

APLICAÇÕES DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR NA AVALIAÇÃO DE OSTEOPOROSE

Ricardo A Giannoni¹, Elton T Montrazi², Reinaldo Cesar³, Tito J. Bonagamba²

¹Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD)

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)

Av. Salvador Allende s/n - Barra da Tijuca - CEP 22783-127
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

giannoni@ird.gov.br

² Instituto de Física de São Carlos (IFSC)

Universidade de São Paulo (USP)

Avenida Trabalhador são carlense, nº 400, Bairro Centro.

CEP 13566-590 - São Carlos SP

elton.montrazi@gmail.com

tito@ifsc.usp.br

³ Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)

Universidade de São Paulo (USP)

Avenida Trabalhador são carlense, nº 400, Bairro Centro.

CEP 13566-590 - São Carlos SP

reinaldofisica@gmail.com

RESUMO

A medida dos tempos de relaxação de spin nuclear T1 (relaxação do sistema spin-rede) e T2 (relaxação do sistema spin-spin) é muito utilizada para análise de meios porosos. Relacionam-se esses tempos de relaxação de spin nuclear ao tamanho do poro. Através da utilização da técnica de ressonância magnética nuclear pulsada, denominada de CPMG, é possível adquirir o sinal da relaxação do sistema de spin-spin e obter a medida de T2. O posterior processamento desse sinal adquirido e sua interpretação através da transformada de Laplace dão uma indicação para a avaliação da porosidade do material. Neste trabalho foram utilizadas inicialmente amostras cerâmicas de porosidade conhecida. Essas amostras cerâmicas foram saturadas com água e, mediu-se o sinal de ressonância magnética nuclear devido aos processos de relaxação do núcleo de hidrogênio dessa água confinada nos poros desse material cerâmico. Em seguida essas amostras foram submetidas a um processo de secagem e medidas, sucessivamente. A medida que a água contida nos poros maiores evapora, a intensidade do sinal diminui e evidencia-se o sinal devido dos poros menores. A análise desse processo de secagem dá uma avaliação qualitativa do tamanho dos poros desse material. Numa segunda etapa, ossos de animais de porosidade desconhecida foram submetidos a mesma metodologia para avaliação de osteoporose. Mediu-se também uma amostra de vértebra humana, de forma única, com a mesma finalidade. Aliada a outras técnicas é possível uma avaliação quantitativa da porosidade.

1. INTRODUÇÃO

Meios porosos estão presentes em nosso cotidiano, em materiais como madeiras, rochas, produtos alimentícios, tecidos biológicos e, por exemplo, ossos humanos. A estrutura do meio poroso incluindo o tamanho do poro, conectividade entre os poros, e heterogeneidade espacial são fatores importantes na caracterização desses materiais.

Por exemplo: Tamanho e conectividade dos poros de rochas são determinantes nos casos:

- a) fluxo de óleo na extração de petróleo.
- b) movimentação da água em aquíferos.
- c) A estrutura interna de ossos de humanos e de animais contribuem para sua integridade mecânica. A perda de massa dessa estrutura pode causar fraturas e deformações.
- d) Tecidos biológicos podem ser considerados meios porosos.

Outras técnicas auxiliam na caracterização de meios porosos, como por exemplo, microscopia eletrônica de varredura (MEV), e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

Ressonância Magnética Nuclear (R.M.N.) é uma técnica poderosa para o estudo da dinâmica e estrutura molecular de fluidos confinados em materiais porosos, e *tem a vantagem de ser uma técnica não destrutiva*. É utilizada como ferramenta de análise físico-química.

A técnica de RMN usada neste trabalho é a sequência de pulsos de radio frequência conhecida como CPMG que nada mais é que uma sequência de pulsos de radio frequência que permite obter vários ecos de spin, e a amplitude desses ecos estão relacionadas com parâmetros de relaxação nuclear, em particular o tempo de relaxação longitudinal de spin nuclear denominado de T2.

A distribuição dos sinais de RMN adquiridos pela técnica CPMG foi posteriormente processada por software desenvolvido pelo grupo de ressonância magnética nuclear do Instituto de Física de São Carlos [1]. Conforme descrito a seguir, esse software traduz a distribuição de sinais de T2 adquiridos via a CPMG, através da ferramenta matemática da transformada de Laplace, em um gráfico que mostra a distribuição de intensidade relativa *versus* tempo de relaxação T2. Esse gráfico é portador da informação que será o objetivo de análise neste trabalho.

2. TEORIA DE RELAXAÇÃO DE LÍQUIDOS EM MATERIAIS POROSOS

A dinâmica molecular dos líquidos faz com que as moléculas percorram razoáveis distâncias durante um experimento de RMN, permitindo que as mesmas interajam com as superfícies dos poros, ou migrem para outros poros. Essas superfícies são responsáveis pela modificação das propriedades de relaxação dos líquidos. A interação entre a molécula do líquido e a superfície do poro causa a alteração dos valores dos tempos de relaxação T1 e T2 do sistema.

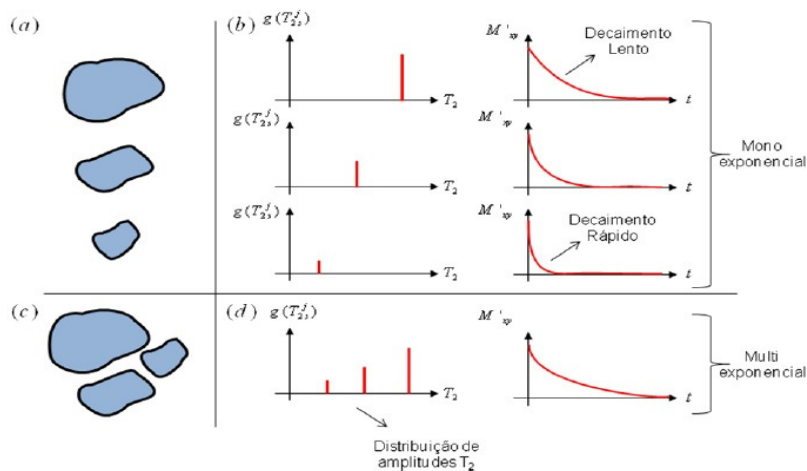
Considerando um regime de difusão rápida, a relaxação total do spin dentro do poro ocorre quando ele interage com a superfície do poro n vezes, o decaimento da magnetização em um único poro é regido por uma função mono exponencial e depende apenas da razão

superfície/volume, não importando a morfologia do poro. Na ausência de outros mecanismos de relaxação o tempo de relaxação é dado por,

$$(1/T1)_{\text{superfície}} = \rho_1 (S/V)_{\text{poro}} \quad (1)$$

$$(1/T2)_{\text{superfície}} = \rho_2 (S/V)_{\text{poro}} \quad (2)$$

Onde ρ_1 e ρ_2 são constantes denominadas de *relaxatividade superficial* ($\mu\text{m/s}$), S é a superfície, e V é o volume do poro, T_1 e T_2 são os tempos de relaxação do sistema de spins nucleares. O tempo T_1 é o tempo de relaxação transversal causada pela interação spin-rede, e T_2 é o tempo de relaxação longitudinal causada pela interação spin-spin.



- (a) e (b) Para um único poro isolado o decaimento da magnetização é monoexponencial e a intensidade do decaimento é proporcional ao tamanho do poro. (c) e (d) Quando há uma distribuição de poro se observa uma distribuição de T_2 e o decaimento da magnetização resultante é multiexponencial.

Figura 1 – Distribuição dos tempos de relaxação transversal T_2 e sua correspondente amplitude.

Esta característica multi exponencial do decaimento da magnetização pode ser descrita através da transformada de laplace definida pela equação,

$$F(t) = \mathcal{L}[g(s)](t) = \int_0^{\infty} g(s)e^{-ts}ds, \quad (3)$$

Onde $F(t)$ é conhecida e esta associada ao sinal da magnetização, e $g(s)$ relaciona-se com a distribuição dos tempos de relaxação que deve ser determinada.

De maneira geral o conjunto de pontos adquiridos num experimento CPMG pode ser apresentado pela equação 4 a seguir. Essa equação pode ser invertida e através de um método de minimização de erros quadráticos, e pode-se determinar a melhor curva que passa pelos pontos adquiridos experimentalmente.

$$M'_{xy}(t) = \sum_{j=1}^N g(T_{2s}^j) \cdot e^{-\frac{t}{T_{2s}^j}} \quad (4)$$

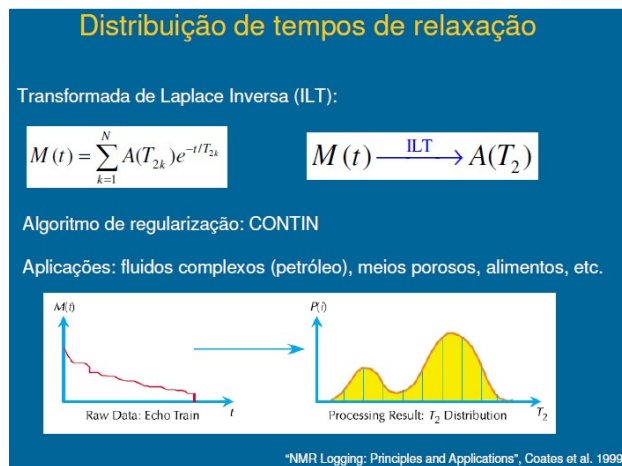


Figura 2 – Ilustração esquemática da aplicação da transformada inversa de laplace no sinal de RMN adquirido através de uma sequencia de pulsos CPMG, e o aspecto da informação resultado (Coates et AL. ,1990, NMR logging:Principles and Applications).

3. MATERIAS

- a) Espectrômetro de R M N, Tecmag, tipo LAPNMR 20 MHZ
- b) Estufa de secagem a vácuo QUIMIS- Q819V
- c) Balança analítica eletrônica digital QUIMIS - Q500L210C.

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Neste trabalho foram utilizadas inicialmente amostras cerâmicas de porosidade conhecida. Essas amostras cerâmicas foram primeiramente colocadas em estufa a 60 °C por 12 horas. Após a retirada da umidade do interior dos poros das amostras, mediu-se a massa. Avaliado que as amostras estavam secas, foram saturadas com água deionizada por processo a vácuo. Medida a massa da amostra saturada com água, imediatamente deu-se início ao experimento de RMN. Adquiriu-se o sinal de ressonância magnética nuclear, devido aos processos de relaxação do núcleo de hidrogênio da água confinada nos poros desses materiais cerâmicos, pela técnica CPMG.

Após essa primeira medida do sinal de RMN por CPMG, deu-se sequência ao experimento submetendo as amostras ao calor, em estufa a 60 °C, e monitorando a medida de sua massa para controle qualitativo da taxa de evaporação da água contida no meio poroso. Novamente a imediata medida por RMN com a técnica de CPMG. Assim sucessivamente até que a amostra pudesse ser considerada novamente seca.

Com a evaporação da água contida nos poros maiores (água “livre”), a intensidade do sinal de RMN do hidrogênio, correspondente a água confinada nos poros maiores, vai gradativamente diminuindo, e o sinal devido aos poros menores vai se tornando mais evidente, e assim sucessivamente ao longo do experimento. A análise desse processo de secagem dá uma avaliação qualitativa do tamanho dos poros desse material, aliada as informações obtidas anteriormente pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Esse experimento com as amostras de material cerâmico de porosidade conhecida, descrito acima, foi utilizado como processo de avaliação e escolha de ajuste de parâmetros experimentais.

A figura 3 mostra o experimento realizado com amostras de osso de boi, de porosidade desconhecida, que foram avaliadas quanto ao grau de osteoporose com a mesma metodologia descrita acima no experimento com as amostras cerâmicas. Essas amostras de osso de boi foram somente medidas por RMN com a técnica de CPMG. Não se utilizou nenhuma outra técnica complementar como no caso das amostras cerâmicas. No eixo horizontal está expresso o tempo de relaxação T2. Sinais correspondentes à tempos maiores de T2, da ordem de 10⁰ segundos, na figura 3, estão mais próximos do valor de T2 correspondente ao tempo de relaxação de RMN da água livre. Isso indica que esses sinais correspondem à água menos “ligada” à superfície do poro, e pode ser considerada como água “livre”, basicamente sujeita ao movimento browniano de difusão de moléculas em um líquido.

Quanto menor é o tamanho do poro, maior é a relação S/V e menor será o tempo de relaxação T2, conforme a equação 2.

O processo de secagem evidencia a evaporação lenta dessa água menos “ligada” (“livre”) e em maior quantidade contida nos poros maiores pela diminuição gradativa da intensidade do sinal de T2 e, isso permite visualizar em maior evidência a intensidade da água contida nos poros menores, por que a intensidade do sinal mostrada no eixo vertical é de caráter relativo. O mesmo processo se dá nos poros menores ao longo do processo de secagem e medida, até o limite de detecção desta técnica.

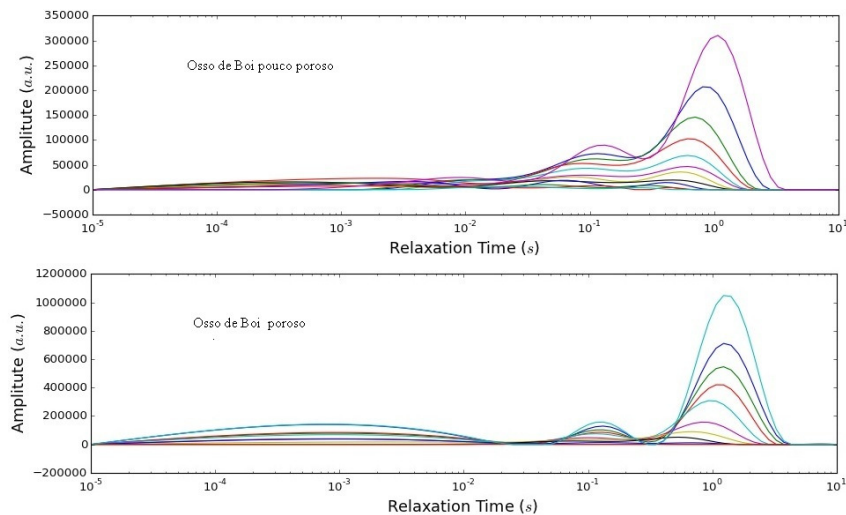


Figura 3 – Resultado experimental do sucessivo processo de secagem e medida através de CPMG das amostras de ossos de boi. A figura superior é a medida de um osso de boi de menor grau de porosidade. A figura inferior é um osso de boi com um grau maior de porosidade, osteoporose.

A amostra de vértebra humana foi medida pela mesma técnica CPMG de RMN, mas não foi submetida a nenhum processo de secagem. Apresentou resultado similar ao resultado obtido nas amostras de osso trabecular de boi, mostrados na figura 3, porém de maior complexidade devido ao tecido humano mole (medula) contido nessa amostra de vértebra humana. A análise do resultado dessa medida e o estudo de outras sequências de pulsos de radiofrequência que permitam um resultado quantitativo via RMN, aliadas a outras técnicas de imagem (MEV) para determinar o tamanho dos poros esta em andamento.

Os resultados experimentais mostrados na figura 3 e a análise desses sugerem que a medida da relaxatividade é um bom indicador na avaliação de osteoporose.

REFERÊNCIAS

1. Elton T Montrazi, *Estudo de cerâmicas porosas de alumina através da medida dos tempos de relaxação via ressonância magnética nuclear*, Dissertação de mestrado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.