vulcanologica*, **4**: 119-124, 1994.
- DI MAIO, R., DI SEVO, V., GIAMMETTI, S., PATELLA, D., PISCITELLI, S.; SILENZIARIO, C. Self-potential anomalies in some Italian volcanic areas. *Annali di Geofisica*, **37**: 1137-1148, 1996.
- DOTTI, G. C. Interpretação Quantitativa de Campos de Potencial Espontâneo na Perfilagem Geofísica de Poços. 72p., Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2008.
- GALLAS, J. D. F. O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. **23**, n. 2, p. 133-144, 2005.
- LOGN, O. & BOLVIKEN, B. Self-potentials at the Joma pyrite deposit. *Geoexploration*, **12**: 11-28, 1974.
- MIZUTANI, H., ISHIDO, T., YOKOKURA, T.; OHNISHI, S. Electrokinetic phenomena associated with earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **3**: 365-368, 1976.
- OLGIVY, A.A., AYED, M.A.; BOGOSLOVSKY, V.A. Geophysical studies of water leakages from reservoirs. *Geophys. Prosp.*, **22**: 36-62, 1969.
- SATO, M. & MOONEY, H.M. The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials. *Geophysics*, **25**: 226-249, 1960.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. *Applied Geophysics*, Cambridge Un. Press, Cambridge, 1976.
- WYNN, J.C. & SHERWOOD, S.I. The self-potential (SP) method: an inexpensive reconnaissance and archaeological mapping tool. *Jour. of Field Archaeology*, **11**: 195-204, 1984.

Submetido em 21 de maio de 2020

Aceito para publicação em 3 de setembro de 2021