

Título em Português: Estudo de Rochas Reservatório por Ressonância Magnética Nuclear em Condições de Perfilagem de Poços de Petróleo

Título em Inglês: Study of Reservoir Rocks by Nuclear Magnetic Resonance under Oil Well Profiling Conditions

Autor: Edgar Salgado Silva

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Tito Jose Bonagamba

Área de Pesquisa / SubÁrea: Áreas Clássicas de Fenomenologia e suas Aplicações

Agência Financiadora: Outros

Estudo de Rochas Reservatório por Ressonância Magnética Nuclear em Condições de Perfilagem de Poços de Petróleo

Edgar Salgado Silva; Agide Gimenez Marassi; Tito José Bonagamba

Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo - IFSC/USP

edgars.silva@usp.br

Objetivos

A técnica de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) se mostra muito relevante na área da ciência e engenharia de petróleo, principalmente na avaliação da produtividade de poços de petróleo ao determinar parâmetros como: porosidade, distribuição de tamanho de poros, permeabilidade, fluido livre e fluido irreduzível. Em geral, a aquisição de dados de poço pode ser feita via um procedimento chamado *Logging-While-Drilling* (LWD), cuja medida é feita durante o processo de perfuração, o que resulta em uma série de complicações ao sinal de RMN. A presente pesquisa tem por objetivo simular condições LWD, limitado a um movimento harmônico simples, e avaliar seus impactos nas medidas de RMN.

Métodos e Procedimentos

Os experimentos foram realizados com o emprego de um magneto unilateral (ou *Single-Sided* - cuja vantagem é o fato dele apresentar uma configuração aberta, o que, na prática, não limita o tamanho da amostra a ser estudada). O aparato experimental também conta com uma bobina de radiofrequência blindada do tipo solenoide e um sistema mecânico dedicado movimentar a amostra ao longo da aquisição dos dados de RMN. Foi utilizada a sequência de pulsos denominada *Carr-Purcell-Meiboom-Gill* (CPMG) [1] com os seguintes parâmetros: duração dos pulsos de 90° e 180° de $10\ \mu\text{s}$ e $20\ \mu\text{s}$, respectivamente, tempo ao eco de $400\ \mu\text{s}$, 12000 ecos, tempo de repetição de 2 s, e 512 médias. Os parâmetros relevantes do magneto são: campo médio de 470 Gauss (G) na região do *Sweet-Spot* (esfera com 5 cm de diâmetro, disposta à 11 cm da superfície do magneto),

com um gradiente constante de 33 G/cm nessa região, ao longo do eixo vertical [2].

Assim, o simulador LWD se restringe a um movimento oscilante simples da amostra em relação ao campo magnético aplicado (Figura 1), sendo essas oscilações controladas por amplitude e frequência. Após a coleta dos sinais de RMN, os dados foram processados externamente com auxílio do software *MatLab* e da Transformada Inversa de Laplace (ILT), uma ferramenta capaz de fornecer a distribuição dos tempos de relaxação (T_2) que compõem um determinado sinal.

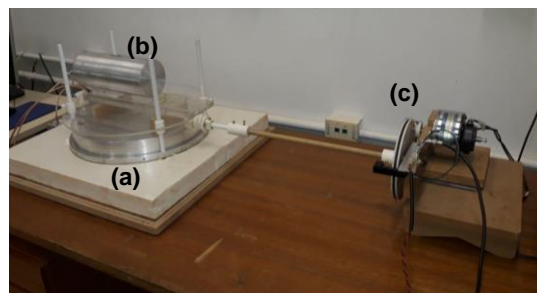


Figura 1: (a) Magneto unilateral; (b) bobina blindada tipo solenoide; (c) sistema mecânico para oscilação de amostra.

Resultados

Os decaimentos CPMG da rocha arenítica Berea saturada com água são apresentados na Figura 2. Esses dados correspondem a um experimento assíncrono (início da aquisição de dados é aleatório) executado com uma frequência fixa de 4 Hz. Pela Figura 2, fica evidente que, apesar de todos os sinais corresponderem a mesma amostra, uma interpretação diferente pode ser tomada e, apesar do que é proposto por Coman [3], mesmo um movimento senoidal simples representa um decaimento que não pode ser

associado com uma função oscilante simples do tipo seno ou cosseno. Outro fato interessante é que grande parte do sinal já é perdida antes do primeiro ciclo de oscilação, o que se deve ao aspecto da seletividade, isto é, a combinação de pulsos de radiofrequência na presença de gradientes de campos magnéticos, o que limita, de certa forma, a quantidade de sinal que pode ser gerado.

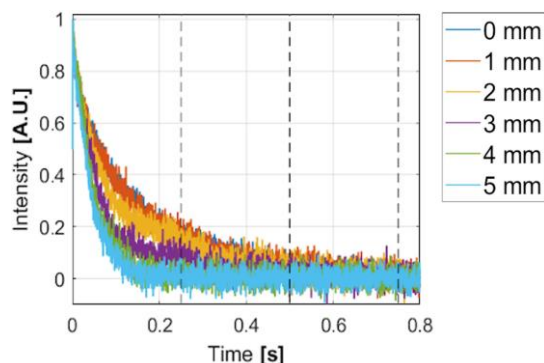


Figura 2: Sinal CPMG de uma rocha Berea.

A Figura 3 mostra a distribuição dos tempos de relaxação transversal (T_2) dos decaimentos CPMG da Figura 2 acima. Podemos observar que para o caso da medida estática (sem oscilação), a amostra apresenta dois tempos de relaxação, que podem ser associados a dois tamanhos de poros distintos, sendo o pico de maior intensidade denominado de pico principal. Ainda, podemos notar que existe uma dependência das intensidades dos picos com relação a amplitude do movimento, havendo uma alteração de pico principal para altas amplitudes. Esse fato está intimamente relacionado com o fenômeno da seletividade, uma vez que a fatia selecionada se move mais rápido para regiões menos sensíveis e efetivas para os pulsos de inversão, resultado em uma perda de sinal mais acentuada à medida que se aumenta a amplitude do movimento.

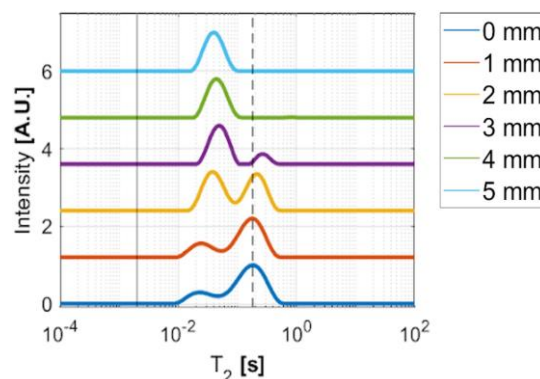


Figura 3: Distribuição de tempos de relaxação transversal de uma rocha Berea.

Conclusões

As complicações associadas ao procedimento LWD foram simuladas e validadas com dados reais, e mostram que há uma contribuição considerável da perda de sinal no início da medida de RMN devido à seletividade, que está ligada com a amplitude do movimento, se mostrando um fator determinante para a distribuição dos tempos de relaxação observados. Com os estudos realizados, torna-se possível obter as informações necessárias para analisar a rocha reservatório por RMN, separadamente dos efeitos operacionais causados pela movimentação da ferramenta de perfuração, auxiliando a Indústria do Petróleo a melhor interpretar os dados obtidos em situação de LWD.

Referências Bibliográficas

- [1] Meiboom, S.; Gill, D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times. *Review of Scientific Instruments*, v. 29, n. 8, p. 688-691, 1958.
- [2] Oliveira-Silva, R., Lucas-Oliveira, E. Araújo-Ferreira, A. G., Trevizan, W. A., Vidoto, E. L. G., Sakellariou, D., Bonagamba, T. J. A benchtop single-sided magnet with NMR well-logging tool specifications - examples of application. *Journal of Magnetic Resonance*, 322 (2021) 106871.
- [3] Coman, R., Thern, H., Kischkat, T., Hughes, B. Lateral-motion correction of NMR logging-while-drilling data. *SPWLA 59th Annual Logging Symposium*, London, UK, June 2018.

Study of Reservoir Rocks by Nuclear Magnetic Resonance under Oil Well Profiling Conditions

Edgar Salgado Silva; Agide Gimenez Marassi; Tito José Bonagamba

São Carlos Institute of Physics – University of São Paulo - IFSC/USP

edgars.silva@usp.br

Objectives

The Nuclear Magnetic Resonance (NMR) technique is very relevant in petroleum science and engineering, mainly in the evaluation of the productivity of oil wells by determining parameters such as: porosity, pore size distribution, permeability, free and irreducible fluids. In general, the acquisition of well data can be done by a so-called procedure Logging-While-Drilling (LWD), whose measurement is made during the drilling process, which results in a series of complications to the NMR signal. The present research aims to simulate LWD conditions, limited to a simple harmonic motion, and to evaluate their impacts on NMR measurements.

Materials and Methods

The experiments were carried out using a unilateral magnet (or Single-Sided - whose advantage is the fact that it has an open configuration, which, in practice, does not limit the size of the sample to be studied). The experimental apparatus also has a shielded radiofrequency coil of the solenoid type and a dedicated mechanical system to move the sample during the acquisition of the NMR data. The pulse sequence called Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) [1] was used with the following parameters: duration of 90° and 180° pulses of 10 μ s and 20 μ s, respectively, echo time of 400 μ s, 12000 echoes, repetition time of 2 s, and 512 averages. The relevant parameters of the magnet are: mean field of 470 Gauss (G) in the Sweet-Spot region (sphere with 5 cm in diameter, arranged at 11 cm from the surface of the magnet) with a constant gradient of 33 G/cm in this region, along the vertical axis [2].

Thus, the LWD simulator is restricted to a simple oscillating movement of the sample in relation to the applied magnetic field (Figure 1), these oscillations being controlled by amplitude and frequency. After collecting the NMR signals, the data were processed externally using the MatLab software and the Inverse Laplace Transform (ILT), a tool capable of providing the distribution of relaxation times (T_2) that make up a given signal.

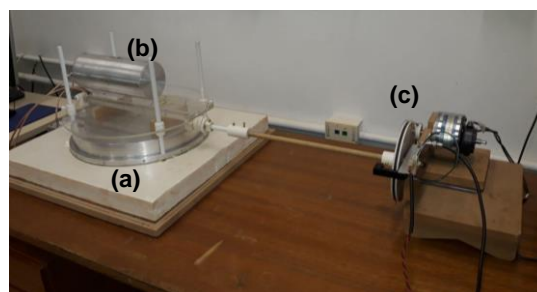


Figure 1: (a) Unilateral magnet; (b) solenoid-type shielded coil; (c) mechanical oscillation system.

Results

The CPMG decays of the water-saturated Berea sandstone rock are shown in Figure 2. These data correspond to an asynchronous experiment (random start of data acquisition) performed with a fixed frequency of 4 Hz. From Figure 2, it is evident that, despite all signals corresponding to the same sample, a different interpretation can be taken and, despite what is proposed by Coman [3], even a simple sinusoidal motion represents a decay that cannot be associated with a simple oscillating function of the sine or cosine type. Another interesting fact is that a large part of the signal is already lost before the first cycle of oscillation, which is due to the

aspect of selectivity, that is, the combination of radiofrequency pulses in the presence of gradients of magnetic fields, which somewhat limits the amount of signal that can be generated.

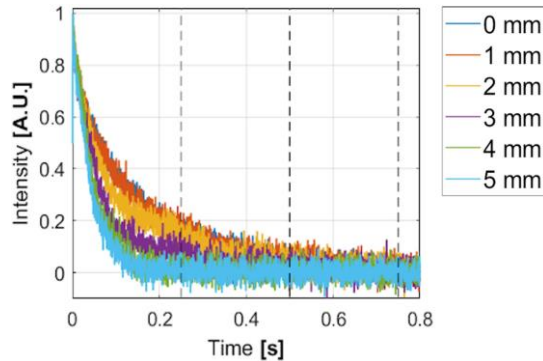


Figure 2: CPMG signal from a Berea rock.

Figure 3 shows the distribution of transverse relaxation times (T_2) of the CPMG decays of Figure 2 above. We can observe that for the case of the static measurement (without oscillation), the sample presents two relaxation times, which can be associated with two distinct pore sizes, with the peak of greater intensity being called the main peak. Still, we can notice that there is a dependence of the peak intensities in relation to the amplitude of the movement, with a change from the main peak to high amplitudes. This fact is closely related to the phenomenon of selectivity, since the selected slice moves faster to regions that are less sensitive and effective for inversion pulses, resulting in a more accentuated loss of signal as the amplitude of movement increases.

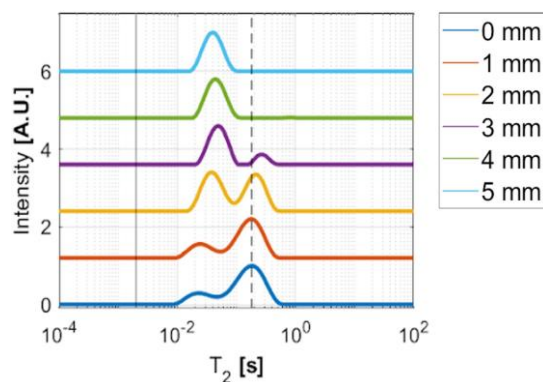


Figure 3: Transverse relaxation times distribution of a Berea rock.

Conclusions

Complications associated with the LWD procedure were simulated and validated with real data, and show that there is a considerable contribution of signal loss at the beginning of the NMR measurement due to selectivity, which is linked to the amplitude of motion, proving to be a determining factor for the distribution of observed relaxation times. With the studies carried out, it becomes possible to obtain the necessary information to analyze the reservoir rock by NMR, separately from the operational effects caused by the movement of the logging tool, helping the Oil Industry to better interpret the data obtained in a LWD situation.

References

- [1] Meiboom, S.; Gill, D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times. *Review of Scientific Instruments*, v .29, n. 8, p. 688-691, 1958.
- [2] Oliveira-Silva, R., Lucas-Oliveira, E. Araújo-Ferreira, A. G., Trevizan, W. A., Vidoto, E. L. G., Sakellariou, D., Bonagamba, T. J. A benchtop single-sided magnet with NMR well-logging tool specifications - examples of application. *Journal of Magnetic Resonance*, 322 (2021) 106871.
- [3] Coman, R., Thern, H., Kischkat, T., Hughes, B. Lateral-motion correction of NMR logging-while-drilling data. *SPWLA 59th Annual Logging Symposium*, London, UK, June 2018.