

Caracterização de meios porosos por RMN em baixo campo - princípios básicos

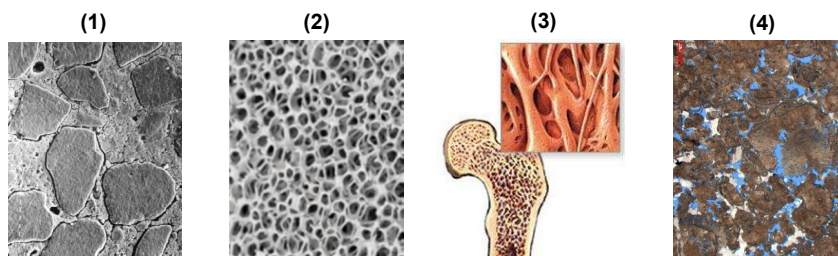
Rodrigo B. de V. Azeredo
Instituto de Química - UFF
rbagueira@vm.uff.br

Introdução

2

O conhecimento da estrutura interna de materiais porosos é de enorme importância em diversas áreas, tais como ciência dos materiais, engenharia química, medicina e petróleo.

Nesse sentido, existe uma busca contínua por métodos de caracterização de materiais porosos como concretos,¹ cerâmicas,² ossos,¹ rochas,⁴ entre outros.



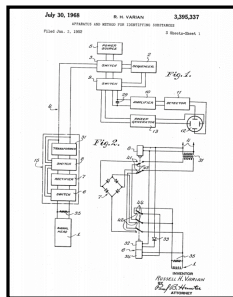
(1) www.icp.uni-stuttgart.de; (2) www.filtsep.com; (3) www.science.nasa.gov; (4) www.lar.uff.br

Introdução

Apesar da enorme popularidade na Física, Química, Bioquímica, Medicina, a primeira proposta do uso comercial do fenômeno da RMN foi na área de Geociências.

Russel Varian, *Apparatus and method for identifying substances*, US3395337A (depósito 1952).

(1)



(2)



Russell Varian (1898 - 1959)

(1) VARIAN R.H. US Pat. 3395337A, 3 Jan 1952, 8p; (2) https://en.wikipedia.org/wiki/Russell_and_Sigurd_Varian

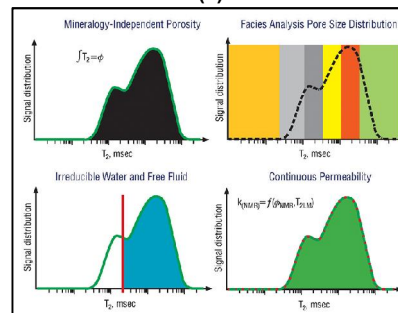
Introdução

A RMN pode fornecer estimativas de porosidade, distribuição de tamanho de poros, permeabilidade, saturação irreduzível, entre outras propriedades petrofísicas.

(1)



(2)



(1) <http://accutech.metadot.com/index.pl?r=1> (2) www.spe.org/jpt/article/10327-technology-update-24

5

Ementa

O objetivo dessa aula é apresentar os princípios básicos da aplicação da RMN de baixo campo na caracterização de meios porosos, com enfoque em rochas-reservatórios, divididos da seguinte forma:

- Relaxação em meios porosos
- Preparação de amostras
- Técnicas de medição e processamento de dados
- Propriedades petrofísicas: porosidade, permeabilidade e saturação irreduzível de fluidos
- Estimativa da relaxatividade superficial

6

Relaxação em meios porosos

Segundo a abordagem clássica a dinâmica da magnetização transversal M_{xy} de um fluido pode ser descrita da pela equação de Bloch modificada:¹

$$\frac{\partial M_{xy}(t)}{\partial t} = D \nabla^2 M_{xy}(t) - \frac{M_{xy}(t)}{T_2} - i\gamma \Delta B_z M_{xy}(t)$$

na qual, D é a constante de difusão; T_2^{-1} é a taxa de relaxação longitudinal, γ é a constante magnetogírica; ΔB_z é a heterogeneidade do campo magnético.

Quando esse fluido encontra-se encerrado nos poros de um material qualquer, a taxa de relaxação efetiva resulta da combinação de três mecanismos de relaxação: bulk, difusivo e superficial.

(1) TORREY, H.C. Physical Review. v.104, p.563 - 564, 1956.

Relaxação em meios porosos

Relaxação *bulk* - relaxação característica do fluido livre.

Relaxação difusiva - relaxação associada a dinâmica molecular na presença de gradientes de campo.

Relaxação superficial - relaxação induzida pela interação entre o fluido e a superfície.

Os três mecanismos atuam de forma simultânea e independente:¹

$$\left(\frac{1}{T_2}\right) = \left(\frac{1}{T_2}\right)_{bulk} + \left(\frac{1}{T_2}\right)_{dif.} + \left(\frac{1}{T_2}\right)_{superf.}$$

Exceto pelo mecanismo difusivo, exclusivo da relaxação transversal, os mesmos mecanismos contribuem para a relaxação longitudinal.

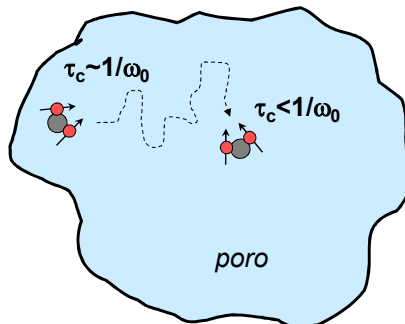
$$\left(\frac{1}{T_1}\right) = \left(\frac{1}{T_1}\right)_{bulk} + \left(\frac{1}{T_1}\right)_{superf.}$$

(1) COATES, G.R.; XIAO, L.Z.; PRAMMER, M.G. NMR. Logging Principles and Applications. Houston: Halliburton Energy Services, 1999.

Relaxação em meios porosos

Relaxação superficial:

- (i) interação dipolar homonuclear
- (ii) relaxação cruzada
- (iii) íons paramagnéticos
- (iv) elétrons livres

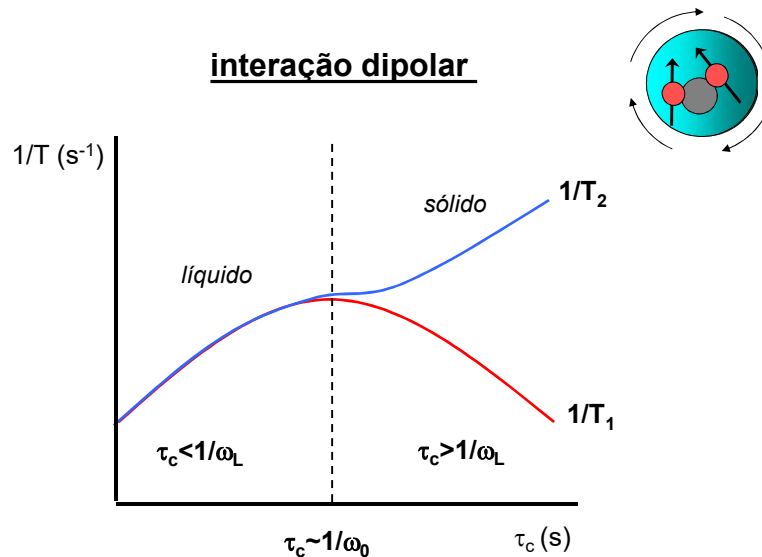


Em moléculas pequenas as taxas de relaxação *bulk* são baixas devido sua alta mobilidade. A interação com a parede aumenta a taxa de relaxação restringindo a dinâmica molecular.

(1) KLEINBERG, R.L. Nuclear magnetic resonance, In: Wong, P.-Z. (ed.), Methods in the Physics of Porous Media. San Diego: Academic Press, 1999, p.337-385.

Relaxação em meios porosos

9

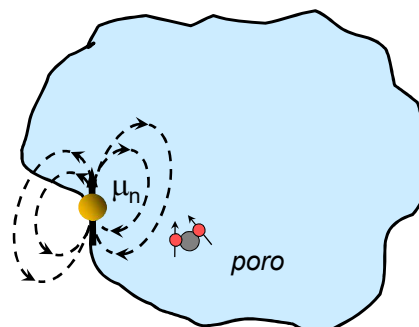


Relaxação em meios porosos

10

Relaxação superficial:¹

- (i) interação dipolar homonuclear
- (ii) **relaxação cruzada**
- (iii) íons paramagnéticos
- (iv) elétrons livres



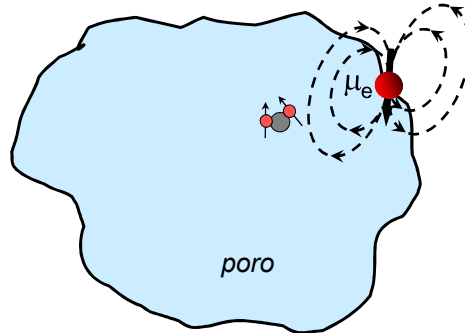
Spins nucleares de moléculas localizadas da matriz sólida, situadas na parede do poro, induzem a relaxação nas moléculas dos fluidos através de mecanismos de interação dipolar homonuclear.

(1) KLEINBERG, R.L. Nuclear magnetic resonance, In: Wong, P.-Z. (ed.), Methods in the Physics of Porous Media. San Diego: Academic Press, 1999, p.337-385.

Relaxação em meios porosos

Relaxação superficial:¹

- (i) interação dipolar homonuclear
- (ii) relaxação cruzada
- (iii) **íons paramagnéticos**
- (iv) elétrons livres



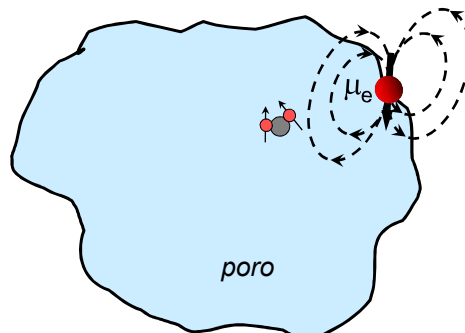
A interação com íons paramagnéticos (Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , etc.) é o principal mecanismo em material geológico. Lembrando que, o momento magnético eletrônico é 10^3 vezes maior do que o nuclear.

(1) KLEINBERG, R.L. Nuclear magnetic resonance, In: Wong, P.-Z. (ed.), Methods in the Physics of Porous Media. San Diego: Academic Press, 1999, p.337-385.

Relaxação em meios porosos

Relaxação superficial:¹

- (i) interação dipolar homonuclear
- (ii) relaxação cruzada
- (iii) íons paramagnéticos
- (iv) **elétrons livres**



Mecanismo de relaxação paramagnética que não depende de íons paramagnéticos, mas de defeitos cristalográficos, lacunas geradas pela perda de um átomo, ocupados por elétrons desemparelhados.

(1) KLEINBERG, R.L. Nuclear magnetic resonance, In: Wong, P.-Z. (ed.), Methods in the Physics of Porous Media. San Diego: Academic Press, 1999, p.337-385.

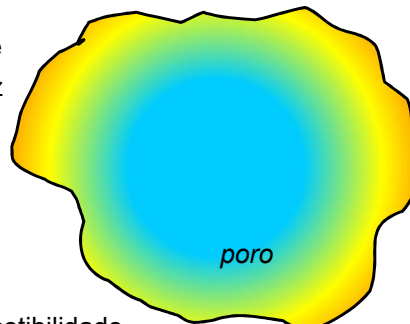
Relaxação em meios porosos

Relaxação difusiva:¹

A diferença de suscetibilidade magnética entre o fluido e a matriz porosa gera um gradiente interno G :

$$G = \frac{B_0 \Delta\chi_m}{R}$$

$\Delta\chi_m$ é a diferença entre suscetibilidade magnética; R tamanho característico de poro.



(1) KLEINBERG, R.L. Nuclear magnetic resonance, In: Wong, P.-Z. (ed.), Methods in the Physics of Porous Media. San Diego: Academic Press, 1999, p.337-385.

Relaxação em meios porosos

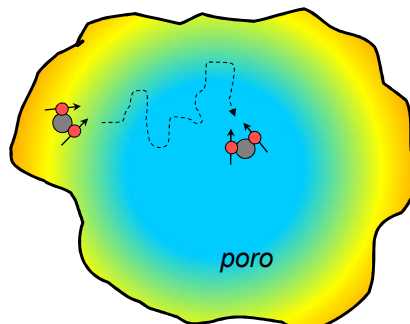
Relaxação difusiva:¹

A perda de coerência dos spins durante a difusão ao longo do gradiente aumenta a taxa de relaxação:

$$\left(\frac{1}{T_2}\right)_{dif.} = \left(\frac{\gamma^2 G^2 D \tau}{3}\right)$$

O efeito da relaxação difusiva é minimizado encurtando o tempo ao eco (200 μ s) e utilizando campos magnéticos baixos (ex. 460 Gauss, $\nu_L \sim 2$ MHz para o ^1H).

Lembrando que, a relaxação difusiva não atua sobre T_1 !!!



Relaxação em meios porosos

A relaxação relaxação superficial pode ser dividida em três regimes principais de acordo com o parâmetro de controle k :¹

$$k = \left(\frac{V}{S}\right) \frac{\rho_2}{D}$$

V é volume do poro; S é a área do poro; ρ_2 é a **relaxatividade superficial** (parâmetro associado à força da interação superficial).

difusão rápida: $k \ll 1$, as moléculas do fluido interagem diversas vezes com a parede antes de relaxar completamente.

difusão lenta: $k \gg 10$, as moléculas do fluido são incapazes de sondar todo o espaço poroso antes de relaxar completamente, devido ao tamanho do poro ou relaxatividade alta.

regime intermediário: $1 < k < 10$.

(1) BROWNSTEIN, K.R. and TARR, C.E. Physical Review. A19, 2446—2453(1979).

Relaxação em meios porosos

No regime de **difusão rápida** (ou limitada pela superfície) a relaxação superficial do fluido ocupando um único poro pode ser aproximada por uma exponencial simples:

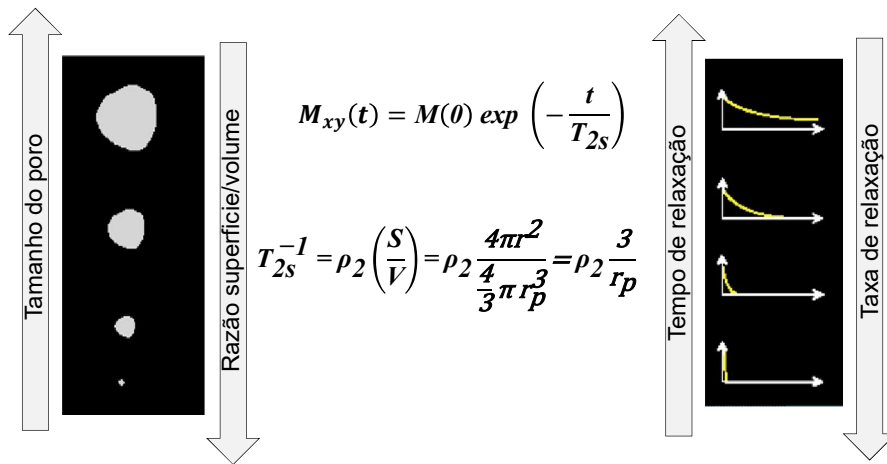
$$M_{xy}(t) = M(0) \exp\left(-\frac{t}{T_{2s}}\right)$$

$M(0)$ é proporcional ao número de moléculas de fluido no poro, e a taxa de relaxação depende da razão superfície/volume:

$$T_{2s}^{-1} = \rho_2 \left(\frac{S}{V}\right)$$

Relaxação em meios porosos

No regime de **difusão rápida**:



Relaxação em meios porosos

Atenção! Existe um limite de tamanho de poro para a caracterização por RMN.

A distância percorrida pela molécula, em função do movimento Browniano:

$$\langle x^2 \rangle = 6Dt$$

$\langle x^2 \rangle$ é o deslocamento quadrático médio.

Logo, considerando $D = 2,0 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$, em um segundo, duração típica da medida de RMN, a molécula de água pode difundir $110 \mu\text{m}$.

Relaxação em meios porosos

No regime de **difusão lenta** (ou limitado pela difusão), a relaxação do fluido varia de acordo com distância da parede, podendo ser descrita como uma combinação de modos de relaxação:

$$M_{xy}(t) = M(0) \sum_{k=0}^{\infty} f_k \exp\left(-\frac{t}{T_{2k}}\right)$$

f_k é a amplitude das exponenciais.

O modo de relaxação de ordem zero predomina sobre os demais:

$$T_{2s0}^{-1} = \frac{\alpha D}{a^2}$$

α é uma constante que depende da geometria do poro e a é a distância da parede. Logo, no regime de **difusão lenta**, a associação entre tempo de relaxação e **tamanho de poro** fica **comprometida!!!**

Relaxação em meios porosos

Os materiais porosos naturais (rochas, ossos, solos, etc.) são constituídos por um arranjo de poros de diferentes tamanhos.

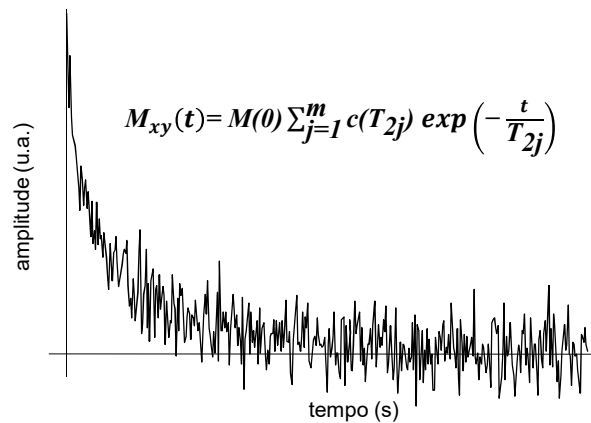
Logo, no regime de **difusão rápida**, o processo de relaxação dos fluido encerrados nos poros de um material natural pode ser aproximado por uma série de exponenciais:

$$M_{xy}(t_i) = M(0) \sum_{j=1}^m c(T_{2j}) \exp\left(-\frac{t_i}{T_{2j}}\right)$$

m é o número de exponenciais; e $c(T_{2j})$ é o vetor das amplitudes.

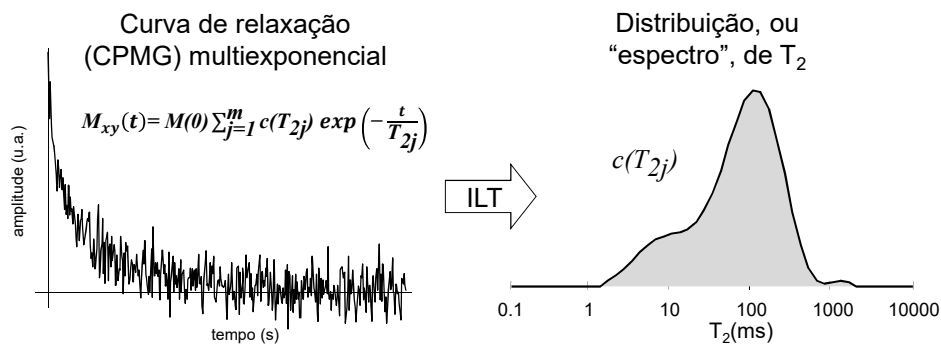
Relaxação em meios porosos

A interpretação direta do decaimento multiexponencial ruidoso do sinal de RMN é inviável.



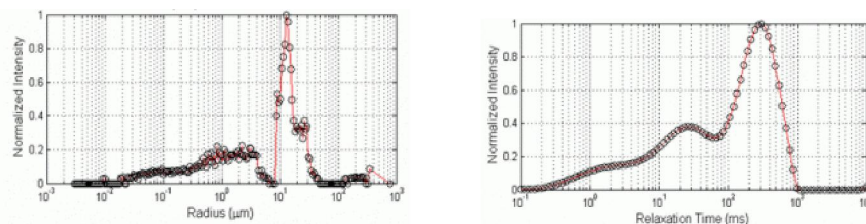
Relaxação em meios porosos

Na prática, utiliza-se o espectro de relaxação obtido através da transformada inversa de Laplace (ILT).



Relaxação em meios porosos

Em condições ideais, o espectro de relaxação é um espelho da distribuição de tamanho de poros



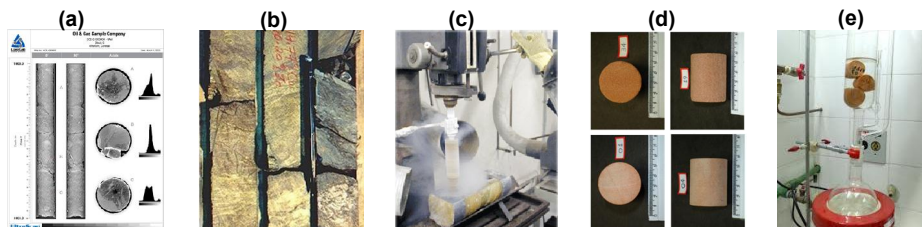
A figura acima mostra a distribuição de tamanho de poros de uma amostra de rocha obtida através da técnica de porosimetria por injeção de mercúrio (esquerda) e o espectro de relaxação T_2 equivalente (direita).¹

(1) Cortesia: Dr. Andre Souza (Schlumberger Brazil Research Center).

Preparação de amostras

Amostragem:

- 1) imageamento do testemunho através tomografia por raios-X para identificação de anomalias e injúrias
- 2) descrição do testemunho e definição dos pontos de plugagem
- 3) retirada de subvolumes, amostras cilíndricas de 1,5 ou 1,0 polegadas
- 4) identificação e registro fotográfico
- 5) limpeza para remoção dos fluidos nativos e secagem

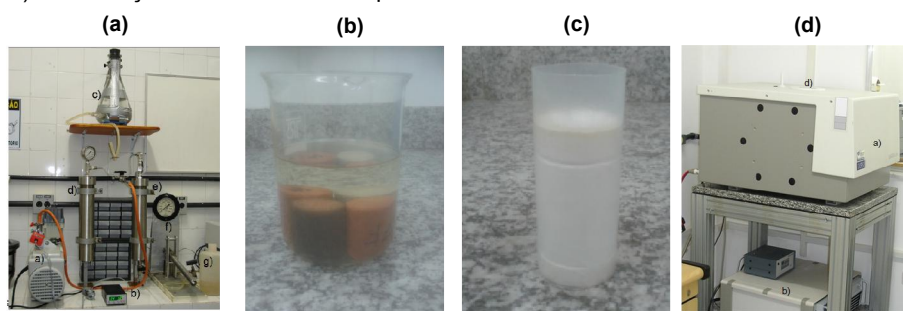


(a,c) www.corelab.com; (b) www.cartage.org.lb; (d,e) www.lar.uff.br

Preparação de amostras

Preparação da amostra para o ensaio de RMN

- 1) saturação da amostra com solução salina com vácuo seguido de pressão (2.000psi por 12 horas) até o índice de saturação >95%
- 2) preservação da amostra submersa na solução salina até a realização do ensaio
- 3) acondicionamento do plugue em porta amostras especial (ou envolta em filme polimérico invisível a RMN) vedado para evitar a perda de fluidos
- 4) climatização da amostra na temperatura do ensaio



Técnicas de medição

Analizadores de rocha por RMN do UFF-LAR:

Maran Ultra 2MHz (Oxford)



GeoSpec-2 2MHz (Oxford)

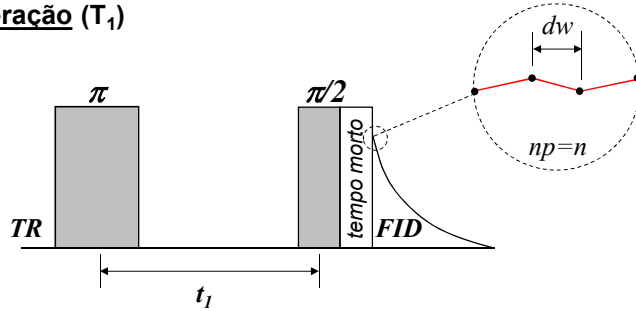


SLK-PM-2000 (Spinlock) 7MHz



Técnicas de medição

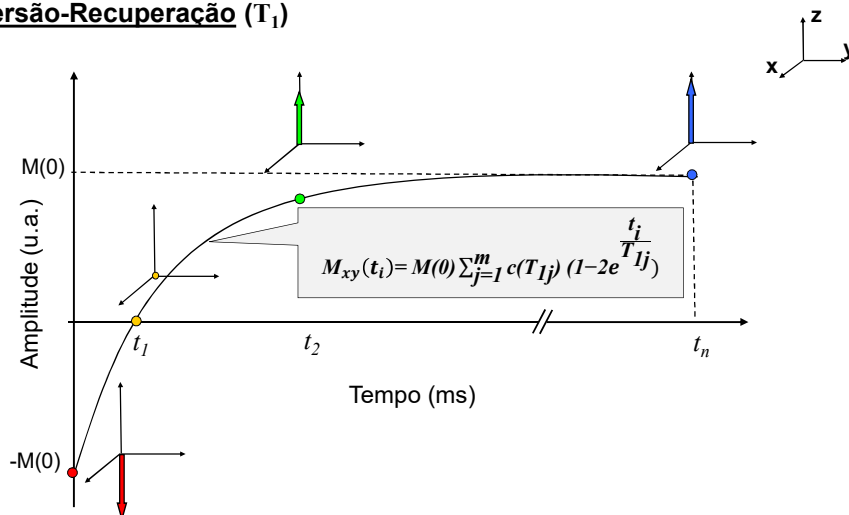
Inversão-Recuperação (T_1)



- TR - tempo de repetição ($5T_{1b}$)
- π - pulso de inversão
- t_1 - tempo de evolução (0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,5ms ... 1; 5; 10; 15s)
- $\pi/2$ - pulso de leitura
- np - número de pontos
- dw (*dwell time*) - tempo de amostragem

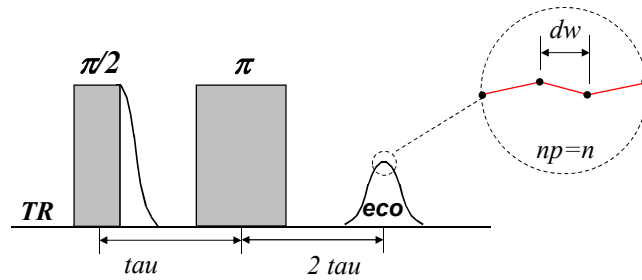
Técnicas de medição e processamento

Inversão-Recuperação (T_1)



Técnicas de medição

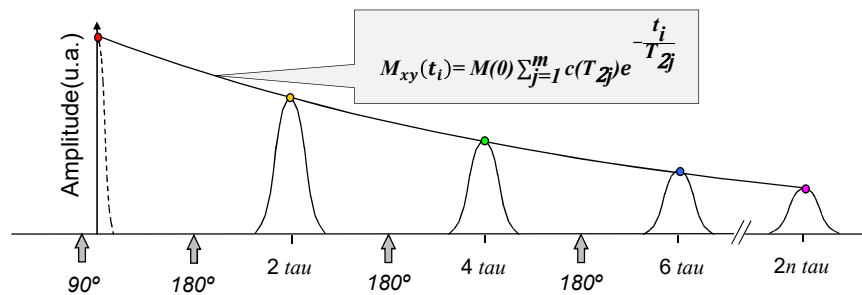
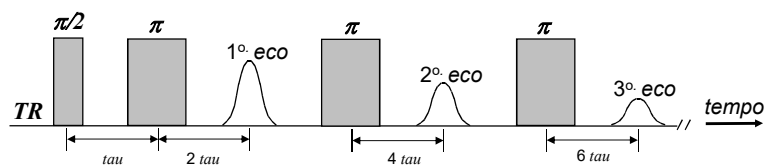
Eco de spin



- TR - tempo de repetição ($5T_1$)
- $\pi/2$ - pulso de leitura
- τ - tempo ao eco
- π - pulso de refocalização
- np - número de pontos
- dw (dwell time) - tempo de amostragem

Técnicas de medição

CPMG – Carr-Purcell-Meiboom-Gill (T_2)



Técnicas de processamento

Obtenção do espectro de relaxação $c(T_{2j})$ através da ILT:

O sinal de RMN pode ser descrito pela função multiexponencial:

$$f(t_i) = \sum_{j=1}^m c_j e^{-\frac{t_i}{T_{2j}}} \quad i=1, \dots, n$$

Minimizar a norma:

$$\|f - Ac\|$$

Escrevendo na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} f(t_1) \\ f(t_2) \\ \vdots \\ f(t_n) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} e^{-\frac{t_1}{T_{2,1}}} & e^{-\frac{t_1}{T_{2,2}}} & \dots & e^{-\frac{t_1}{T_{2,m}}} \\ e^{-\frac{t_2}{T_{2,1}}} & e^{-\frac{t_2}{T_{2,2}}} & \dots & e^{-\frac{t_2}{T_{2,m}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-\frac{t_n}{T_{2,1}}} & e^{-\frac{t_n}{T_{2,2}}} & \dots & e^{-\frac{t_n}{T_{2,m}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix} = 0$$

Técnicas de processamento

Método dos mínimos quadrados:

$$\|f - Ac\|^2 = (f - Ac)^t (f - Ac) = (f^t - c^t A^t) (f - Ac)$$

$$= f^t f - f^t A c - c^t A^t f + c^t A^t A c = f^t f - 2c^t A^t f + c^t A^t A c$$

Diferenciando em relação a c :

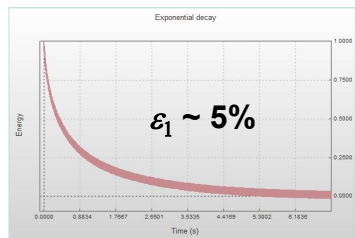
$$A^t A c - A^t f = 0$$

A resolução do sistema sistema linear é um problema mal posto pois falha em atender uma das condições: (i) existência de solução; (ii) unicidade da solução e; (iii) pouco dependente de erros experimentais.

Técnicas de processamento

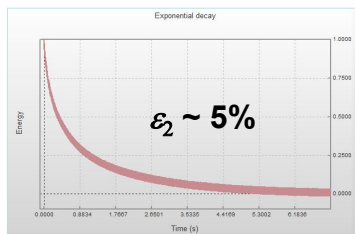
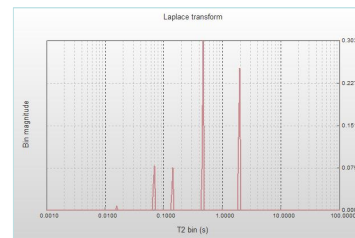
33

Dado sintético $f + \varepsilon$

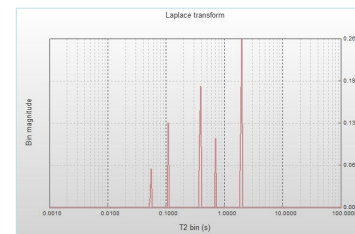


ILT

Dependência do ruído



ILT



Técnicas de processamento

34

Utilização de um regularizador para estabilizar a solução. Resolução usando mínimos quadrados associando o regularizador de Tikhonov:

$$\|f - Ac\|^2 + \lambda^2 \|c\|^2 = f^t f - 2c^t A^t f + c^t A^t A c + \lambda^2 c^t c$$

Diferenciando em relação com c :

$$A^t A c + \lambda^2 c - A^t f = 0$$

$$A^t A + (\lambda I)^t (\lambda I) c - A^t f = 0$$

$$(A^t \quad \lambda I^t) \begin{pmatrix} A \\ \lambda I \end{pmatrix} c - (A^t \quad \lambda I^t) \begin{pmatrix} f \\ 0 \end{pmatrix} = 0$$

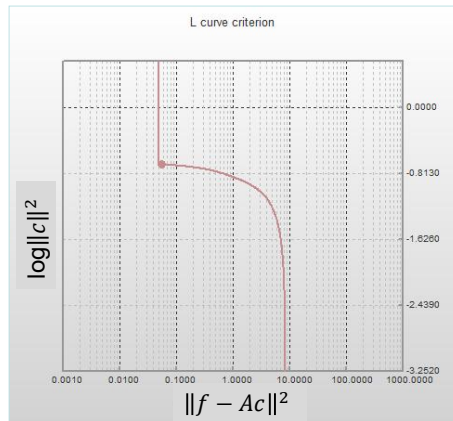
$$\text{assumindo } A_\lambda = \begin{pmatrix} A \\ \lambda I \end{pmatrix}$$

Resolver o sistema para diversos valores de λ :

$$A_\lambda^t A_\lambda c - A_\lambda^t \begin{pmatrix} f \\ 0 \end{pmatrix} = 0$$

Técnicas de processamento

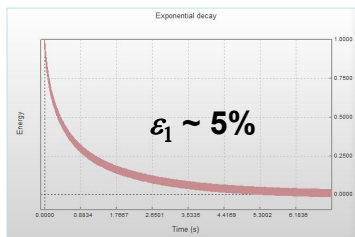
Critério de escolha do regularizador: curva L



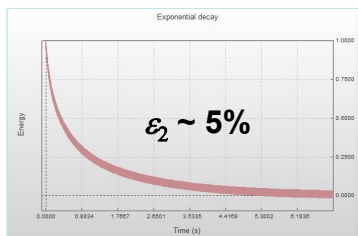
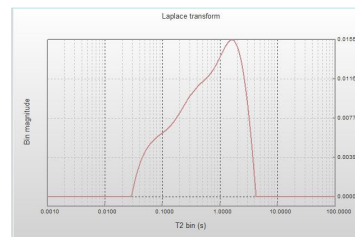
(1) HANSEN, P.C. and O'LEARY, D.P. The Use of the L-Curve in the Regularization of Discrete Ill-Posed Problems. *Siam Journal on Scientific Computing*. v.14, p.1487-1503. 1993.

Técnicas de processamento

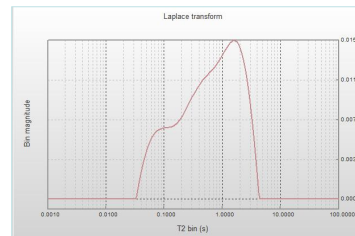
Dado sintético $f + \varepsilon$



ILT



ILT



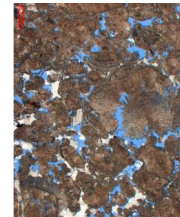
Propriedades petrofísicas - porosidade

37

Porosidade (ϕ) - porosidade é a fração do volume da rocha constituída pelos poros



lâmina petrográfica



matriz - fração sólida (minerais)

poros - espaços vazios

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_p}{V_p + V_s}$$

V_p = volume poroso

V_t = volume total

V_g ou V_s = volume de sólidos

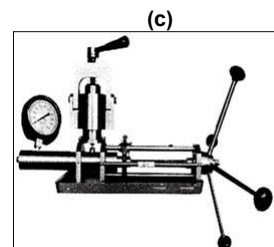
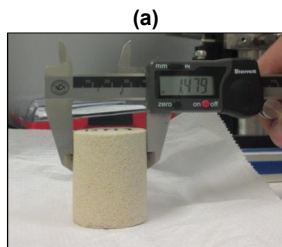
Propriedades petrofísicas - porosidade

38

Medição do **volume total** (V_t):

Amostras cilíndricas regulares – volume total geométrico

Amostras irregulares – por imersão, princípio de Arquimedes ou picnômetro de Hg.

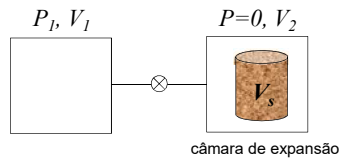


(a) www.lar.uff.br; (b) www.gincor.co; (c) www.corelab.com

Propriedades petrofísicas - porosidade

39

Medição do volume de sólidos (V_s)



Lei de Boyle:

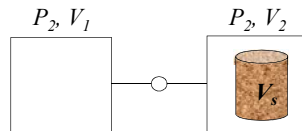
$$PV = nRT$$

Condição isotérmica:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$P_1V_1 = P_2(V_1 + V_2 - V_s)$$

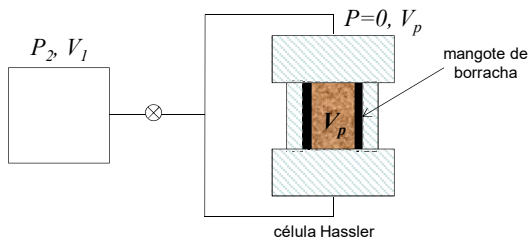
$$V_s = V_1 + V_2 - (P_1/P_2)V_1$$



Propriedades petrofísicas - porosidade

40

Caracterização da porosidade (ϕ)



Lei de Boyle:

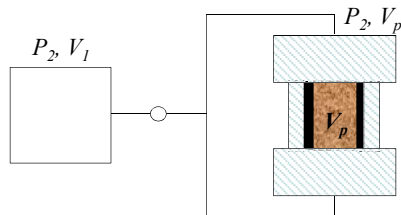
$$PV = nRT$$

Condição isotérmica:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$P_1V_1 = P_2(V_1 + V_p)$$

$$V_p = V_1(P_1 - P_2)/P_2$$

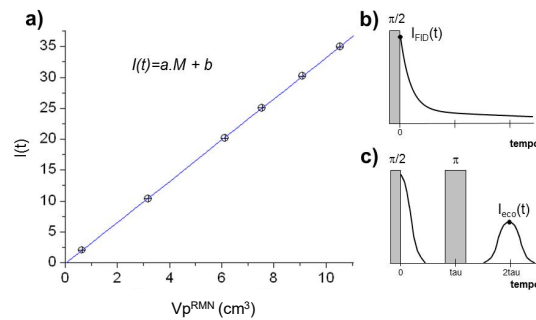


Propriedades petrofísicas - porosidade

41

Porosidade por RMN

É possível quantificar o **volume de fluidos** presente na rocha, calibrando o sinal de RMN contra um padrão (amostra de volume conhecido).



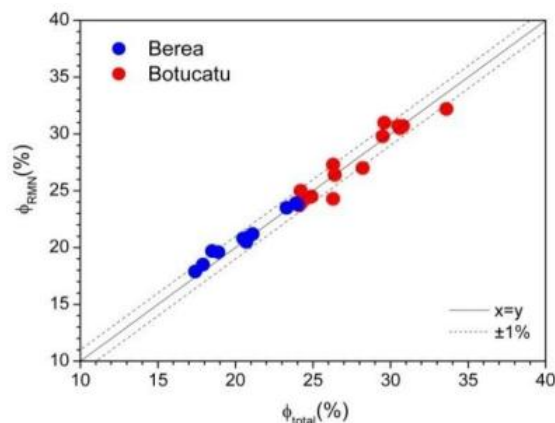
a) curva de calibração. b) medição através do FID. c) medição através do eco.

Propriedades petrofísicas - porosidade

42

Porosidade por RMN

Estimativas de porosidade são independentes da litologia.¹

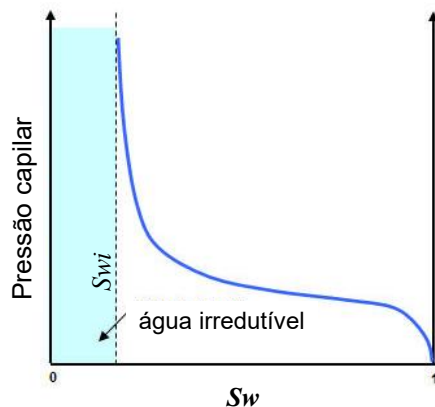
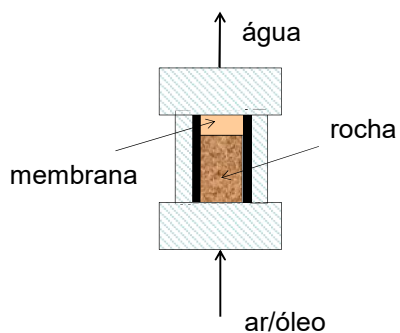


(1) RIOS, E.H. et al. Predição de propriedades permoporosas de rocha reservatório por RMN. In: 45 Congresso Brasileiro de Geologia, 2010, Belém. Livro de Resumos, 2010.

Propriedades petrofísicas – saturação irreduzível 43

Saturação irreduzível (S_{wi})

Método placa porosa/membrana



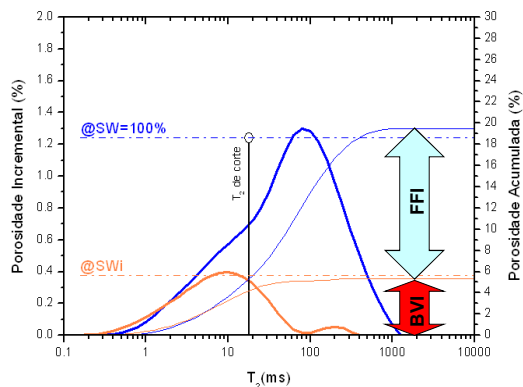
Propriedades petrofísicas – saturação irreduzível 44

Saturação irreduzível por RMN

Tempo de relaxação de corte divide o espectro de relaxação em fluido móvel e fluido irreduzível.

$T_{2 \text{ corte}} \sim 33\text{ms}$ p/ arenitos

$T_{2 \text{ corte}} \sim 90\text{ms}$ p/ carbonatos



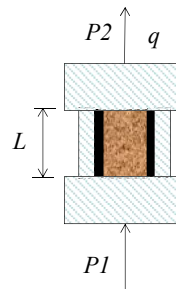
Propriedades petrofísicas - permeabilidade

45

Medição da **permeabilidade** (K) - é a capacidade de um material poroso de transmitir fluidos.

Lei de Darcy para fluxo isotérmico, linear, permanente de fluido incompressível:

$$q = \frac{KA}{\mu} \frac{(P_1 - P_2)}{L}$$



P_1 = pressão a montante; P_2 = pressão a jusante; q = vazão; A = área; μ = viscosidade do fluido; L = comprimento.

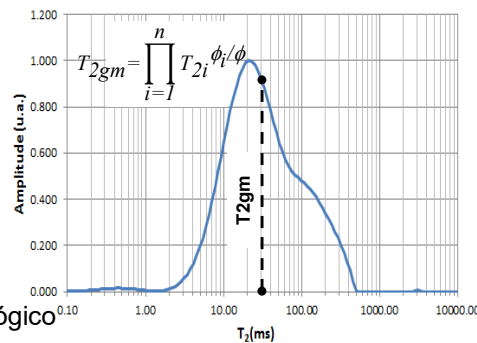
Propriedades petrofísicas - permeabilidade

46

Permeabilidade por RMN

Modelo de Kenyon¹ (ou SDR) - baseia-se nas correlação entre permeabilidade, porosidade e tamanho médio de poro

$$K_{Kenyon} = a\phi^b T_{2gm}^c$$



a , b e c - coeficientes de ajuste litológico

T_{2gm} - média geométrica de T_2

(1) KENYON, W.E. et al. SPE Formation Evaluation v.3, p.622-636, 19888.

Propriedades petrofísicas - permeabilidade

47

Permeabilidade por RMN

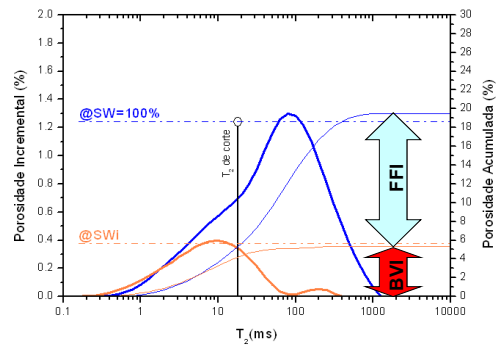
Modelo de Timur-Coates¹ baseia-se na correlação direta entre saturação irreduzível com área superficial.

$$K_{TC} = \left(\frac{FFI}{BVI} \right)^a \left(\frac{\phi}{c} \right)^b$$

a , b e c = coeficientes de ajuste

FFI - free fluid index

BVI - bound volume irreductible

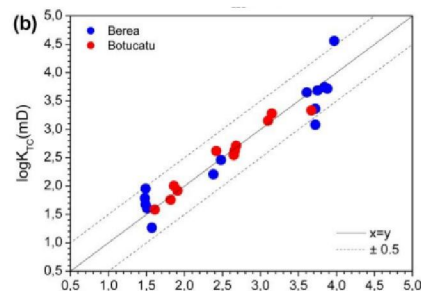
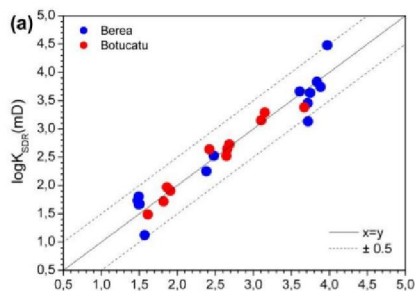


(1) COATES, G.R. et al. The MRIL in Conoco 33-1: an investigation of a new magnetic resonance imaging log. SPWLA 32nd Annual Logging Symposium, June 16-19, 1991.

Propriedades petrofísicas - permeabilidade

48

Permeabilidade por RMN



(1) RIOS, E.H. et al. Predição de propriedades permoporosas de rocha reservatório por RMN. In: 45 Congresso Brasileiro de Geologia, 2010, Belém. Livro de Resumos, 2010.

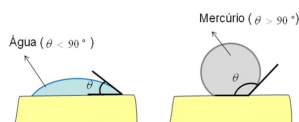
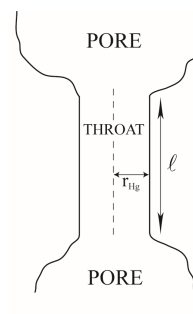
Estimativa da relaxatividade superficial

Pressão capilar por injeção de mercúrio (MICP), ou porosimetria por injeção de mercúrio

Correlação entre pressão capilar e raio da garganta, Washburn:¹

$$P_c = \frac{-2\gamma \cos \theta}{r_{Hg}}$$

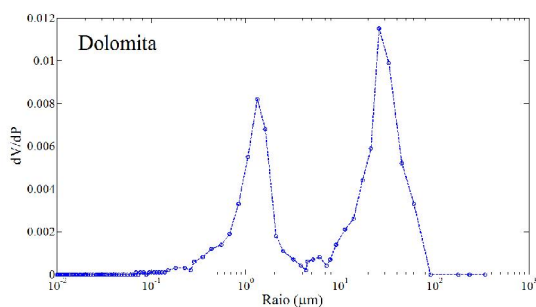
γ = tensão superficial do Hg, θ = ângulo de contato; e r_{Hg} = raio da garganta (μm)



(1) WASHBURN, E.W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous materials, Proc. Natl. Acad. Sci., 7, 115-116, 1921.

Estimativa da relaxatividade superficial

Pressão capilar por injeção de mercúrio (MICP), ou porosimetria por injeção de mercúrio.

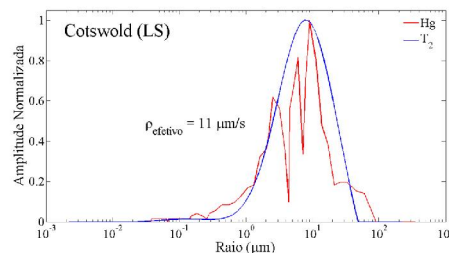
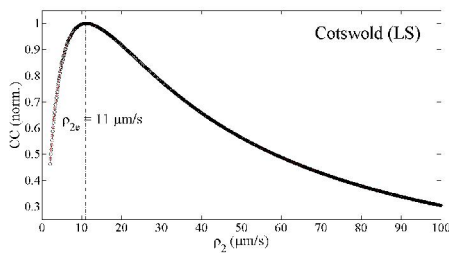


Estimativa da relaxatividade superficial

Método da correlação direta entre RMN e MICP:

$$CC(\rho_{2i}) = \sum_i m_{Hg}(r_i) \cdot m_{RMN}(r_i = 2\rho_{2i}T_{2i})$$

$$\left(\frac{S}{V}\right)_{cilindro} = \frac{2\pi r l}{\pi r^2 l} = \frac{2}{r} \quad \text{então:} \quad r(cilindro) = 2\rho_2 T_2$$



(1) MARSCHALL, D. et al. 1995. Method for correlating NMR relaxometry and mercury injection data, in Proceedings of the 11th SCA Ann. Symp., Stavanger, September 12–14, Norway.

Perfilagem por RMN

Instrumentação

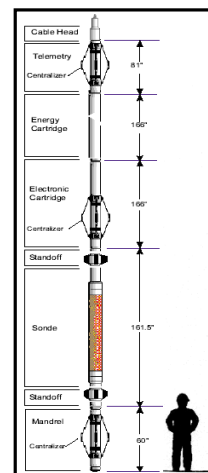
RMN às avessas: $B_0 \perp B_1$ na periferia do equipamento

magnetos de geometria aberta

+

bobinas de superfície

RMN inside-out!!!



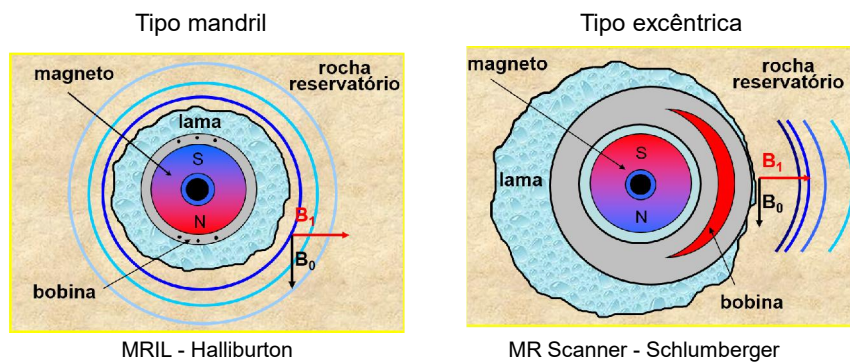
MRIL - Halliburton

Perfilagem por RMN

Instrumentação

Tipo mandril – operam centralizadas com o poço

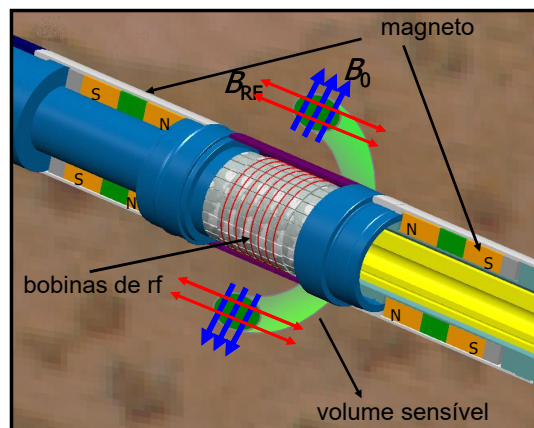
Tipo excêntricas - modo contato com a parede do poço



Perfilagem por RMN

Instrumentação

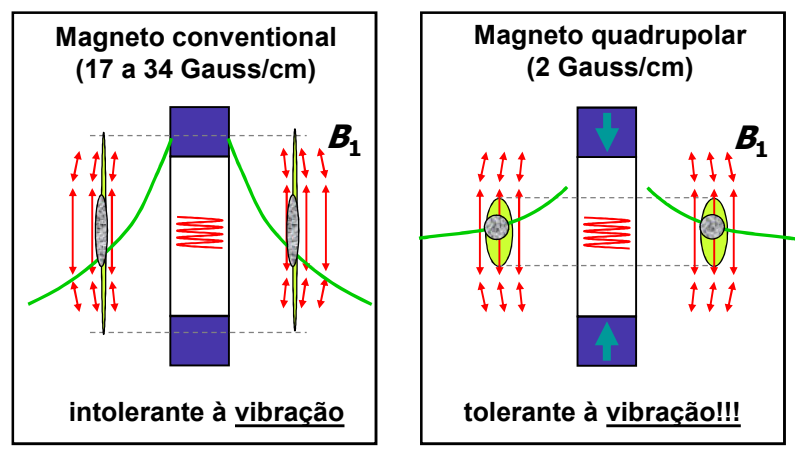
Logging While Drilling (LWD) – medições realizadas enquanto se perfura!!!



Perfilagem por RMN

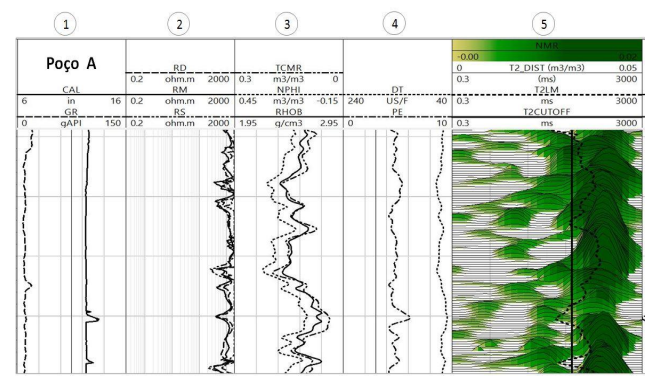
Instrumentação

Logging While Drilling (LWD) – medições realizadas enquanto se perfura!!!



Perfilagem por RMN

Exemplo



Trechos contínuos dos perfis dos poço A, omitidas as profundidades: 1 - Caliper (CAL), Raios Gama (GR); 2 - Resistividade rasa (RS), média (RM) e profunda (RL); 3 - Densidade (RHOB), Porosidade neutrônica (NPHI) e Porosidade por RMN (TCMR); 4 - Fator fotoelétrico (PE) e Sônico (DT); 5 - Distribuição dos tempos de relaxação T_2 ($T2_DIST$), Média geométrica de T_2 ($T2LM$) e T_2 de corte ($T2CUTOFF$).



Contents

Chapter 1 Digital Images and Computer Modeling	1
Chapter 2 Visualization of Flow Patterns in 2D Model Networks	43
Chapter 3 Probing Pore Structures by Sorption Isotherms and Mercury Pc	69
Chapter 4 Conductivity Permeability and Electrokinetics	119
Chapter 5 Acoustics and Ultrasonics	161
Chapter 6 SmallAngle Scattering from Porous Materials	223
Chapter 7 Light Scattering and Other Optical Methods	263
Chapter 8 XRay Imaging	301
Chapter 9 Nuclear Magnetic Resonance	337
Chapter 10 NMR Imaging of Fluids and Flow in Porous Media	387
Chapter 11 Acoustical and Electrical Methods for the Study of Fluid Mixing	425

(1) KLEINBERG, R.L. Nuclear magnetic resonance, In: Wong, P.-Z. (ed.), Methods in the Physics of Porous Media. San Diego: Academic Press, 1999, p.337-385.