

O MÉTODO DE DATAÇÃO ARQUEOLÓGICA POR RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA ELETRÔNICA

Oswaldo Baffa*

BAFFA, O. O método de datação arqueológica por ressonância paramagnética eletrônica. *Rev. do Museu de Arqueologia e Etnologia*, São Paulo, Suplemento 2: 151-160, 1997.

RESUMO: Os princípios físicos do método de datação arqueológica utilizando a espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica (RPE) são apresentados. Esta técnica espectroscópica permite uma quantificação da concentração de radicais livres estáveis presentes na amostra criados pela radiação ambiental. Através dessa medida é possível determinar-se a dose de radiação, conhecida como dose arqueológica, necessária para a produção da concentração desses radicais. Conhecendo-se a taxa de dose ambiental no sítio onde a amostra está depositada é possível converter essa dose em idade da amostra. Esse método é não destrutivo, aplica-se a amostras de ossos, carbonatos, silicatos, e outros materiais isolantes elétricos e quantidades da ordem de 0.1 gramas são necessárias.

UNITERMOS: Datação – Ressonância Paramagnética Eletrônica – Ossos – Carbonatos.

Introdução

Todos os métodos físicos de datação envolvem a medida de alguma propriedade do material em estudo que varia com o tempo. O método do carbono-14 (C^{14}) mede a quantidade desse radioisótopo instável e através dessa medida pode-se inferir a idade da amostra em estudo. A cada meia vida, que para o C^{14} é de 5.730 anos, essa quantidade é reduzida à metade. Sabendo-se quanto desse radioisótopo está presente na amostra no momento de sua formação é possível determinar a sua idade. Esse método é bom para amostras ricas em carbono, como é o caso das amostras biológicas. Já o método de termoluminescência utiliza a luz emitida por cristais, quando aquecidos como indicador da idade. Essa luz tem origem na recombinação de elétrons e *buracos* que são criados na

estrutura de cristais pela radiação ionizante ao interagir com a matéria. Logicamente esse método é mais adequado a sólidos cristalinos que possuem uma estrutura regular e oferecem mecanismos que estabilizam a separação de elétrons (cargas negativas) e *buracos* (que possuem cargas positivas). Esse método será discutido com mais detalhes em outro artigo deste volume. A medida da concentração de espécies paramagnéticas presente em uma amostra pode também fornecer a sua idade.

De modo geral podemos imaginar um relógio, o qual chamaremos de *relógio arqueológico*, ligado a cada processo físico. Para que esse relógio possa funcionar adequadamente como um indicador de idade ele deve conter um *mecanismo de disparo*, uma *base de tempo* e um *mostrador*. O *mecanismo de disparo* será em geral algum processo físico, químico ou biológico que define o início da contagem de tempo ou o *tempo zero*. Por exemplo, quando um determinado ser vivo morre cessa a absorção de carbono em geral e em particular do C^{14} , será essa quantidade de C^{14} que irá decair com o

(*) Departamento de Física e Matemática – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.

passar do tempo e permitirá encontrar a idade. Uma medida da concentração de C^{14} presente na atmosfera passível de ser incorporado pelos seres vivos é fundamental nesse método. No caso da termoluminescência quando uma cerâmica é levada ao forno para a sua queima, as temperaturas atingidas nesse processo fazem com que todos os pares elétrons-buracos se recombinem e a luz total resultante desse processo seja emitida, cancelando qualquer informação dessa natureza previamente armazenada. Logo, com o passar do tempo a radiação ionizante à que a amostra está presente no ambiente irá criar o mesmo mecanismo para a produção de luz acima aludido. Processo semelhante pode estar associado também à datação por RPE. Já que conhecemos o mecanismo de disparo do nosso relógio, vamos agora discutir a nossa base de tempo. A *base de tempo* aqui é algo equivalente ao pêndulo do relógio de parede, que ao executar sempre o mesmo movimento no mesmo intervalo de tempo pode ter suas oscilações contadas e fornecer uma indicação do tempo transcorrido entre dois eventos. Galileu Galilei utilizou a sua própria pulsação (~1/70 segundo) para medir o tempo que um móvel levava para percorrer um determinado espaço e com isso formulou as suas importantes teorias sobre o movimento dos corpos. No caso da datação arqueológica precisamos de uma *base de tempo* adequada à grandeza do período que queremos medir. Os decaimentos radioativos tem constantes de decaimento ou meia-vida da ordem de milhares de anos e são usualmente empregados como base de tempo para as datações. Falta agora comentar o mostrador do nosso relógio. O mostrador nessa analogia é a propriedade física que estamos medindo, radioatividade ou concentração de C^{14} , luz emitida ou a concentração de espécies paramagnéticas. A Figura 1 ilustra esses mecanismos no caso da RPE em nosso *relógio arqueológico*.

Com a descrição desse cenário podemos estabelecer quais serão os nossos objetivos nesse artigo. A seguir descreveremos as bases físicas da espectroscopia por ressonância paramagnética eletrônica (RPE), também conhecida como ressonância de spin eletrônico (RSE), que é a técnica espectroscópica usada para a determinação da concentração de espécies paramagnéticas ou de radicais livres em nossa amostra. Depois falaremos sobre o método das doses aditivas, que é empregado para a determinação da dose arqueológica, e finalmente como a partir dessa dose pode-se encontrar a idade da amostra. Nesse ponto a técnica de

→ COMO MEDIR TEMPO ? O RELÓGIO ARQUEOLÓGICO

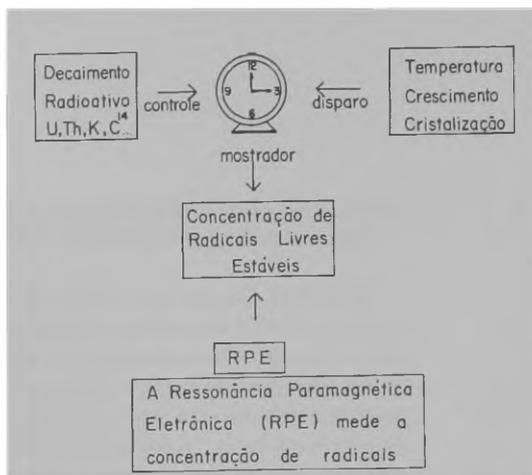


Fig. 1 — Como medir o tempo? Um esquema do relógio arqueológico é mostrado. O Decaimento radioativo é empregado como base de tempo, processos como: elevação da temperatura, cristalização, morte, dentre outros, servem como mecanismo de disparo. A informação que fornece o tempo é amostrada através da espectroscopia de Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE).

datação por RPE tem que lançar mão de informações obtidas por técnicas dosimétricas clássicas. Para concluir vamos analisar alguns exemplos de aplicação dessa metodologia para a datação e análise de amostras de interesse arqueológico.

A espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica

As técnicas espectroscópicas em geral envolvem a medida de absorção de energia, ou sua intensidade, pela matéria em função da energia. Dependendo da energia que se estuda podemos ter a espectroscopia no visível, infravermelho, ultravioleta, etc. onde esses termos invocam a faixa do espectro de ondas eletromagnéticas que estamos empregando. A Figura 2 mostra um espectrômetro simples para se estudar a absorção de luz na região do espectro visível. Ao variarmos o ângulo do prisma, presente no monocromador, a cor (ou comprimento de onda, ou frequência) da luz incidente sobre a amostra muda e podemos medir a intensi-

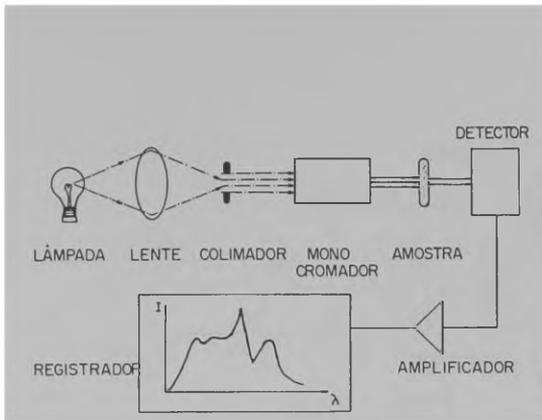


Fig. 2 – Esquema simplificado de um espectrofotômetro: a luz produzida pela lâmpada é concentrada e colimada e a seguir passa por um monocromador que através de um prisma separa os diversos comprimentos de onda λ , fazendo-os incidir sobre a amostra, o detector mede a intensidade luminosa da luz transmitida. O espectro consiste no gráfico dessa intensidade luminosa versus comprimento de onda.

dade da luz transmitida com um detector. Existe uma relação entre comprimento de onda e frequência para uma onda eletromagnética que é dada por: $c = \lambda \nu$, onde c é a velocidade da luz, ν é a frequência e λ é o comprimento de onda. Uma outra relação descoberta por Planck diz que a energia $E = h \nu$, onde novamente ν é a frequência e h é a constante de Planck. Alguns comprimentos de onda serão mais absorvidos que outros gerando um espectro. Uma questão importante é entender porque alguns comprimentos de onda são absorvidos e outros não. Isso tem a ver com a natureza mais íntima da matéria, alguns átomos ou moléculas possuem estruturas que absorvem comprimentos de onda específicos. Como consequência, determinadas absorções transformam-se em impressões digitais desses arranjos atômicos e moleculares. Em geral quando tratamos de moléculas, podemos dizer que a forma do espectro está associada a determinados cromóforos, *i.e.* centros que absorvem determinado comprimento de onda, e a intensidade desse espectro está associada à concentração desses cromóforos.

Na espectroscopia de Ressonância paramagnética eletrônica a situação é semelhante. Ondas eletromagnéticas incidem sobre uma amostra e a absorção dessas ondas é medida. A diferença agora é que essas ondas são absorvidas somente se um campo magnético estiver presente simultaneamente na amostra. A razão da presença do campo magnético explica o porque do termo paramagnético.

Nessa espectroscopia, no lugar de cromóforos analisam-se centros paramagnéticos, *i.e.* entidades dotadas de um magnetismo fraco que só se revela com a presença de um campo magnético intenso. Esses centros paramagnéticos, na maior parte dos exemplos considerados nesse trabalho, são constituídos por íons e moléculas que possuem spins desemparelhados. Normalmente os níveis atômicos são preenchidos por elétrons que vão emparelhando os spins, segundo o princípio de Pauli. Porém, existem algumas situações onde isso não acontece e temos um spin resultante não nulo. Podemos pensar esses centros paramagnéticos como o equivalentes a pequenas agulhas de bússolas que somente vão ter um campo magnético resultante quando algum campo externo impor uma direção preferencial, à semelhança do que faz o campo magnético terrestre com a bússola. Esse pequenos ímãs ou magnetos quando têm a sua direção alterada em um campo magnético absorvem energia. Essa energia é em geral muitas ordens de grandeza menor que aquela do espectro visível e UV e situa-se na faixa do espectro eletromagnético denominada de região de microondas. Falta agora explicar o termo Ressonância. Esse termo vem do fato que a absorção de energia só vai ocorrer quando a frequência da onda incidente estiver em ressonância com a diferença de energia criada pelo campo magnético entre a direção paralela e antiparalela a esse campo. Podemos pensar aqui na analogia mecânica de alguém que tenta fazer um balanço movimentar-se com pequenos empurrões. O intento só será conseguido se a frequência com que a pessoa empurra o balanço tiver a mesma frequência natural de oscilação e for aplicado no momento adequado.

Microondas não são entidades tão distantes de nosso dia a dia, os atuais fornos de microondas possuem um potente gerador (magnetron) desse tipo de radiação geralmente em 1 GHz (Banda L); radares também utilizam microondas e até mesmo algumas portas de abertura automática utilizam essas radiações. Para dar uma idéia dos valores de campo magnético necessários para essa espectroscopia temos que para espectrômetros que operam em banda X ($\nu \approx 9$ GHz, $\lambda \approx 3$ cm) um campo $B \approx 300$ mT (1 Tesla = 1 T = 10.000 Gauss) será necessário para se observar o fenômeno de RPE em muitos radicais livres de interesse para datação, à guisa de comparação o campo magnético terrestre em nossa região é cerca de 20 μ T (Wertz e Bolton, 1972).

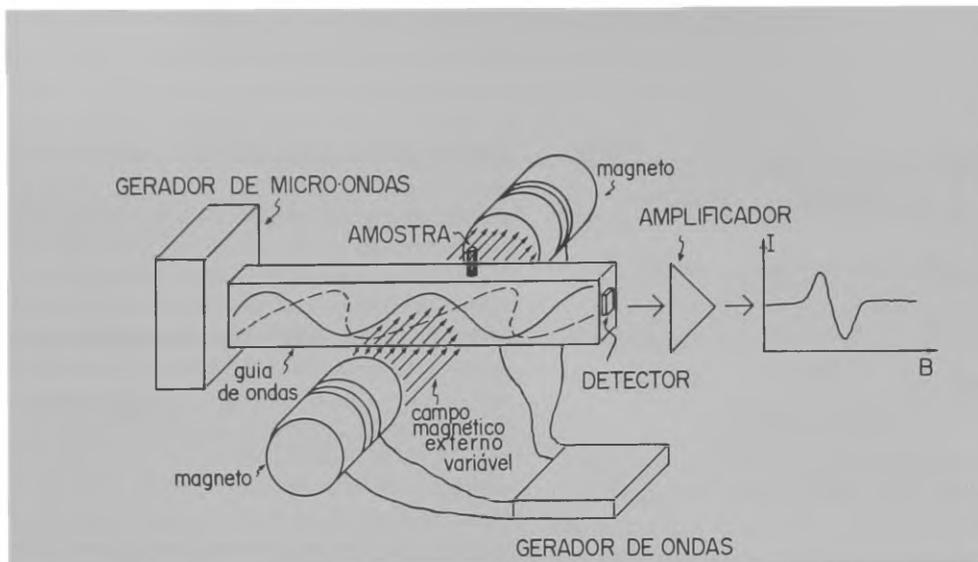


Fig. 3 — Diagrama simplificado de um espectrômetro de ressonância paramagnética eletrônica (RPE). Microondas são produzidas por um gerador e enviadas através de um guia de ondas para a amostra. Quando existe absorção dessa energia (condição de ressonância) a intensidade de microondas diminui e é detectada pelo sistema eletrônico, que transforma essa informação no espectro de intensidade versus campo magnético.

O Método das Doses Aditivas

A datação arqueológica por ressonância paramagnética eletrônica (D-RPE) funciona de maneira análoga à datação por termoluminescência (D-TL). Toda amostra fóssil fica exposta à radiação ionizante ambiental produzida por U, Th, K e raios cósmicos, por um longo período. Apesar da taxa de dose anual ser baixa ($TD \leq 10\text{Gy}/1000$ anos ou 1 rad/ano) para causar problemas em um período de vida normal do ser humano, ao longo de milhares de anos uma dose da ordem de 10 Gy pode ser depositada em um determinado material. Só para dar um significado desse valor, doses dessa ordem são usualmente empregadas em tratamentos de radioterapia para extirpar tumores cancerígenos; recentemente a RPE também começou a ser investigada como uma técnica dosimétrica para radioterapia (Alexandre et al., 1992 e Silveira e Baffa, 1995). Essa dose depositada na amostra vai provocar uma quebra de ligações químicas que pode em última análise ser visualizada como produzindo fragmentos moleculares com excesso e falta de elétrons separados em um meio eletricamente isolante, conforme ilustrado na Figura 4. Quanto maior a dose, maior o número desses fragmentos, portanto a dose arqueológica será resultado do produto do tempo τ pela taxa de dose TD:

$$DA = TD \times \tau$$

Fica claro então que ao determinar a dose arqueológica e conhecermos a taxa de dose, o tempo ou idade pode ser encontrado através da relação:

$$\tau = DA/TD$$

A datação por RPE segue um esquema semelhante e difere da datação por TL, justamente no *mostrador* do relógio arqueológico, ou seja na maneira de ler a informação. No caso da TL quando os centros se recombinam podem emitir luz, e a intensidade luminosa será proporcional ao seu número, que por sua vez é proporcional à dose arqueológica (DA) ou dose total (DT). No lugar de medir a luz emitida pela recombinação de elétrons e buracos, a D-RPE mede o número total de elétrons livres sem que esses se recombinem, através do magnetismo inerente aos elétrons. Isto traz uma vantagem em relação à D-TL, pois a informação não é destruída no processo de medida e a amostra pode ser estudada tantas vezes quantas sejam necessárias. A tabela 1 apresenta uma comparação entre alguns métodos de datação (Ulrich, 1987), em termos de alcance e quantidade de amostra necessária.

A Figura 5 ilustra esse processo de medida em um espectrômetro de ressonância paramagnética eletrônica. Antes que um espectro possa ser utilizado com o objetivo de se datar uma amostra o maior número possível de informações sobre o centro paramagnético deve ser obtido. Informações sobre a estabilidade temporal, o tipo de radical cria-

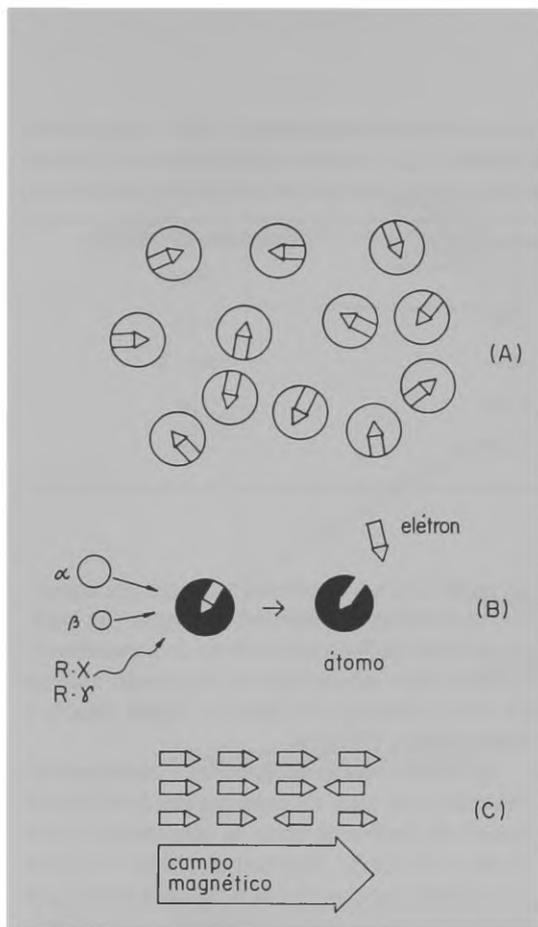


Figura 4 — Um dos efeitos da interação da radiação ionizante com a matéria é mostrado esquematicamente. Inicialmente (A) a matéria encontra-se no estado neutro, representado aqui por um círculo (átomos) com uma seta no seu interior (elétrons = spins). A incidência de radiação ionizante do tipo alfa, beta, gama ou raios X faz com que as ligações químicas sejam rompidas e elétrons, e conseqüentemente spins, sejam liberados (B). A presença de um campo magnético intenso orienta os spins, que em seguida podem absorver energia externa mensurável (C). A energia absorvida será proporcional ao número de spins e esse número é proporcional à dose da radiação absorvida.

do, a sua simetria cristalográfica, etc. são importantes para uma boa inferência da dose recebida (Schramm e Rossi, 1996). Um problema a ser resolvido é que diferentes amostras tem sensibilidades diferentes frente à exposição às radiações ionizantes. Para resolver esse problema cada amos-

tra tem que ser *calibrada* individualmente, utilizando o método das doses aditivas (Ikeya, 1988). Para isso a amostra é medida antes e depois de ser irradiada no laboratório com uma fonte de radiação artificial. Construindo-se um gráfico onde no eixo vertical indicamos o número de spins/grama da amostra e no eixo horizontal indicamos a dose artificial à que a amostra foi submetida podemos encontrar a dose total ou arqueológica fazendo um ajuste dos dados experimentais à uma função adequada e extrapolando o gráfico para o tempo (ou dose) zero, quando por hipótese, não existia nenhum spin livre na amostra. Apesar de muitos resultados positivos obtidos através do uso da RPE, é preciso chamar a atenção para diversos problemas que ainda são objetos de pesquisa e que necessitam de uma abordagem multidisciplinar para o seu estudo. Dentre esses podemos citar: 1) A melhoria da sensibilidade dos atuais espectrômetros de RPE, que poderá contribuir para que o limite inferior para datar amostras possa ser significativamente reduzido. 2) O estudo sobre a estabilidade temporal dos centros paramagnéticos criados pelas radiações, as variações de concentração com temperatura no passado e os mecanismos de saturação do crescimento sinal devido aos radicais, poderá estender o limite superior dessa técnica que hoje (para algumas amostras) situa-se em milhão de anos. 3) A padronização dos processos de preparação e análise das amostras realizados nos diferentes laboratórios é necessária para que uma intercomparação de resultados possa ser realizada. 4) Por último, mas não menos importante, estudos sobre o nível de radioatividade e equilíbrio secular na amostra e no sítio são necessários para uma boa estimativa da taxa de dose à que a amostra esteve exposta.

Exemplos

Vários materiais tem sido investigados pela D-RPE, carbonatos, espeleotemas, ossos, dentes, madeira, papel, calcitas, conchas, quartzo, corais, sílicas, etc. Essa técnica apresenta outra vantagem em relação à TL devido ao fato que como a amostra não precisa ser aquecida, materiais orgânicos que normalmente queimam quando aquecidos podem também serem estudados. A nossa experiência com a datação por RPE esteve ligada à datação de conchas e ossos oriundos de sambaquis do litoral paulista e estalactites e estalagmites oriundos da Caverna do Diabo. No caso dos sambaquis o

Tabela 1— Algumas técnicas físicas de datação e sua principais características. RPE- Ressonância Paramagnética Eletrônica, MTR-Magnetização Termoremanente, C¹⁴ – método radiométrico do Carbono-14, 1-convencional e 2-utilizando um acelerador de partículas para espectroscopia atômica de massa (AMS)

| | Amostra | Alcance (anos) | Quantidade de Amostra |
|--------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| RPE | Minerais, ossos, conchas, papel | 10 ² -10 ⁷ | 100mg |
| MTR | Vidros aquecidos. Cerâmicas | 10 ⁴ | ~ cm |
| TL | Cerâmicas | 10 ⁵ | 5mg – g |
| C ¹⁴ -1 | Matéria orgânica | 5.10 ⁴ | 10g |
| C ¹⁴ -2 | Matéria Orgânica | 7.10 ⁴ | ~ mg |

método de RPE foi comparado ao do C¹⁴ em amostras previamente datadas por esse método, para se extrair a taxa de dose local empírica (Mascarenhas et al., 1982). Com essa informação foi possível determinar a idade de outras amostras de conchas e ossos sem idade conhecida. A Figura 6 mostra o espectro de RPE de uma amostra de osso após ser limpa de resíduos de solo. O espectro é complexo mostrando um conjunto de 6 linhas igualmente espaçadas de 4,1 mT. Essas linhas tem origem no íon de Mn²⁺ que se difundiu através da amostra que é muito porosa. O sinal que nos interessa está indicado com uma seta. A Figura 7A mostra esse sinal agora registrado com maior resolução. Após irradiar o material com raios gama de uma fonte de cobalto 60 (γ Co⁶⁰) o sinal cresce em intensidade e tem a sua forma de linha melhor definida (Fig. 7B). Estudos realizados com amostras de osso e hidroxiapatita (a parte mineral do osso) indicam que esse sinal tem origem no radical planar CO₃³⁻ e CO₂⁻ formado na matriz mineral. Ossos frescos irradiados também apresentam sinal devido a parte orgânica ou colágeno, mas esses são instáveis e não se prestam para realizar datações. Na Figura 8 o método das doses aditivas é ilustrado para essa amostra indicando a dose arqueológica encontrada. Utilizando-se a taxa de dose obtida por comparação com o método do C¹⁴ foi possível datar essa amostra em (1,9 ± 0,2) 10³ anos.

Um exemplo do espectro de conchas é mostrado na Figura 9 para amostras de berbigão (*anomalouscardia brasiliiana*). O espectro nesse caso é mais complexo, porém não temos o sinal devido à contaminação do Mn²⁺, e a irradiação artificial fornece a informação sobre os possíveis fragmentos espectrais que poderão ser úteis para a datação.

As letras a, b, c e d indicam os sinais que aumentam com a dose recebida pela amostra. Um gráfico da intensidade do sinal versus dose permite encontrar a dose arqueológica e de maneira análoga ao osso podemos encontrar a idade (Baffa e Mascarenhas, 1995a,b).

Os espeleotemas (estalactites e estalagmites) tiveram a sua taxa de crescimento determinada através da análise da idade de diferentes porções da peça em estudo (Ikeya et al., 1984). A figura 10 mostra o espectro de RPE de uma amostra de estalactite antes e após a irradiação, o sinal indicado pela seta ($g = 2,0009$) aumentou com a dose, enquanto que o outro sinal não sofreu alteração. Aqui também temos uma contaminação muito pequena de outras impurezas paramagnéticas, visto que essas amostras são cristais quase puros de calcita (carbonato de cálcio CaCO₃). Aplicando-se o método das doses aditivas é possível construir um gráfico de crescimento do sinal em função da dose e extrair-se a dose arqueológica. Obtendo-se a idade em cada ponto ao longo do eixo de crescimento da amostra é possível encontrar a taxa de crescimento do espeleotema, essa informação pode ser importante para se extrair informações sobre o clima no passado, especialmente em relação à vazão das águas que influenciam na solubilização e cristalização dos carbonatos.

O método de datação por RPE é relativamente novo e tem sido objeto de pesquisa em muitos laboratórios, melhorias na espectroscopia de RPE tem levado a avanços nas técnicas de datação por esse método. Existe uma vasta literatura sobre a datação por RPE e o leitor interessado poderá começar pelo livro de M. Ikeya (Ikeya, 1993) que sumariza os resultados até a data de sua publica-

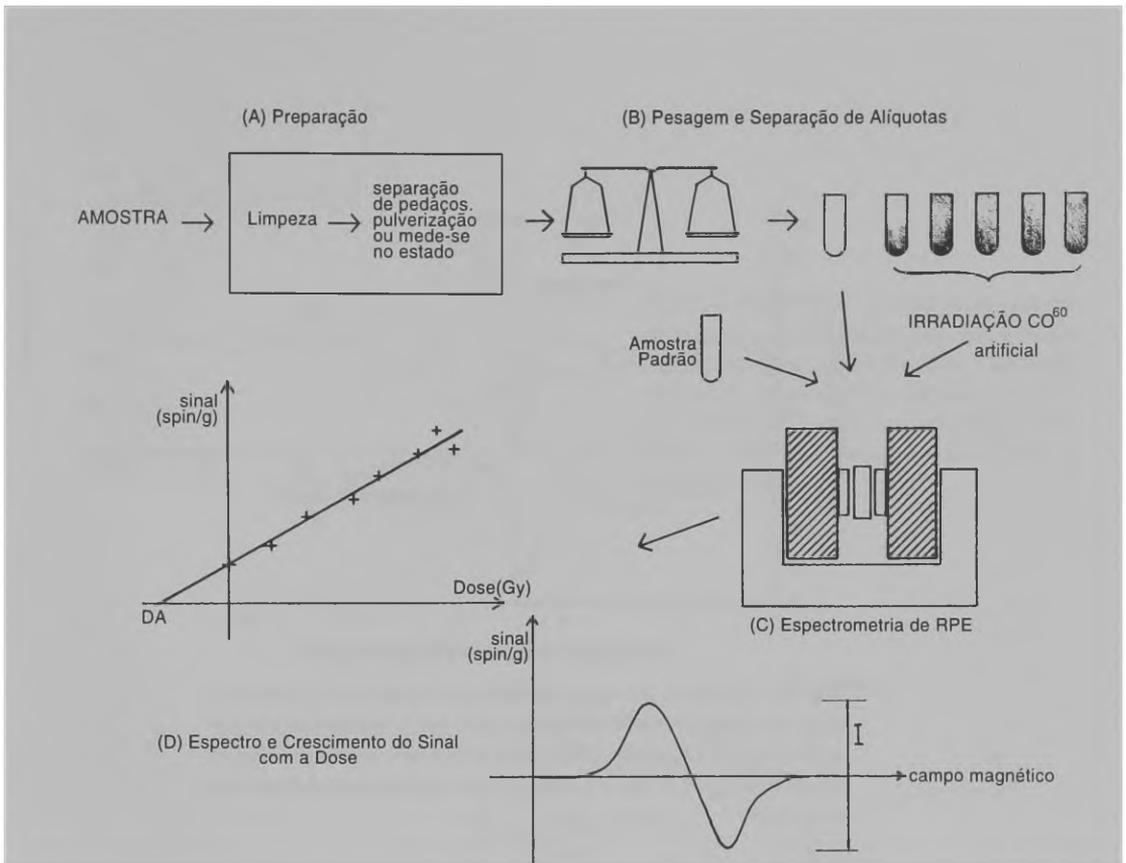


Fig. 5 — A análise do material por RPE envolve vários estágios, inicialmente (A) a amostra deve ser limpa e preparada para ser inserida no espectrômetro. Podem ser utilizadas amostras em forma de pó, cilindros, lâminas, grãos. Amostras raras podem ser utilizadas como no estado original, sem passar por nenhuma alteração física. A seguir as amostras são pesadas e separadas em alíquotas. Uma parte é irradiada no laboratório com radiação artificial para simular o processo de “envelhecimento” e a seguir medida, a outra parte é medida como está (B). O sinal de RPE é registrado e a partir desse determina-se o número de spins/grama. Um gráfico dessa grandeza versus dose permite a determinação da dose que a amostra recebeu. Conhecendo-se a taxa de dose local pode-se determinar a idade da amostra.

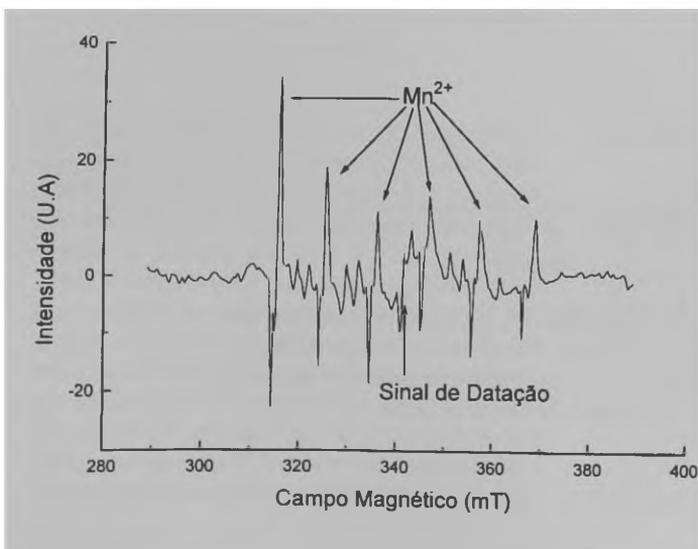


Fig. 6 — Espectro de RPE de uma amostra de osso fóssil, as seis linhas de absorção igualmente espaçadas de 4.1 mT têm origem no íon de Mn^{2+} o sinal de datação está indicado por uma seta.

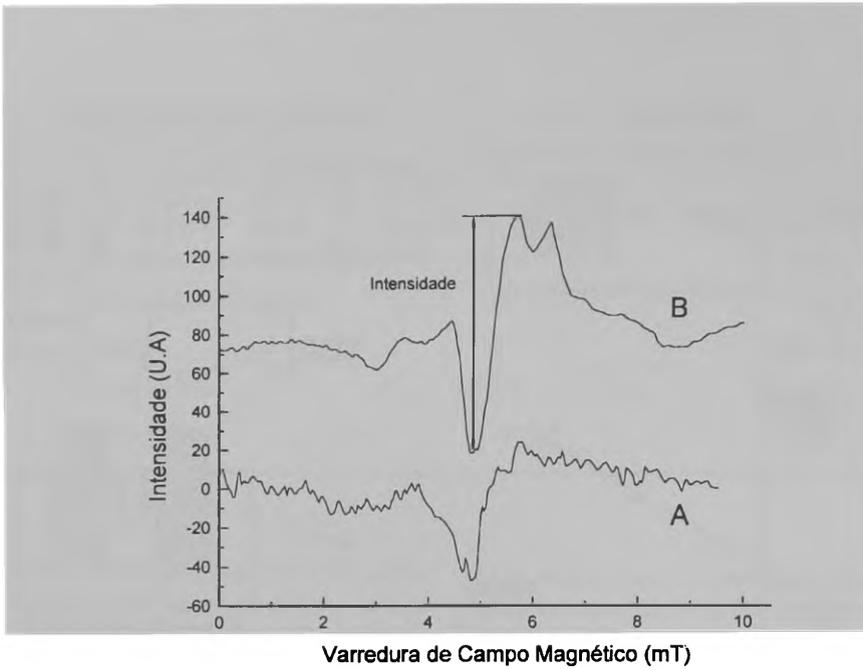


Fig. 7 — Porção do espectro anterior mostrando somente o sinal de datação antes (A) e após (B) ser irradiado por raios gama de Co^{60} . O sinal da amostra irradiada tem uma relação sinal/ruído melhor pois o número de centros paramagnéticos aumentou.

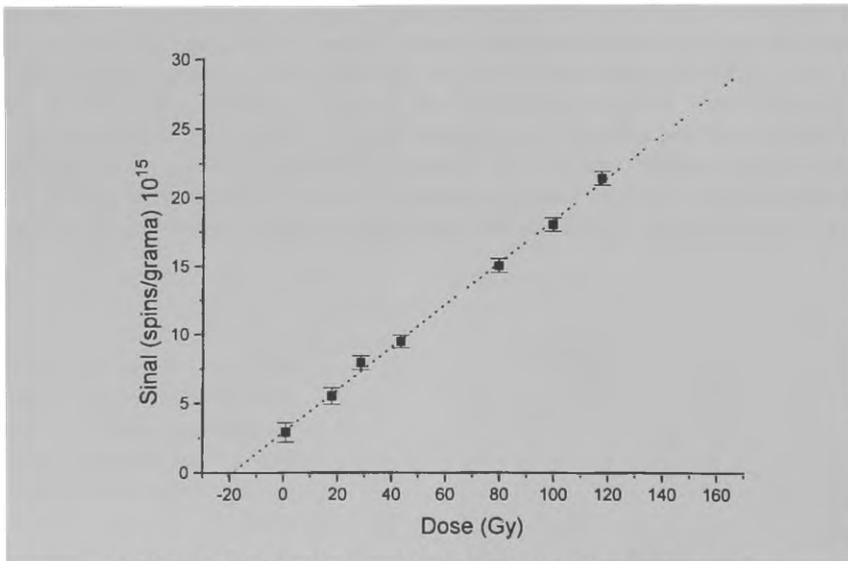


Fig. 8 — Gráfico da intensidade do sinal em função da dose de radiação artificial aplicada à amostra. Extrapolando a intensidade do sinal para zero, podemos encontrar a dose arqueológica, que nesse caso foi de (19 ± 2) Gy.

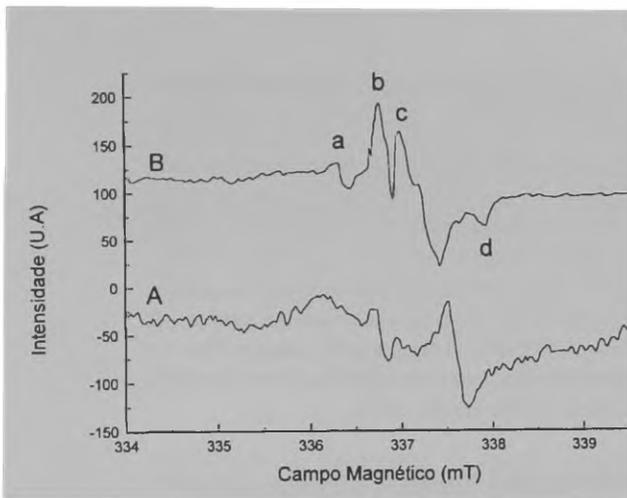
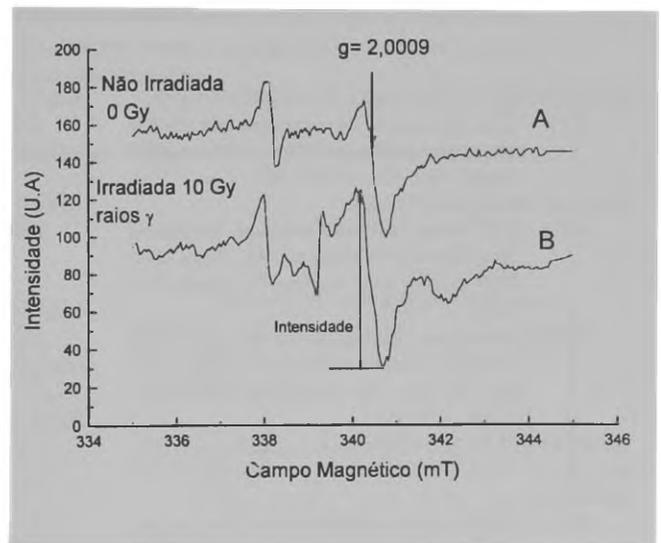


Fig. 9 — Espectro de RPE de uma amostra da concha de berbigão (*anomalocardia brasiliana*) antes (A) e após (B) a irradiação com raios gama de Co^{60} . Observar que alguns sinais são sensíveis à irradiação artificial e podem ser utilizados para datar a amostra.

Fig. 10 — Espectro de RPE de uma amostra de calcita obtida de um estalactite oriundo da Caverna do Diabo mostrando o efeito da irradiação artificial (B). Amostras de diferentes pontos de estalagmites e estalactites foram datadas para se determinar a velocidade de crescimento desses espeleotemas.



ção. Uma comparação entre as diferentes técnicas de datação pode ser encontrada em Leute (1987) e resultados recentes podem ser encontrados nos anais do último congresso sobre dosimetria e datação por RPE (Desrosiers et al., 1996). Outro aspecto não discutido nesse artigo mas que pode ser relevante nas aplicações arqueológicas é o uso da RPE como uma técnica espectroscópica tradicional empregada por exemplo na detecção de substâncias paramagnéticas em diferentes amostras que correlacionada com outros estudos pode fornecer informações relevantes sobre a origem e autenticidade de peças.

Agradecimentos

Ao professor Sérgio Mascarenhas pela oportunidade de trabalhar nesse assunto, aos professores Otaciro Rangel Nascimento e Motoji Ikeya por nos terem ensinado os diversos aspectos da arte da RPE, à professora Dorath Pinto Uchôa e ao professor Caio Del Rio García pelas amostras de ossos e conchas de Sambaquis, sem as quais os nossos trabalhos nessa área não teriam sido realizados. Ao CNPq, CAPES e FAPESP pelo apoio a diversos projetos de pesquisa que direta ou indiretamente nos permitiram trabalhar nessa área.

BAFFA, O. The Archeological Dating Method by Electron Paramagnetic Resonance. *Rev. do Museu de Arqueologia e Etnologia*, São Paulo, Suplemento 2: 151-160, 1997.

ABSTRACT: The physical principles of archeological dating with the spectroscopic technique of electron paramagnetic resonance are presented. This spectroscopic technique allows the determination of the stable free radical concentration present in a sample that was produced by the environmental radiation. Using this result it is possible to determine the radiation dose, known as the archeological dose, that was necessary to produce this free radical concentration. Knowing the dose rate at the site where the sample was buried it is possible to convert the archeological dose in the age of the sample. This is a non destructive method that can be applied to bones, carbonates, paper and other electrical insulating materials and about 0.1 grams of sample are necessary.

UNITERMS: Dating — Electron paramagnetic resonance — Bones — Carbonates.

Referências bibliográficas

- ALEXANDRE, A.C.; BAFFA O.; NASCIMENTO, O.R.
1992 The Influence of Measurement and Storage Conditions on Alanine ESR Dosimeters. *Appl. Radiat. Isot.* 43(11):1407-1411.
- BAFFA O.; MASCARENHAS S.
1985a ESR Dating of Fossil Shells from Sambaquis (Brazilian Shell Mounds). M. Ikeya (Ed.) *ESR Dating and Dosimetry*, Ionics Co., Tokio: 139-143.
1985b Radiation Quality Dependence of ESR Dating of Bones and Shells. M. Ikeya (Ed.) *ESR Dating and Dosimetry*, Ionics Co., Tokio: 369-372.
- DESROSIERS, M.F.; SKINNER, A.F.; REGULLA, D.F.; NAGY, V.; MCLAUGHLIN, W.L.; EATON, G.R.; EATON, S.S.
1996 ESR Dosimetry and Applications: Proceedings of the 4th International Symposium. *Appl. Radiat. Isot.* 47 (11/12), Pergamon, Inglaterra.
- IKEYA, M.
1988 Dating and Radiation Dosimetry with Electron Paramagnetic Resonance. *Magnetic Resonance Review*, 13: 91-134.
1993 *New Applications of ESR: Dating, Dosimetry and Microscopy*. Scientific World, New Jersey.
- IKEYA, M.; BAFFA FILHO O.; MASCARENHAS S.
1984 ESR Dating of Cave Deposits from Akyoshidô Cave in Japan and Diabo Cavern in Brazil. *J. Speleol. Soc. Japan* 9:58-67.
- LEUTE, U.
1980 *Archaeometry: An introduction to physical methods in archaeology and history of art*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Alemanha.
- MASCARENHAS, S.; BAFFA FILHO O.; IKEYA, M.
1982 ESR Dating of Human Bones from Brazilian Shell-Mounds (Sambaquis). *Am. J. Phys. Anthropology* 59:413-417.
- SCHRAMM, D.U.; ROSSI, A.M.
1996 Electron spin resonance (ESR), electron nuclear double resonance (ENDOR) and general triple resonance of irradiated biocarbonates. *Appl. Radiat. Isot.* 47(11/12):1443-1458.
- SILVEIRA, F.A.M.; BAFFA, O.
1995 Lyluminescence and ESR measurements on Alanine and Sucrose Dosimeters. *Appl. Radiat. Isot.* 46(8):827-830.
- WERTS, J.E.; BOLTON, J.R.
1972 *Electron spin resonance: elementary theory and practical applications*. McGraw-Hill, Nova York.