

Medida da Difusão de Fluidos em Sólidos Amorfos por Atenuação de Raios Gama

Prof. CARLOS ROBERTO APPOLONI

Prof. ANTONIO TANNOUS

I – INTRODUÇÃO

É bastante extenso o número de aplicações possíveis para os raios gama. As utilizações baseadas em suas propriedades de interação são bem conhecidas. Por exemplo, o melhoramento genético em que sementes ou espécimes são submetidos à radiação para provocar mutações e a subsequente seleção dos mutantes de interesse. Outra importante aplicação é o tratamento de tumores ou seja, uma destruição, pela incidência de raios gama de energia e intensidade adequadas. Nestes dois exemplos as propriedades de alteração de um sistema pelos raios gama é que foram as mais exploradas. Uma outra classe de utilização é o fato de que em sistemas não-vivos os raios gama podem ser utilizados para o estudo da estrutura interna do sistema sem alterá-lo, ou seja, medidas não destrutivas de suas propriedades. Neste caso enquadra-se a gamagrafia, já extensamente usada na indústria e na engenharia no controle de qualidade, de processos industriais, exame interno de estruturas, etc... Outra importante área de uso é o estudo de sólidos amorfos, solos por exemplo, em que requer determinar seja em laboratório, seja no campo, a dinâmica do fluxo de água na terra, medindo as características do solo em questão sem destruir o sistema.

RESUMO

No presente trabalho discute-se o formalismo teórico e o procedimento experimental para o estudo do movimento de fluidos em sólidos amorfos por atenuação de raios gama. Apresenta-se também um breve estudo experimental da difusão de água em concreto, comparando-se qualitativamente com estudo teórico e experimental da difusão de água em solo do tipo Cerrado.

ABSTRACT

This article presents theoretical and experimental procedure used in the study of fluid diffusion in amorphous solids by gamma ray attenuation. It is also presented a brief experimental study of water diffusion in concrete, qualitatively comparing with a theoretical and experimental study of water diffusion in Cerrado soil.

II – A INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA (JO 74)

Quando um feixe de radiação monoenergética interage com a matéria, a sua intensidade diminui, seguindo a lei do decaimento exponencial, Lei de Beer, como segue

$$I = I_0 e^{-\mu \chi \rho} \quad (1)$$

onde

I_0 = intensidade do feixe incidente
 I = intensidade do feixe emergente
 μ = coeficiente de atenuação de massa do meio absorvedor para a energia do gama considerado
 χ = espessura do meio absorvedor
 ρ = densidade do meio absorvedor

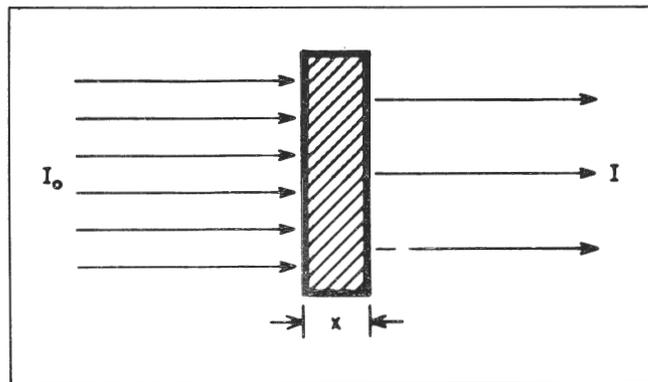


FIG. I – Diagrama ilustrativo da redução da intensidade da radiação por um meio absorvedor de espessura x

O coeficiente de atenuação de massa μ , depende do número atômico do meio absorvedor e da energia da radiação utilizada e representa os vários processos físicos que ocorrem quando o raio gama interage com a matéria. A diminuição da intensidade da radiação em relação à espessura do meio absorvedor deve-se a três tipos principais de interação da radiação pela matéria que são:

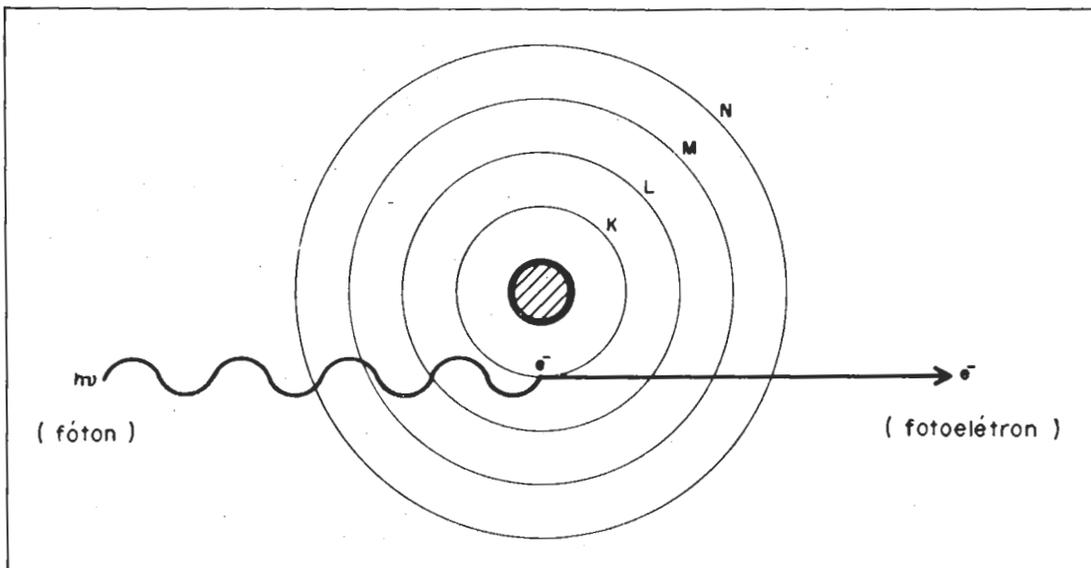
- a) Efeito fotoelétrico
- b) Espalhamento Compton
- c) Produção de pares

a) EFEITO FOTOELÉTRICO

Este tipo de absorção ocorre para radiação de energia entre 10 KeV e 100 KeV predominando com maior percentual em relação aos outros tipos de interação para energias entre 10 KeV e 50 KeV.

Se um fóton de energia $h\nu$ em uma "colisão" com um átomo, transfere esta energia totalmente a um elétron situado em um dos níveis mais internos do átomo, este elétron é arrancado do átomo e sai em alta velocidade. (fig. II) Este processo é uma interação fotoelétrica, o elétron arrancado é chamado de fotoelétron e o raio gama incidente desaparece, ou seja, é retirado do feixe incidente.

FIG. II –
Diagrama ilustrativo do efeito Fotoelétrico. Este efeito ocorre mais frequentemente com elétron em níveis mais internos do átomo, onde um fóton transmite toda sua energia para arrancar um elétron do átomo (fotoelétron)



A energia cinética do fotoelétron (T) é dada por:

$$T = h\nu - h\nu_0 \quad (2)$$

onde

$h\nu$ = energia do fóton incidente no átomo

$h\nu_0$ = energia de ligação do elétron ao átomo.

O fotoelétron pode perder sua energia em uma pequena espessura da matéria

absorvedora por processos diferentes como:

radiação de freiamento (bremsstrahlung), ionização, excitação, quebra de vínculo de moléculas, etc...

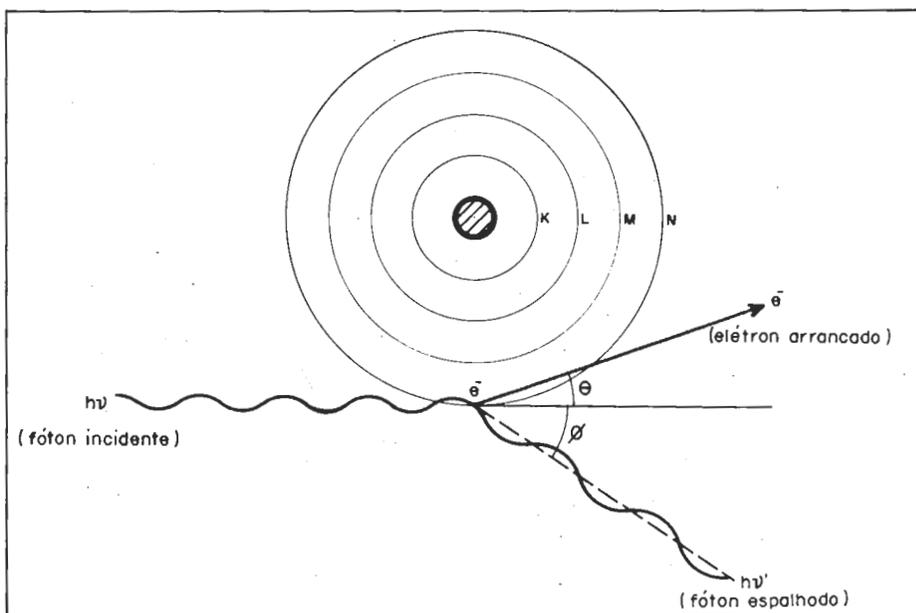
b) ESPALHAMENTO COMPTON

O espalhamento Compton ocorre na interação da radiação com elétrons (dos níveis mais externos do átomo), quando as energias utilizadas estão acima de

50 KeV, mas predominando em maior percentual em relação aos outros tipos de absorção para energias entre 60 KeV e 20 MeV.

Quando um fóton de energia $h\nu$, colide com um elétron livre, transferindo parte de sua energia ao elétron, esse é arrancado do átomo e o fóton agora de energia $h\nu' < h\nu$ é espalhado em outra direção, ou seja retirado da direção do feixe incidente. (fig. III).

FIG. III –
Diagrama ilustrativo do Espalhamento Compton. Esta interação ocorre em maior probabilidade com elétrons livres, onde um fóton transfere parte de sua energia para arrancar um elétron e o fóton é espalhado com energia menor que a incidente



O elétron arrancado perde sua energia da mesma forma que o fotoelétron (a) e o foton espalhado interage com outros átomos pelo mesmo processo (efeito fotoelétrico) dependendo do valor de $h\nu'$. Isto é como se $h\nu'$ fosse um novo foton incidente.

A energia do foton espalhado ($h\nu'$) pelo efeito Compton, é dada por

$$h\nu' = h\nu \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{0,511}(1 - \cos \phi)} \quad (3)$$

onde $h\nu'$ e $h\nu$ são dados em MeV.

c) PRODUÇÃO DE PARES

Ocorre próximo ao núcleo do átomo quando a energia do foton incidente for maior que 1,02 MeV, predominando ainda em relação aos outros tipos de absorção da radiação para energias acima de 20 MeV.

Quando um foton de energia $h\nu > 1,02$ MeV passa nas proximidades do núcleo do átomo e é submetido ao forte campo nuclear, o foton desaparece, surgindo um positron (e^+) e um elétron (e^-) (fig. IV)

O positron produzido, aniquila-se com um elétron livre, emitindo dois fotons de energias 0,511 MeV cada um, que saem em direção opostas (Fig. V).

A energia de 0,511 MeV equivale à energia de repouso do elétron ou à transformação de sua massa em energia de um foton.

Os fotons formados pelo aniquilamento, vão interagir com outros átomos por absorção Compton ou efeito fotoelétrico.

A energia cinética com que o elétron e o positron saem do átomo depende de quanto $h\nu$ é maior que 1,02 MeV. O e^+ recebe metade desta energia em excesso e o e^- a outra metade. O elétron (e^-) produzido na produção de pares por sua vez, perde a energia cinética pelos mesmos processos do fotoelétron (a).

III – ESTUDO DA UMIDADE EM SÓLIDOS AMORFOS

1. Difusão da água

No escoamento unidimensional através de uma coluna vertical homogênea

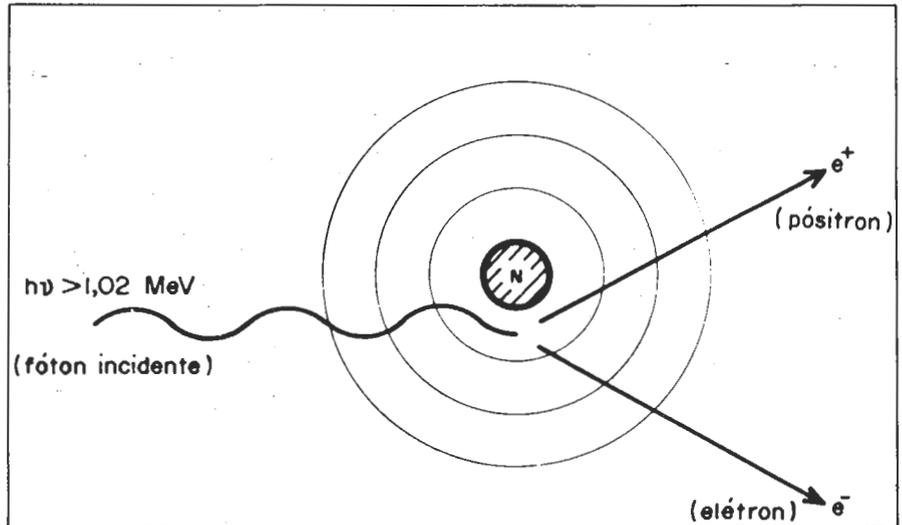


FIG. IV – Diagrama ilustrativo da produção de pares, onde a radiação incidente é absorvida pela produção, na região do núcleo, de um positron e um elétron

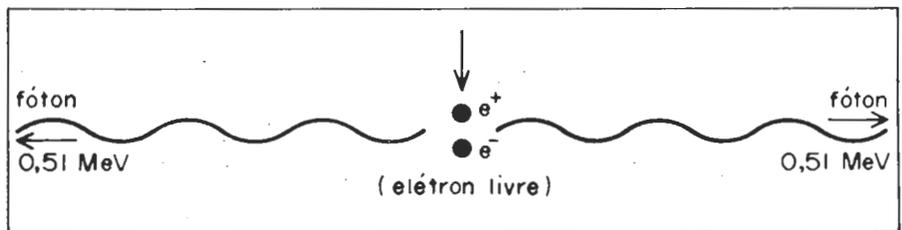


FIG. V – Diagrama ilustrativo do aniquilamento de um positron com um elétron, produzindo dois fotons (cada um de energia equivalente à energia de repouso do elétron)

de solo não saturado, a equação diferencial para a para a variação da umidade numa instante t e posição z é:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[D(\omega) \frac{\partial \omega}{\partial Z} + K(\omega) \right] \quad (4)$$

$$\text{onde: } \omega = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_S - \theta_0} \quad (5)$$

θ é a umidade para um dado instante de tempo e posição
 θ_0 é a umidade no instante inicial
 θ_S é a umidade de saturação

Z é a coordenada de posição vertical
 $K(\omega)$ é a condutividade hidráulica do solo
 $D(\omega)$ é a difusividade da água no solo

A solução desta equação nos dará as funções $\omega = \omega(z, t)$ (perfil de umidade) e $q = q(t)$ (profundidade de penetração) em função de três constantes (D_0 , K_0 e β) características do solo, no caso de modelos exponenciais para condutividade e difusibilidade (Co 77):
 $D = D_0 \exp(\beta \omega)$
 $K = K_0 \exp(\beta \omega)$

$$\omega = \begin{cases} \frac{1}{\beta} \ln \left[(e^{\beta \theta} - 1) \left(1 - \frac{Z}{q} \right)^2 + 1 \right] & p/Z < q \\ 0 & Z > q \end{cases}$$

$$q = \left[\frac{2D_0}{\gamma(\beta)} F(\beta) \right]^{1/2} t^{1/2} + \frac{2K_0 C(\beta)}{3\gamma(\beta)} t + \dots$$

Assim, a caracterização do solo deve ser feita pela medida das constantes D_0 , K_0 e β através das curvas experimentais $\omega(Z, t)$ e $q(t)$.

2. Determinação da umidade θ

No caso de atenuação de um feixe monoenergético por uma amostra constituída de duas substâncias, por exemplo, água (índice a) e sólido amorfo (índice s), a equação de atenuação, a partir (1) fica:

$$I = I_0 e^{-x(\mu_s \rho_s + \mu_a \theta)} \quad (8)$$

onde: θ é a umidade percentual em volume ou fração volumétrica da água no sólido

μ_s e μ_a são respectivamente os coeficientes de atenuação de massa do sólido e da água para a energia do gama considerado.
 ρ_s é a densidade do sólido amorfo.

Conhecendo-se $\mu_s \rho_s$ e μ_a , medindo-se para uma dada espessura x do sólido amorfo os valores de I e I_0 temos que:

$$\theta = \frac{1}{\mu_a} \left(\frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I} - \mu_s \rho_s \right) \quad (9)$$

IV – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. Medida do coeficiente de atenuação de massa e da umidade.

Como vimos no item III.2, é essencial o conhecimento dos valores de μ_s e μ_a . Isto é feito medindo-se a absorção

de gamas em cada material separadamente e usando-se a lei de Beer (1). A partir dela temos que:

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = \mu \rho \cdot x$$

variando-se a espessura x , medindo o I correspondente, graficando-se

$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$ por x obteremos uma reta

cujo coeficiente angular será o produto $\mu \cdot \rho$

Sabendo-se os valores dos coeficientes de absorção de massa, como vimos anteriormente, para obter o perfil de umidade medimos a intensidade do feixe emergente I , para uma amostra de espessura x em que a umidade está variando no tempo. Assim medimos em várias posições da amostra a evolução temporal da intensidade I obtendo através de (9) a função $\theta = \theta(z, t)$

Em certos casos há uma dependência entre μ e θ , sendo que então devem ser determinados simultaneamente.

Não trataremos aqui deste caso em que métodos experimentais específicos (Fe 74) também já são usados.

2. Arranjo experimental

O equipamento necessário para tais tipos de medidas consta basicamente de:

- a – detector de raios gama
- b – mesa de medidas para colocação de amostras
- c – fonte de raios gama

Como o coeficiente de atenuação de massa (μ) depende da energia do gama utilizado, é importante que a intensidade do feixe seja medida para uma certa energia (pequeno intervalo de frequência) de raios gama. Podemos usar por exemplo um detector Geiger, mas além da sua baixa eficiência gama, as medidas feitas conterão gamas de várias energias, uma vez que não teremos discriminação em energia e portanto estaremos determinando um μ médio. Essas medidas apresentarão erros que, dependendo do caso, poderão invalidar os resultados.

O melhor sistema é portanto o uso de um detector que discrimine a energia do gama contado, como por exemplo um detector de NaI. Teremos assim o número de gamas detetados em função de sua energia, calculando tudo para uma mesma energia conhecida.

A seguir apresentamos um diagrama do sistema eletrônico atualmente montado no Departamento de Física da FUEL. (fig. VI)

Através do mono-canal podemos selecionar uma “janela” (ou intervalo) de energia de raios gama e contar a intensidade do feixe que passa pela amostra, procedendo depois os cálculos anteriormente descritos.

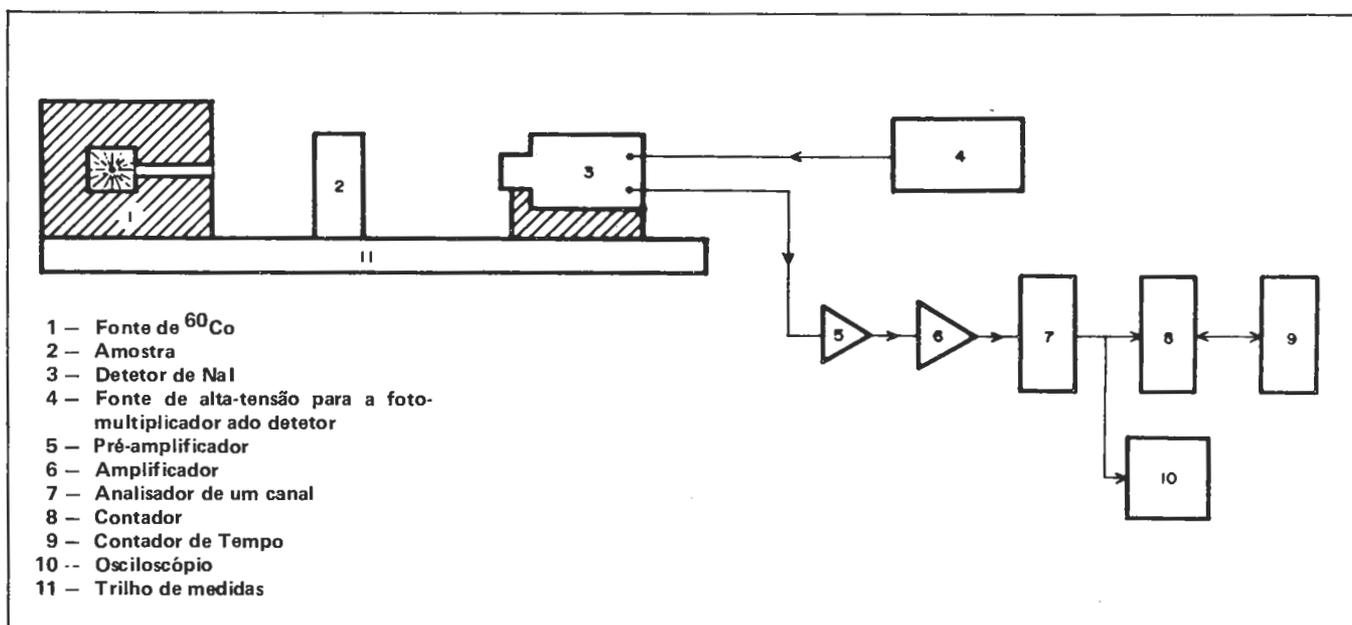


FIG. VI – Esquema do Sistema eletrônico para medidas de absorção gama, atualmente montado no Departamento de Física da FUEL

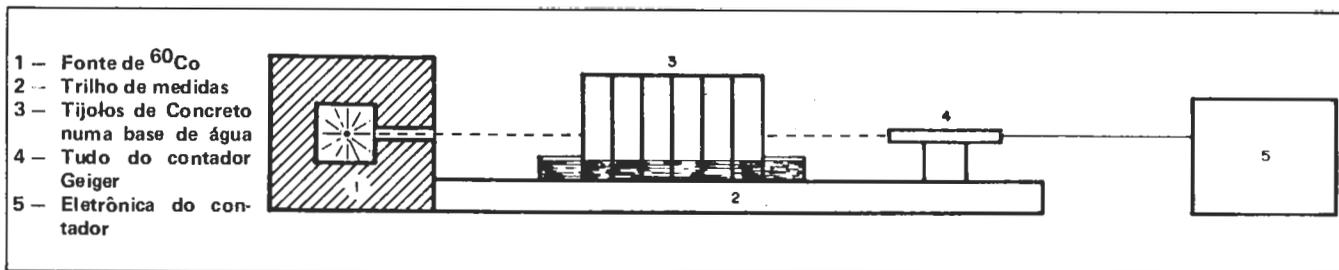


FIG. VII - Esquema do sistema de detecção de radiação utilizado para obter os dados do presente trabalho

3. Medida da variação da umidade em concreto

Como exemplo do tipo de medidas descrito apresentamos a curva de variação da umidade com o tempo de um conjunto de tijolos de concreto. Mediu-se a difusão vertical da água a partir da base colocada em umidade saturada 100%. O ponto de medida situou-se na meia altura e meia largura no bloco de concreto. ($30 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$).

As medidas foram efetuadas com Contador Geiger (Fig. VII) e os parâmetros determinados para o

concreto foram:

$$\begin{aligned} \rho &= 2.47 \pm 0.18 \text{ g/cm}^3 \\ \mu &= 0.069 \pm 0.005 \text{ cm}^2/\text{g} \\ x &= 30 \text{ cm} \end{aligned}$$

A figura VIII mostra os dados experimentais obtidos para a evolução da umidade com o tempo a partir de (9) sendo que normalizamos os dados de forma que a medida inicial ($t=0$) corresponde a $\theta = 0 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. A umidade inicial medida foi $\theta = 18,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. A figura VIII mostra portanto o aumento de umidade em relação a θ_0 .

Foi também efetuado um ajuste teórico dos dados com uma curva tipo "saturante". Por meio do método dos mínimos quadrados determinou-se o conjunto de parâmetros para curva que resultava no menor valor do χ^2 -quadrado. Os resultados foram os seguintes:

$$\theta = \theta_s (1 - e^{-\beta t}) \quad (10)$$

com $\theta_s = 0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

$$\beta = 1.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$$

qualidade do ajuste: χ^2 por ponto 0.85

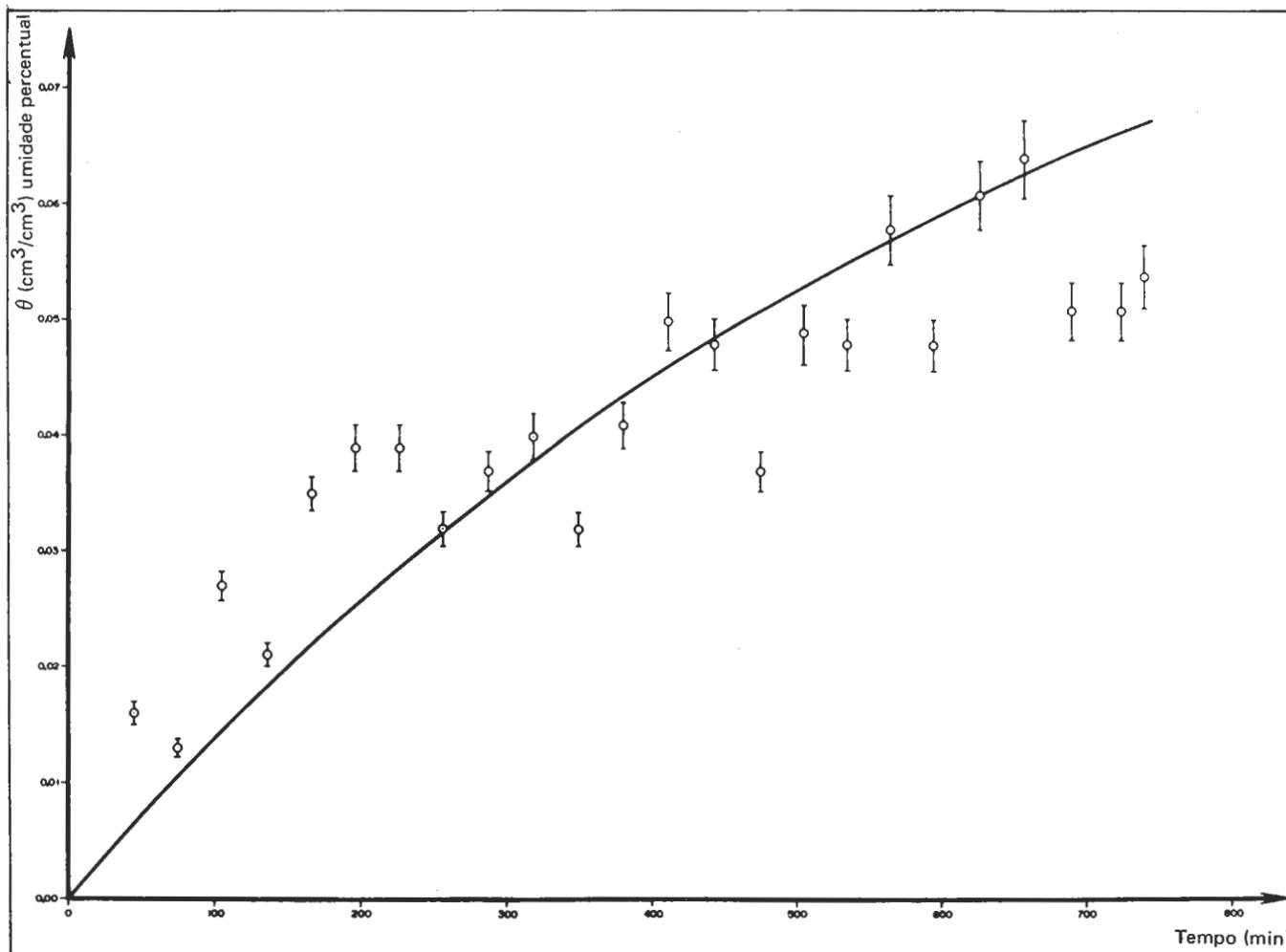


FIG. VIII - Gráfico dos dados experimentais da variação da umidade percentual com o tempo, em concreto. A curva contínua tem a forma $\theta = \theta_s (1 - e^{-\beta t})$, onde $\theta_s = 0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ e $\beta = 1,5 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$, e representa um ajuste empírico dos dados

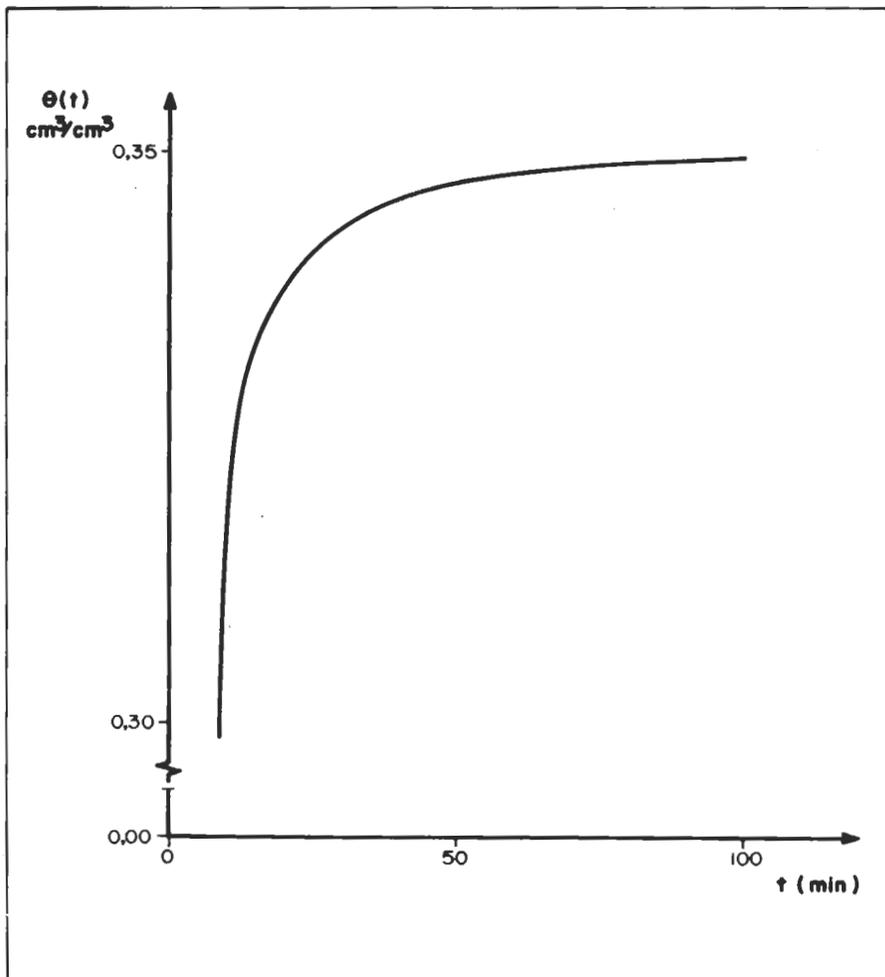


FIG. IX – Gráfico mostrando o ajuste teórico da variação da umidade com o tempo em solo tipo Cerrado.

V – CONCLUSÕES

Este trabalho visou colocar sucintamente a teoria básica e algumas equações relacionadas com o estudo do movimento de fluídos em sólidos amorfos através da atenuação gama. Tais estudos permitem a determinação de parâmetros físicos importantes para o conhecimento da penetração da água no solo, porosidade de sistemas não homogêneos etc...

Mostramos também o procedimento experimental correlacionado, exemplificando com a medida do movimento de água em um bloco de concreto. Neste caso foi determinada experimentalmente uma equação para a evolução da umidade com o tempo na forma exponencial ($\theta = \theta_s (1 - e^{-\beta t})$). Para solos tal tipo de comportamento já fora observado experimentalmente e ajustado teoricamente (Co 78) por um modelo do tipo descrito no item III.1. A figura IX mostra o resultado obtido para a difusão da água em solo tipo Cerrado com $\rho_s = 1.56 \text{ g/cm}^3$, $\theta_0 = 0.031 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $\theta_s = 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $\alpha = 5,20 \text{ cm/min}^{1/2}$, $\beta = 15.38$ e $x = 5 \text{ cm}$. Podemos comparar o tipo de comportamento de $\theta(t)$ do solo tipo Cerrado com nossas medidas no concreto e verificar que à parte das diferenças devido à composição dos sistemas e dos valores de θ_0 e θ_s , tratam-se de fenômenos de características físicas equivalentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COUTINHO JUNIOR, G. Determinação da difusividade e da condutividade de solo não saturado através de dados de infiltração vertical. *Científica*, 4(1): jan. 1976.

... Infiltração horizontal de água em solos não saturados, perfil de Ritz. In: ENCONTRO DE ESCOAMENTO

EM MEIOS POROSOS. 5o., Rio de Janeiro, 1977. *Anais*. Rio de Janeiro, COPPE, 1977. v. 2.

FERRAZ, Epaminondas S. de Barros. Determinação simultânea de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do ^{137}Cs e ^{241}Am .

Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1974. Tese (livr. doc.) Esc. Sup. de Agric. Luiz de Queiroz. Piracicaba.

JOHNS, Harold Elford. *The physics of radiology*. 3.ed. Illinois, Charles C. Thomas, 1974. 788 p.