



COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

DIRETORIA EXECUTIVA 1

DEPARTAMENTO DE INSTALAÇÕES  
E MATERIAIS NUCLEARES

ANÁLISE DE SEGURANÇA EM REPOSITÓRIOS  
DE SUBSUPERFÍCIE

MODELOS MATEMÁTICOS E DISPERSÃO HIDRODINÂMICA

Junho/85

# ANÁLISE DE SEGURANÇA DE REPOSITÓRIOS

## DE REJEITOS RADIOATIVOS

### APRESENTAÇÃO

O desenvolvimento do cronograma de inspeções da Divisão de Instalações Nucleares, principalmente nos anos de 1984/85 vem demonstrando a necessidade cada vez maior de se construir e licenciar um local apropriado à disposição final dos rejeitos radioativos. No entanto, como é do conhecimento geral, a análise de segurança e o licenciamento dos repositórios são processos multi-diciplinares que envolvem extensos períodos de estudo para a seleção de um local apropriado.

Considerados esses fatos, a Divisão de Instalações Nucleares do DIN decidiu iniciar um projeto amplo que visa principalmente definir uma metodologia de análise de segurança e licenciamento dessas instalações para a disposição de rejeitos. Esse projeto consta de 3 etapas principais distribuídas da seguinte forma:

#### 1a. Etapa - Metodologia para Análise de Segurança

Essa fase visa definir:

- a) Metodologia de análise de segurança.
- b) As etapas a serem cumpridas para a consecução dos objetivos
- c) A base de dados necessária para a análise de segurança.

#### 2a. Etapa - Desenvolvimento de Modelos Matemáticos e da Base de Dados Necessária à Análise de Segurança.

Nessa etapa os objetivos são os seguintes:

- a) Desenvolvimentos de modelos capazes de representar o sistema repositório-geosfera-biosfera.
- b) Desenvolvimento de uma estrutura capaz de obter, processar e utilizar os dados necessários à análise de segurança dos repositórios de subsuperfície.

3a. Etapa - Padronização dos Processos de Análise de Segurança e Licenciamento de Repositórios

Nessa etapa deverá ser desenvolvido um procedimento padrão para a análise de segurança e os critérios para a aceitação de sítios para repositórios de rejeitos radioativos.

Rio de Janeiro, 14 de Junho de 1985

*José Mauro Esteves dos Santos*  
JOSE MAURO ESTEVES DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS

MATEMÁTICOS E DA BASE DE

DADOS NECESSÁRIA A ANÁLISE

DE SEGURANÇA

JOSÉ MAURO ESTEVES DOS SANTOS

PAULO FERNANDO LAVALLE HEILBRON FILHO

# I N D I C E

I	-	INTRODUÇÃO .....	1
II	-	DISPERSÃO HIDRODINÂMICA .....	3
		2.1 - Introdução .....	3
		2.2 - Desenvolvimento Matemático .....	3
		2.3 - Condições de Contorno .....	5
		2.4 - Soluções da Equação .....	6
III	-	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	9
		3.1 - Construção de Equipamentos .....	9
		3.2 - Desenvolvimento dos Experimentos .....	9
IV	-	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	13
		4.1 - As Experiências Realizadas .....	13
		4.2 - Resultados .....	14
		4.3 - Determinação do Coeficiente de Dispersão .....	15
		4.4 - Análise dos Resultados .....	16
V	-	SEGURANÇA RADIOLÓGICA NOS EXPERIMENTOS .....	21
		5.1 - Manipulação das Amostras .....	21
		5.1.1 - Cálculo da Dose Equivalente na Manipulação do Traçador .....	21
		5.2 - Descarte do Traçador no Esgoto .....	23
VI	-	CONCLUSÃO .....	25
VII	-	BIBLIOGRAFIA .....	27

**ANEXOS**

<b><u>ANEXO I</u></b> - Programa para o Ajuste do Coeficiente de Dispersão Hidrodinâmica .....	29
<b><u>ANEXO II</u></b> - Nomenclatura .....	30
<b><u>ANEXO III</u></b> - Cálculo de $V_2$ Para Um Meio Poroso .....	30
<b><u>ANEXO IV</u></b> - Montagem Experimental - Fotografias .....	40

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS E DA  
BASE DE DADOS NECESSÁRIAS À ANÁLISE DE SEGURANÇA

I - INTRODUÇÃO

Conforme estabelecido nas diretrizes gerais do Programa de Análise de Segurança de Repositórios de Subsuperfície os objetivos desse trabalho são:

- a) Desenvolvimento de modelos para representar o sistema repositório-geosfera-biosfera.
- b) Desenvolvimento de uma estrutura capaz de obter, processar e utilizar os dados necessários à análise de segurança de repositórios de subsuperfície.

Para cumprimento da primeira-etapa (a) foi criado um grupo de trabalho com o Programa de Engenharia Mecânica da Coordenação de Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ para o desenvolvimento de um aparato experimental capaz de medir uma série de parâmetros necessários à validação dos modelos matemáticos. Esses grupos de estudos iniciou seus trabalhos em maio de 1984, cumprido um cronograma que resultou na montagem e operação de um laboratório para determinação do coeficiente de dispersão hidrodinâmica em meios porosos, parâmetro esse, indispensável ao modelamento temático do comportamento dos radionuclídeos na geosfera.

Considerando que os resultados obtidos e a metodologia desenvolvida nesse período foram plenamente satisfatórios, apresentamos esse relatório que constitui o primeiro passo à consecução global dos objetivos propostos.

## II - DISPERSÃO HIDRODINÂMICA

### 2.1 - Introdução

A dispersão hidrodinâmica é, em termos, gerais, a medida do "espalhamento" que ocorre quando um fluido atravessa um meio poroso. O seu estudo leva à determinação do coeficiente de dispersão hidrodinâmica "D", necessário na solução das equações de transporte de radionuclídeos.

A dispersão hidrodinâmica é governada pela equação:

$$(1) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

que, em coordenadas cilíndricas pode ser escrita como:

$$(2) \quad \frac{\partial C}{\partial t} + v_r \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial C}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} =$$

$$D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + D_t \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right] + D_a \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \theta^2}$$

O termo da esquerda é o termo convectivo e o termo da direita, o difusivo. O Anexo II apresenta a terminologia empregada em cada uma das equações.

### 2.2 - Desenvolvimento Matemático

Considerando-se que o problema será tratado em um leito cilíndrico, preenchido com um meio poroso, onde a água percolarà a baixas velocidades e baixo número de Reynolds, o problema pode ser considerado unidirecional. Assim sendo, a velocidade axial em Z variará apenas com o raio r, isto é:

$$(3) \quad v_{\theta} = v_r = 0$$

$$(4) \quad v_z = f(r)$$

Considerando-se ainda que a concentração não variará com  $\theta$  a equação (2) pode ser escrita como:

$$(5) \quad \frac{\partial C}{\partial t} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + D_t \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right]$$

Tirando-se a média em relação à seção transversal ao escoamento, já que o detector a ser utilizado na experiência nos fornece o valor da concentração total na seção para cada  $Z$ , tem-se:

$$(6) \quad \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \frac{\partial C}{\partial t} 2\pi r dr + \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v_z \frac{\partial C}{\partial z} 2\pi r dr = \\ = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} 2\pi r dr \\ + \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R D_t \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right] 2\pi r dr$$

Usando-se a notação  $\bar{C}$  para a concentração média,

$$(7) \quad \bar{C} = \int_0^R C 2\pi r dr \quad \text{tem-se:}$$

$$(8) \quad \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{v}_z \bar{C}) = D_1 \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} + \frac{2D_t}{R^2} \left[ r \left( \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right) \right]_0^R$$

Como as paredes das colunas são impermeáveis e consequentemente o fluxo dispersivo é nulo, tem-se que:

$$(9) \left[ \frac{\partial \bar{C}}{\partial r} \right]_{r=R} = 0$$

Assim:

$$(10) \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C} V_z}{\partial z} = D_1 \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2}$$

Como  $V_z$  varia apenas com  $r$  e não com  $z$  tem-se:

$$(11) \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{V}_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = D_1 \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2}$$

A velocidade  $V_z$  pode ser obtida das equações hidrodinâmicas ou experimentalmente através da instalação de um rotâmetro na saída do leito. Devido as dificuldades matemáticas envolvidas na solução da equação do momento linear para um meio poroso, conforme descrito no Anexo III, decidiu-se pela colocação do rotâmetro.

### 2.3 - Condições de Contorno

As condições de contorno adequadas ao problema são:

$$a) \bar{C} = 0 \quad \text{em} \quad \begin{matrix} t = 0 \\ 0 < z < \infty \end{matrix}$$

ou seja, a concentração do traçador, no leito, radioativo no início do experimento é zero.

$$b) \bar{C} = C_0 \delta(t) \text{ em } 0 \leq t < \infty ; z=0$$

ou seja a injeção de traçador no leito é um pulso

$$c) \bar{C} = 0 \quad 0 \leq t < \infty \quad z \rightarrow \infty$$

ou seja não deverá haver traçador radioativo na saída do leito

A solução da equação (11) foi feita por meio das transformadas de Laplace, já que o método de separação de variáveis leva a solução trivial.

#### 2.4 - Solução da Equação

Reescrevendo a equação (11) tem-se:

$$(11) \quad \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{v}z \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = D1 \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação (11),

$$(12) \quad s \bar{\bar{C}} - 0 = -\bar{v}z \frac{\partial \bar{\bar{C}}}{\partial z} + D1 \frac{\partial^2 \bar{\bar{C}}}{\partial z^2} \text{ onde,}$$

$$(13) \quad \bar{\bar{C}} = \mathcal{L}(\bar{C}) = \bar{\bar{C}}(s, z)$$

O valor 0 em (12) vem da transformada de Laplace da condição inicial, ou seja:

$$(14) \quad \bar{\bar{C}}(0, z) = 0$$

Assim:

$$(15) \frac{d^2 \bar{C}}{dz^2} - \frac{\bar{V}_z}{Dl} \frac{d\bar{C}}{dz} - \frac{s\bar{C}}{Dl} = 0$$

Sendo a equação (15) linear, homogênea e de segunda ordem sua solução é obtida da seguinte maneira:

$$(16) \lambda^2 - \frac{\bar{V}_z}{Dl} \lambda - \frac{s}{Dl} = 0$$

e,

$$(17) \lambda_1 = \frac{\bar{V}_z + (\bar{V}_z^2 + 4 Dl s)^{1/2}}{2 Dl}$$

$$(18) \lambda_2 = \frac{\bar{V}_z - (\bar{V}_z^2 + 4 Dl s)^{1/2}}{2 Dl}$$

$$(19) \bar{C}(s, z) = A(s) e^{\lambda_1 z} + B(s) e^{\lambda_2 z}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace nas condições de contorno e substituindo-as em (15), determina-se A(s) e B(s):

$$(20) \bar{C}(s, 0) = C_0$$

$$(21) \bar{C}(s, \infty) = 0$$

com (20) se obtém B(s) = C<sub>0</sub> e

com (21) se obtém A(s) = 0

Substituindo-se os valores de A(s) e B(s) em (19) tem-se:

$$(22) \bar{C}(s, z) = C_0 \exp \left( \frac{\bar{V}_z - (\bar{V}_z^2 + 4 Dl s)^{1/2}}{2 Dl} z \right)$$

A inversa da transformada de Laplace de (22) é dada por

$$(23) \quad \bar{u}(t, z) = \frac{C_0 z}{(4\pi D t^3)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(\sqrt{z t} - z)^2}{D t}\right]$$

que nos fornece a solução procurada de (11).

### III - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

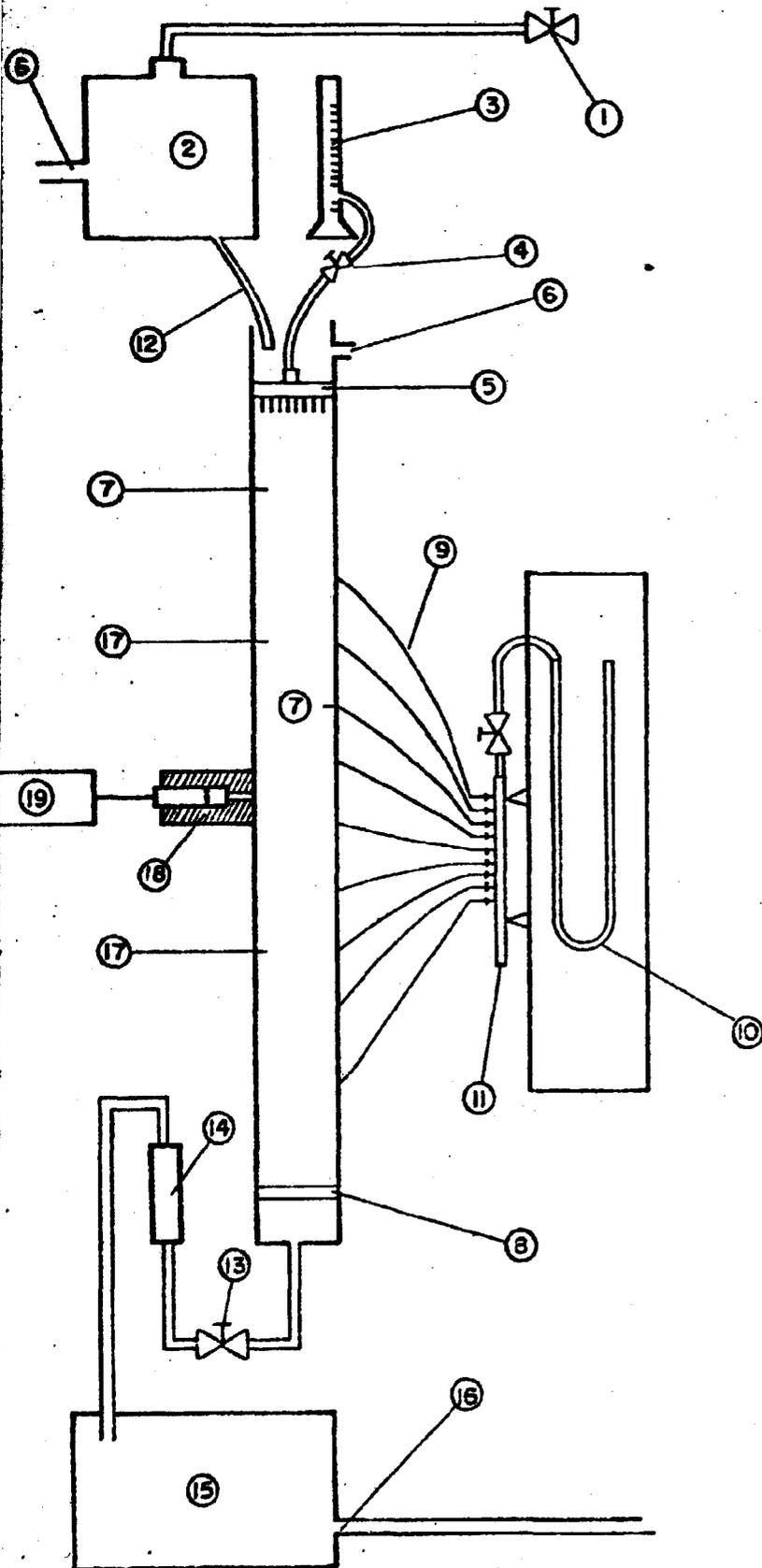
#### 3.1 - Construção dos Equipamentos

O planejamento inicial dos experimentos foi feito com a recuperação e montagem da coluna C-1, com aproximadamente um metro de comprimento e dez centímetros de diâmetro interno. A partir dos testes realizados nessa coluna foram dimensionadas as colunas C-2, C-3 e C-4 conforme mostra a figura 3.1. Além disso, foram projetados e construídos os injetores de água, os medidores de pressão e de fluxo e o sistema controlador de vazão. Um rotâmetro foi instalado na parte inferior das colunas para medidas da velocidade de fluxo. Para as determinações de pressão foi instalado um manômetro em "U" conectado a nove válvulas de admissão. Na parte inferior das colunas foram instalados ainda tanques para a diluição dos radioisótopos até as concentrações permitidas para descarga.

O sistema de detecção montado consiste em um detetor acoplado a um contador de eventos e um registrador gráfico. A figura 3.1 e as fotografias do Anexo IV apresentam o sistema projetado.

#### 3.2 - Desenvolvimento dos Experimentos

Os experimentos consistem de duas partes distintas: a determinação da quantidade inicial de traçador correspondente à concentração inicial injetada e a determinação das contagens cujo processamento leva ao coeficiente de dispersão hidrodinâmica "D".



### LEGENDA

- ① - ENTRADA DE ÁGUA
- ② - RESERVATÓRIO DE NÍVEL COSTAN
- ③ - DEPÓSITO DE TRACADOR
- ④ - ENTRADA DO TRACADOR NO IN-  
TOR.
- ⑤ - SISTEMA DE INJEÇÃO
- ⑥ - EXTRAVASOR
- ⑦ - LEITO
- ⑧ - DISTRIBUIDOR
- ⑨ - TOMADAS DE PRESSÃO
- ⑩ - MANÔMETRO EM U
- ⑪ - SELETOR DE TOMADA  
DE PRESSÃO
- ⑫ - ENTRADA DE ÁGUA NO LEITO
- ⑬ - VÁLVULA REGULADORA DA  
VAZÃO
- ⑭ - ROTÂMETRO
- ⑮ - RESERVATÓRIO PARA  
DILUIÇÃO
- ⑯ - SAIDA
- ⑰ - TOMADAS DE CONCENTRAÇÃO
- ⑱ - DETETOR
- ⑲ - SISTEMA DE DETEÇÃO

FIGURA 3.1 - MONTAGEM EXPERIMENTAL

A determinação da quantidade inicial de traçador em função de sua concentração é feita da seguinte forma:

- a) Uma massa conhecida de traçador é dissolvida em um volume de água também conhecido.
- b) Uma alíquota dessa mistura é colocada num cilindro de calibração contendo o mesmo material que será colocado nas colunas, para o qual se quer determinar o coeficiente de dispersão.
- c) Utilizando-se o mesmo sistema de detecção das colunas, com a mesma geometria, determina-se a taxa de contagem para aquela concentração de traçador previamente conhecida.
- d) Com a taxa de contagem obtida é possível determinar-se a concentração do traçador para qualquer outra taxa que venha a ser obtida durante os experimentos.
- e) Correções para o decaimento radioativo são feitas considerando-se o horário da calibração e o início de cada experiência.

A determinação das contagens e conseqüentemente do coeficiente de dispersão "D" são feitas da seguinte maneira:

- a) Preparação da coluna - A coluna é preenchida e compactada com o material para o qual se quer determinar o coeficiente de dispersão. Em seguida essa coluna é saturada com água.
- b) Controle da velocidade de percolação - Utilizando-se as válvulas controladoras de vazão é estabelecido o fluxo e a velocidade desejadas para a experiência. As válvulas são fechadas até o início do experimento.

- c) Injeção do traçador - Um volume conhecido de traçador, no caso o KBr, é injetado instantaneamente no topo da coluna. Em seguida, as válvulas reguladoras de fluxo são abertas e começa o movimento do material radioativo.
- d) Determinação das contagens - Com a colocação do detetor em tres posições pré-fixadas são medidas as taxas de contagem as quais são transferidas ao controlador de eventos e ao registrador gráfico.
- e) Processamento dos dados - As contagens obtidas são processadas pelo programa apresentado no Anexo V para a obtenção do coeficiente de dispersão hidrodinâmica "D".
- f) Diluição do traçador - Depois de percolar a coluna, o traçador é diluído no tanque colocado na parte inferior do leito até os limites de concentração permissíveis e descartado na rede de esgoto.

## IV - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 - As Experiências Realizadas

A montagem experimental utilizada é apresentada na figura 3.1 e consiste basicamente em um tubo de cilíndrico de acrílico com diâmetro interno de 14,7 cm e 132,5 cm de comprimento preenchido com esferas de vidro de diâmetro médio de 0,051 cm.

O sistema de abastecimento de água é controlado pela válvula (1) que abastece o reservatório de nível constante (2).

O traçador radioativo, colocado no recipiente (3) e o controle da quantidade de material a ser injetado no leito é controlado pela válvula (4), ligada ao sistema de injeção (5) que atua como distribuidor de material radioativo.

A água é injetada no leito, através da conexão (12). O controle da vazão é feito pela válvula (13) e pelo rotâmetro (14), localizados na saída do leito. Durante o experimento podem ser feitas nove tomadas de pressão através das ligações (9) ligadas ao seletor de medida de pressão no leito (12), o qual, por sua vez, está conectado a um manômetro em U (10).

O material radioativo, depois de percorrer o leito, é diluído no tanque (15) antes de ser descartado no esgoto.

Durante o experimento são feitas três medidas de concentração representadas em (17). O detetor utilizado é do tipo cintilador de NaI (Tl) da SPRAT, modelo 006.

#### 4.2 - Resultados

Conforme esclarecido anteriormente o traçador utilizado foi o KBr ativado. Um total de doze amostras foram ativadas no reator do Instituto de Energia Nuclear - IEN.

As características do material irradiado foram as seguintes:

Amostra	Massa (s)
M 1	2,117
M 2	2,178
M 3	2,158
M 4	2,208
M 5	2,017
M 6	2,220
M 7	2,078
M 8	2,185
M 9	2,010
M 10	2,082
M 11	2,105
M 12	2,134
Massa total -	25,492 g KBr
Tempo de irradiação -	2:30 minutos
Data da irradiação -	5/3/85 (terminada às 12:31h)
Peso do bromo -	17,275 g
Fluxo de neutrons térmicos -	$10^9$ n/cm <sup>2</sup> .s
Potência do reator -	170 watts
Meia-vida do Br <sup>82</sup> -	36.7 horas
Secção de choque do Br <sup>82</sup> -	1,53 barn
Constante de decaimento -	$5.2462 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Atividade do material após a irradiação - 195  $\mu\text{Ci}$

Utilizando-se as amostras irradiadas o aparato e o procedimento experimental descrito foram obtidos os resultados apresentados na tabela 4.1.

#### 4.3 - Determinação do Coeficiente de Dispersão

Os coeficientes de dispersão hidrodinâmica foram determinados a partir do procedimento matemático desenvolvido e dos resultados experimentais obtidos.

Basicamente o cálculo é feito de maneira que o valor de  $D$  minimize o erro quadrático, isto é a soma dos quadrados das diferenças entre os valores de concentração obtidos experimentalmente e aqueles teoricamente previstos pela equação de dispersão.

Assim,  $DL$  deve minimizar:

$$\iint (C(t,z) - CE(t,z))^2 dzdt = \text{mínimo}$$

O método de Newton foi utilizado para determinação de  $D$ , da seguinte forma:

1- Considera-se um valor para  $DL$

2- Calcula-se  $\frac{d}{dDL} \sum \sum (C(t,z) - CE(t,z))^2$

3- Testa-se o valor calculado para verificar se este é o menor que o erro desejado. No caso positivo, o resultado é impresso, do contrário o programa prossegue.

4- Calcula-se o valor de  $\frac{d^2}{dDL^2} \sum \sum (C(t,z) - CE(t,z))^2$

5- Calcula-se um novo valor de DL com a relação:

$$DL(\text{novo valor}) = DL(\text{anterior}) - \frac{\frac{d}{dDL} \sum \sum (C(t,z) - CE(T,z))^2}{\frac{d^2}{dDL^2} \sum \sum (C(t,z) - CE(t,z))^2}$$

6- O programa retorna ao item (2)

O fluxograma do programa desenvolvido, bem como sua listagem são apresentados no Anexo I.

#### 4.4 - Análise dos Resultados

No planejamento dos trabalhos procuramos, à medida do possível, aproximar as condições experimentais àquelas apresentadas em alguns trabalhos selecionados na literatura. A comparação dos resultados é apresentado na tabela 4.2.

**TABELA 4.1 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

PARÂMETRO	EXPERIMENTO I	EXPERIMENTO II	EXPERIMENTO III	EXPERIMENTO IV
Tempo de contagem (s)	20	20	20	20
Volume Injetado (ml)	10	10	10	10
Vazão (ml/min)	156	102	198	306
Velocidade (cm/s)	0.04163	0.0272	0.0528	0.08165
Atividade Injetada (Ci)	10.08	9.90	9.68	9.50
Taxa de contagem inicial (Co) cps	19476	19124	18692	18342
Material do Meio Poroso	BALOTINE	BALOTINE	BALOTINE	BALOTINE
Fração de Vazios	0.42	0.42	0.42	0.42
Coefficiente de Dispersão (cm <sup>2</sup> /s)	0.00292	0.000917	0.00174	0.00446

VELOCIDADES (cm/s)	COEFICIENTE DE DISPERSÃO (cm <sup>2</sup> /s)	HARLEMAN *	HARLEMAN **
0.0148	-	0.000198	-
0.0261	-	-	0.00171
0.0272	0.0009 1665	-	-
0.0304	-	0.00057	-
0.0406	-	0.00071	-
0.0416	0.0029229	-	-
0.0490	-	-	0.0036
0.0528	0.0017 3866	-	-
0.0710	-	-	0.0055
0.0814	-	0.00172	-
0.0816	0.00446 2695	-	-
0.0937	-	-	0.0073

Tabela 4.2 - Comparação dos resultados

\* HARLEMAN (1) - Porosidade = 0.36; diâmetro da partícula = 0.039 cm  
 \*\* HARLEMAN (2) - Porosidade = 0.40; diâmetro da partícula = 0.092 cm  
 RESULTADOS OBTIDOS - Porosidade = 0.42; diâmetro da partícula = 0.051 cm

Os valores apresentados na tabela 4.2 são também mostrados na figura 4.1.

A figura 4.1 mostra que os resultados obtidos situam-se entre os valores determinados por Harleman (1). Observando-se as diferenças na porosidade e nos diâmetros das partículas podemos considerar que os resultados foram bastante razoáveis. No entanto, algumas dificuldades experimentais ocorreram e merecem ser discutidas. Um dos problemas está relacionado à obtenção de uma porosidade homogênea no leito, o que provoca uma variação na velocidade axial média do fluido. Essa velocidade foi admitida como sendo constante durante os experimentos.

Outro problema ocorrido relacionou-se à colimação do detector que inicialmente foi ajustado para receber radiação de uma faixa muito extensa do leito. Esse fato provocou um aumento irreal na taxa de contagens, maior que a que a esperada para cada posição. Esse problema apresentou alguma dificuldade para ser resolvido, pois, se o detector for muito colimado há necessidade de se injetar uma quantidade de material radioativo maior que a permissível pelas normas de proteção radiológica. Os demais problemas ocorridos foram sendo corrigidos durante as experiências não merecendo maior destaque.

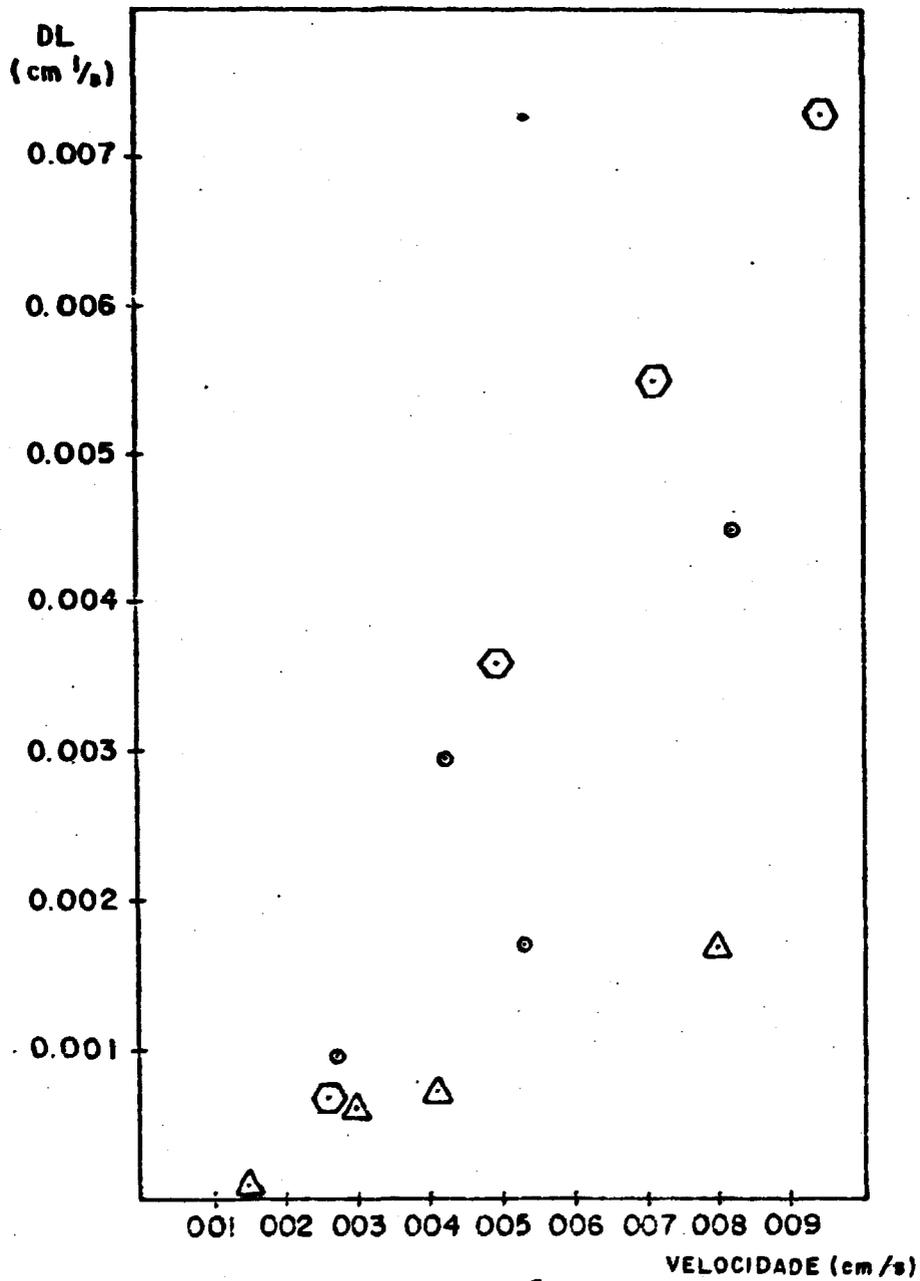


FIGURA 4.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

LEGENDA.

- ⬡ - HARLEMAN \*\*
- - RESULTADOS OBTIDOS
- △ - HARLEMAN \*

## V - SEGURANÇA RADIOLÓGICA NOS EXPERIMENTOS

Em duas fases dos experimentos foi necessária a observação de medidas especiais de proteção radiológica:

- a) Durante o desenvolvimento do experimento e manipulação das amostras.
- b) No descarte do traçador no esgoto.

### 5.1 - Manipulação das Amostras

Conforme esclarecido anteriormente o traçador empregado nos experimentos foi o brometo de potássio (KBr) ativado. A escolha do KBr deveu-se principalmente ao fato que esse composto apresenta um baixo coeficiente de adsorção, não interferindo nos experimentos, e além ser de fácil obtenção no mercado.

#### 5.1.1 - Cálculo da dose equivalente na manipulação do traçador.

O fluxo de raios emitidos por uma fonte é dado por:

$$(5.1) \quad \phi = \frac{nA}{4\pi d^2} \exp(-\Sigma x_0) \frac{\text{desintegrações}}{\text{segundo cm}^2}$$

$\phi$  = fluxo de raios  $\gamma$  (des/s. cm)

$n$  = número raios  $\gamma$  emitidos por desintegração

$A$  = atividade (des/s)

$d$  = distância da fonte (cm)

Considerando-se que para uma fonte colocada de tal forma que o detector, (ou o operador) se situe a uma distância maior que

1,5 vezes a maior dimensão dessa fonte o termo  $\exp(-\Sigma x_0)$  pode ser desprezado e a equação 5.1 torna-se

$$(5.2) \quad \phi = \frac{n A}{4\pi d} \quad (\text{des/seg.cm})$$

que é usada para fontes pontuais

Calculando-se a dose absorvida, temos:

$$(5.3) \quad D = \frac{4.22 \times 10^{-3} \cdot n \cdot E \cdot A \cdot \Sigma_{\text{abs}}}{d^2} \quad \text{rads/h}$$

onde:

D = dose absorvida (rads/h)

n = número de raios  $\gamma$  por desintegração

E = energia dos raios  $\gamma$  (Mev)

A = Atividade (des/s)

$\Sigma_{\text{abs}}$  = seção de choque de absorção macroscópica ( $\text{cm}^{-1}$ )

d = distância da fonte ao detetor (operador) cm

Considerando:

$$n = 3.28$$

$$E = 0.777 \text{ Mev}$$

$$A = 10.08 \text{ } \mu\text{Ci} = 372414 \text{ des/s}$$

d = 30 cm (distância média que o operador fica da coluna, durante os experimentos)

$$D = \frac{4.22 \times 10^{-3} \times 3.28 \times 0.777 \times 372414 \times 4 \times 10^{-5}}{30^2} = 17.79 \times 10^{-5} \text{ rads/h}$$

Como o fator de qualidade para os raios  $\gamma$  é um, a dose equivalente será

$$H = D \times Q$$

$$H = 17.79 \times 10^{-5} \text{ rem/h}$$

$$H = 0.1779 \text{ mrem/h.}$$

Como a dose máxima permissível para 40 horas por semana é cerca de 2.5 mrem/h, o experimento pode ser considerado seguro, para os operadores.

### 5.2 - Descarte do traçador no esgoto

Consideramos a concentração teórica obtida na equação (2.23).

$$(2.23) \quad C(t, z) = \frac{C_0 z}{(4\pi D L t^3)^{1/2}} \exp - \frac{(vz - z)^2}{DLt}$$

Observando que (6.23) é máximo quando o termo exponencial é um temos

$$(5.5) \quad C(\tau, z)_{\max} = \frac{C_0 z}{(4\pi L L \tau^3)^{1/2}}$$

substituindo-se:

$$(5.6) \quad \tau = Z/V \text{ em (6.5)}$$

temos

$$(5.7) \quad C_{\max} = \frac{C_0 v (v)^{1/2}}{(4\pi D L z)^{1/2}}$$

substituindo-se:

$$C_0 = 1.008 \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

$$Z = 132.5 \text{ cm (comprimento total da coluna)}$$

$$D = 0.0020 \text{ (D médio esperado para as experiências)}$$

$$v = 0.04163 \text{ cm/s (medida)}$$

temos:

$$C_{\text{max}} = 4.69 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

que esta acima da concentração máxima permissível estabelecida na Resolução CNEN 6/73, onde o valor estabelecido é  $3 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ . Assim sendo, o traçador é diluído em um tanque de 20 litros. A concentração final fica  $2.3450 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ . Além disso, por precaução adicional, o material é guardado ainda por algumas horas antes de ser descartado.

## VI - CONCLUSÃO

O estudo do comportamento de fluidos em meios porosos é de grande importância quando voltado à problemática dos rejeitos radioativos. Assim sendo e considerando-se que a dispersão hidrodinâmica é um dos principais fenômenos controladores do processo de transporte de radioelementos no solo, o desenvolvimento do "Projeto Migração de Radionuclídeos em Meios Porosos" constitui uma etapa fundamental no estabelecimento de uma sistemática para a análise de segurança dos repositórios de subsuperfície. Como é do conhecimento geral, o acúmulo dos rejeitos radioativos provenientes das diversas aplicações da energia nuclear vem tornando imprescindível a construção de um depósito seguro onde esses materiais possam ser colocados. A segurança desse local, bem como do meio ambiente em suas proximidades dependerá da execução de uma série de etapas que constituem a análise de segurança.

Com todos os objetivos do estudo atingidos, cumpre-nos agradecer à Comissão Nacional de Energia Nuclear, que através de sua Diretoria Executiva I e das diretorias do Departamento de Instalações e Materiais Nucleares e da Divisão de Instalações Nucleares pelo apoio recebido no projeto, compreendendo sua necessidade, mesmo em uma época onde os recursos financeiros para pesquisa vem se tornando escassos. Cabe-nos também agradecer ao "Programa de Engenharia Mecânica, da Coordenadoria de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro que, na pessoa dos professores Raad Qassim e Roberto de Souza não pouparam esforços para a

consecução de todos os nossos objetivos. Agradecemos também a Sra. Maria Lucia da Silva pelo cuidado dispensado na dati lografia do texto final. Com o planejamento, montagem e exe cussão do projeto para o estudo de dispersão hidrodinâmica esperamos ter correspondido ao apoio recebido.

Rio de Janeiro, 14 de Junho de 1985

*Jose Mauro Esteves dos Santos*  
JOSÉ MAURO ESTEVES DOS SANTOS

*Paulo Fernando Lavalle Heilbron Filho*  
PAULO FERNANDO LAVALLE HEILBRON FILHO

## VII - BIBLIOGRAFIA

- 1) Harleman, Mehlhorn and Rumer (March-1963); Dispersion-permeability correlation in porous media - Journal of the Hydraulics Division (Proceedings of the American Society of Civil Engineers).
- 2) Shamir, and Harleman (September-1966); Dispersion in Layered porous media - Journal of the Hydraulics Division (Proceedings of the American Society of Civil Engineers).
- 3) Lenda and Zuber; Tracer Dispersion in Groundwater Experiments - In Isotope Hydrology 1970, pp 619, 641. IAEA - Vienna.
- 4) Kreft and Zuber (January-1979); On the Use of the Dispersion Model of Fluid Flow - International Journal of Applied Radiation and Isotopes - Vol. 30, pp 705,708.
- 5) Taylor (March-1953); Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly through a Tube - Proc. R. Soc. A219, 186.
- 6) Saffman (January-1959) - A Theory of Dispersion in Pores Medium - Journal of Fluid Mechanics - Vol.6, pp 321,349.
- 7) Chen, Mcmilan and Wang (1983); An analytical Solution for Difusion in Packed Beds with Low Bed-to-Particle Diameter Ratios Chemical Engineering Science, Vol. 38, n° 2, pp 257-263.
- 8) Vortmeyer and Shuster (1983); Evaluation of Steady Flow

**Profiles in Rectangular and Circular Packed Beds by a Variational Method - Chemical Engineering Science, Vol. 38, nº 10, pp. 1691-1699.**

- 9) Chandrasckhara, Rudraiah and Nagaray (1980); Velocity and Dispersion in Porous Média - Int. J. Engineering Science. Vol. 18, pp.921-929.
- 10) Jamal, Kamala, Prabhahakara and Nigam (1979) - Complementary Variational Principles for Poiseuille Flow - Journal - Mathematics Phy Science. Vol. 13, nº 5.
- 11) Gopalan and Nigam (1979) - Complementary Variational Principles for Poiseuille Flow - Journal Mathematics Phy Science - Vol. 13, nº 6.
- 12) Hindunja, Sundaresan, Jackson (March-1980) - A Crossflow Model of Dispersion in Packed Bed Reactors - Aiche Journal, Vol. 26, nº 2 pp 271 - 281.
- 13) Santiago (Junho-1969); Tracadores Radioativos - Divisão de Aplicações de Radioisótopos.
- 14) Gardner
- 15) W.Jost - Difusion.

# ANEXO I - PROGRAMA PARA O AJUSTE DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO

```
10 DIM E(35,3),R(35,3),G(35,3),H
(35,3),J(35,3),K(35,3),N(35,
3),O(35,3),D(35,3)
11 DIM S(35,3)
15 GOSUB 510
20 V1 = 0.04163
30 T0 = 160
35 T2 = 1780
40 T1 = 880
60 P = 3
70 C0 = 1
80 I1 = 20
90 X(1) = 12
100 X(2) = 49.6
110 X(3) = 91.6
120 D1 = 0.0029229
130 FOR Z = 1 TO P
140 IF Z = 1 THEN N = 16
150 IF Z = 2 THEN N = 30
160 IF Z = 3 THEN N = 35
170 FOR T = 1 TO N
180 IF Z = 1 THEN T4 = T * I1 +
T0
190 IF Z = 2 THEN T4 = I1 * T +
T1
200 IF Z = 3 THEN T4 = T * I1 +
T2
201 B5 = 200
202 C7 = 19476
203 E(T,Z) = (S(T,Z) - B5) / ( EXP
(0.00000527 * T4) * C7)
210 Z1 = X(Z)
220 A = C0 * Z1 / (((4 * 3.1416 *
(T4 ^ 3)) ^ 0.5))
230 B = - 2 * ((V1 * T4 - Z1) ^
2) / (4 * T4)
240 U = - B / D1
250 PRINT "D1=";D1
260 PRINT "U=";U
270 PRINT "POS(CR)= ";Z1;" TER
(S)= ";T4;" C EXP= ";E(T,Z)

280 R(T,Z) = - (A ^ 2) * (1 / EXP
(- B / D1)) * ((B + D1) / (
D1 ^ 3)) + 2 * E(T,Z) * A *
(1 / EXP (- B / (2 * D1)))
* (D1 ^ 0.5) * (B + D1) / (
2 * D1 ^ 3)
290 R1 = R1 + R(T,Z)
```

```

300 G(T,Z) = (A ^ 2) * B * (1 / .EXP
(- B / D1)) * (B * D1 + 3 *
D1 ^ 2) / D1 ^ 6
310 H(T,Z) = (A ^ 2) * (1 / EXP
(- B / D1)) * (B + 2 * D1) /
(D1 ^ 4)
320 J(T,Z) = - E(T,Z) * A * B *
(1 / EXP ( ABS (B) / (2 * D
1))) * ((B * (D1 ^ (- 4.5))
/ 2) + 5 * (D1 ^ (- 3.5)) /
2)
330 K(T,Z) = - E(T,Z) * A * (1 /
EXP (- B / (2 * D1))) * ((
B * (D1 ^ (- 3.5)) / 2) + 3
* (D1 ^ (- 2.5)) / 2)
340 M(T,Z) = G(T,Z) + H(T,Z) + J(
T,Z) + K(T,Z)
350 R2 = R2 + M(T,Z)
360 O(T,Z) = A * (1 / EXP (- B /
(2 * D1))) / D1 ^ 0.5
370 D(T,Z) = (A ^ 2) * (1 / EXP
(- B / D1)) / D1 - 2 * E(T,
Z) * A * (1 / EXP (- B / (
2 * D1))) / D1 ^ 0.5 + E(T,Z
) ^ 2
380 C = C + O(T,Z)
390 PRINT "C TEORICO=" ;D(T,Z);"
(C-C
E)^2=" ;O(T,Z)
400 NEXT T
410 NEXT Z
420 PRINT "C DIFUSAO=" ;D1;"(C-CE
)^2 MIN=" ;C;"VAL
DER PRI=" ;R1;"VAL DER SEG="
;R2
430 IF ABS (R1) < = 0.00001 THEN
490
440 D1 = D1 - (R1 / R2)
450 R1 = 0
460 R2 = 0
470 C = 0
480 GOTO 130
490 PRINT "COEFICIENTE DE DIFUSA
O=" ;
D1;"VALOR DA SOM
A DE TOD OS (
C-CE)^2=" ;C
491 PRINT
500 GOTO 810
510 S(1,1) = 914

```

513 S(2,1) = 1310  
516 S(3,1) = 1773  
519 S(4,1) = 2366  
522 S(5,1) = 2701  
525 S(6,1) = 2631  
528 S(7,1) = 2465  
531 S(8,1) = 2228  
534 S(9,1) = 2003  
537 S(10,1) = 1914  
540 S(11,1) = 1812  
543 S(12,1) = 1613  
546 S(13,1) = 1488  
549 S(14,1) = 1342  
552 S(15,1) = 1284  
553 S(16,1) = 1274  
556 S(1,2) = 524  
559 S(2,2) = 691  
562 S(3,2) = 858  
565 S(4,2) = 1014  
568 S(5,2) = 1348  
571 S(6,2) = 1547  
574 S(7,2) = 1897  
577 S(8,2) = 1965  
580 S(9,2) = 2086  
583 S(10,2) = 2122  
586 S(11,2) = 2021  
589 S(12,2) = 1839  
592 S(13,2) = 1779  
593 S(14,2) = 1601  
596 S(15,2) = 1553  
599 S(16,2) = 1399  
602 S(17,2) = 1289  
605 S(18,2) = 1191  
608 S(19,2) = 1134  
611 S(20,2) = 1048  
614 S(21,2) = 1025  
617 S(22,2) = 978  
620 S(23,2) = 970  
623 S(24,2) = 863  
626 S(25,2) = 834  
629 S(26,2) = 736  
632 S(27,2) = 772  
635 S(28,2) = 767  
638 S(29,2) = 669  
641 S(30,2) = 644  
644 S(1,3) = 465  
647 S(2,3) = 556  
650 S(3,3) = 679  
653 S(4,3) = 884  
656 S(5,3) = 1004

```

659 S(6,3) = 1284
662 S(7,3) = 1468
665 S(8,3) = 1678
668 S(9,3) = 1778
671 S(10,3) = 1811
674 S(11,3) = 1831
677 S(12,3) = 1795
680 S(13,3) = 1760
683 S(14,3) = 1611
686 S(15,3) = 1598
689 S(16,3) = 1494
691 S(17,3) = 1345
694 S(18,3) = 1209
697 S(19,3) = 1192
700 S(20,3) = 1127
703 S(21,3) = 1086
706 S(22,3) = 929
709 S(23,3) = 939
712 S(24,3) = 884
715 S(25,3) = 769
718 S(26,3) = 771
721 S(27,3) = 738
724 S(28,3) = 712
727 S(29,3) = 682
730 S(30,3) = 687
733 S(31,3) = 560
736 S(32,3) = 586
740 S(33,3) = 570
743 S(34,3) = 515
790 S(35,3) = 534
791 RETURN
810 FOR Z = 1 TO 3
860 PRINT "QUAL E O TITULO DO EI
XD Y"
861 INPUT Y$
870 PRINT "QUAL E O TITULO DO EI
XD X"
871 INPUT X$
872 PRINT "POSICAO (CA) = ";X(Z
)
873 PRINT "VALOR COEF DISPERSAO
= ";D1
880 IF Z = 1 THEN N = 16
890 IF Z = 2 THEN N = 30
900 IF Z = 3 THEN N = 35
920 IF Z = 1 THEN A = I1 + T0
930 IF Z = 2 THEN A = I1 + T1
940 IF Z = 3 THEN A = I1 + T2
950 IF Z = 1 THEN B = N * I1 + T
0
960 IF Z = 2 THEN B = N * I1 + T
1

```

```

970 IF Z = 3 THEN B = N * I1 + T
2
980 E = 20
990 C = 0
1000 D = 0.15
1110 A1 = (D - C) / 20
1120 A2 = C - A1 / 2
1130 A3 = D + A1 / 2
1140 PRINT "* C TEORICA"
1150 PRINT "O C EXPERIMENTAL"
1160 PRINT "EIXO Y"
1170 PRINT Y$;" DE ";C;" A ";D;"
EM INTERVALOS DE ";A1
1180 PRINT TAB( 15);"++++++"
++++++"
1190 FOR X = A TO B STEP E
1191 T = (X - A) / E + 1
1200 Y = E(T,Z)
1201 D = D(T,Z)
1210 IF Y < A2 THEN 1290
1220 IF Y > A3 THEN 1290
1221 IF Y < 0 THEN 1235
1222 PRINT X; TAB( 14);"+"; TAB(
(D - C) / A1 + 15.5);"*"; TAB(
(Y - C) / A1 + 15.5);"o"
1234 GOTO 1240
1235 PRINT X; TAB( 14);"+"; TAB(
(Y - C) / A1 + 15.5);"*"; TAB(
(D - C) / A1 + 15.5);"o"
1240 NEXT X
1250 PRINT
1260 PRINT "EIXO X"
1270 PRINT X$;" DE ";A;" A";B;"
EM INTERVALOS DE ";E
1280 NEXT Z
1281 STOP
1290 PRINT X; TAB( 14);"+
1300 GOTO 1240

```

## ANEXO II

### SÍMBOLOS

- $\partial$  - derivada parcial
- $\nabla$  - Laplaciano
- - retor
- $\Sigma$  - somatório
- Labs - Secção de choque macroscópica
- $\int$  - integral
- $\mathcal{L}$  - transformada de Laplace
- $\Phi$  - fluxo de raios gama
- $\theta$  - posição angular
- $r$  - posição radial
- $Z$  - posição longitudinal
- $R$  - raio do tubo
- $A$  - atividade
- $A_0$  - atividade inicial
- $C$  - concentração
- $C_0$  - concentração inicial
- $C_E$  - concentração experimental
- $\bar{C}$  - concentração média na secção transversal ao escoamento
- $D$  - coeficiente de dispersão
- $D_L$  - coeficiente de dispersão longitudinal
- $D_\theta$  - coeficiente de dispersão angular
- $D_r$  - coeficiente de dispersão radial
- $d$  - distância da fonte
- $m$  - massa
- $n$  - número de gamas por desintegração
- $s$  - relativo a transformada de Laplace

**t - tempo**

**V - velocidade**

**Vz - velocidade longitudinal**

**V $\theta$  - velocidade angular**

**Vr - velocidade radial**

### ANEXO III

#### CÁLCULO DE $V_z$ PARA UM MEIO POROSO

As equações de momento linear para um meio poroso diferem da equação de Navier-Stokes por um termo igual a  $-\frac{\mu V_z}{K}$ , onde  $\mu$  é a viscosidade efetiva do fluido,  $K$  é a permeabilidade do meio que por sua vez é função da porosidade e do diâmetro de partícula.

A equação de momento linear, unidirecional para uma porosidade e diâmetro de partícula constante em um meio poroso é:

$$(1) \quad \frac{\mu V_z}{K} = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \right]$$

As condições de contorno são:

$$(2) \quad r = 0 \quad \frac{\partial V_z}{\partial r} = 0 \quad (\text{Simetria})$$

$$(3) \quad r = R ; \quad V_z = 0 \quad (\text{Não deslizamento na parede})$$

Temos então abrindo a equação de momento linear:

$$\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial V_z}{\partial r} - \frac{\mu r V_z}{K} - \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

Tentaremos resolver essa equação por série de potências como veremos a seguir:

$$V_z = \sum_{n=0}^{\infty} A_n r^n ; \quad V_z' = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot n \cdot r^{n-1} ;$$
$$V_z'' = \sum_{n=2}^{\infty} A_n n (n-1) r^{n-2}$$

Substituindo na equação principal temos:

$$\sum_2^{\infty} A_n \cdot n (n-1) r^{n-2} + r \sum_1^{\infty} A_n n r^{n-1} - \frac{\mu r}{K} \sum_0^{\infty} A_n r^n - \frac{\partial p}{\partial z} r = 0$$

$$\sum_2^{\infty} A_n n (n-1) r^{n-2} + \sum_1^{\infty} A_n n r^n - \frac{\mu}{K} \sum_0^{\infty} A_n r^{n+1} - \frac{\partial p}{\partial z} r = 0$$

$$\sum_0^{\infty} A_{n+2} (n+2) (n+1) r^n + \sum_1^{\infty} A_n n r^n - \frac{\mu}{K} \sum_1^{\infty} A_{n-1} r^n = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} r = 0$$

$$n = 0 \quad A_2 = 0$$

$$n = 1 \quad 6 A_3 + A_1 - \frac{\mu}{K} A_0 - \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

$$n = 2 \quad 12 A_4 + 2 A_2 - \frac{\mu}{K} A_1 = 0$$

$$n = 3 \quad 20 A_5 + 3 A_3 - \frac{\mu}{K} A_2 = 0$$

$$n = 4 \quad 30 A_6 + 4 A_4 - \frac{\mu}{K} A_3 = 0$$

$$n = 5 \quad 42 A_7 + 5 A_5 - \frac{\mu}{K} A_4 = 0$$

etc ...

Logo:

$$A_0 = ?$$

$$A_1 = ?$$

$$A_2 = 0$$

$$A_3 = \left( \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{K} A_0 - A_1 \right) / 6$$

$$A_4 = \frac{\mu}{K} \frac{A_1}{12}$$

$$A_5 = \left( \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{K} A_0 - A_1 \right) // 40$$

$$A_6 = \left( \frac{-\mu A_1}{3K} + \frac{\mu}{K} \left[ \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{K} A_0 - A_1 \right] \right) // 30$$

etc ...

Pode-se notar que todos os termos  $A_n$  são funções de  $A_0$  e  $A_1$ , que podem ser obtidos das condições de contorno.

A primeira condição de contorno  $V_z(0) = 0$  nos leva a  $A_1 = 0$  ou seja:

$$A_0 = ?$$

$$A_1 = 0$$

$$A_2 = 0$$

$$A_3 = \left( \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{K} A_0 \right) // 6$$

$$A_4 = 0$$

$$A_5 = \left( \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{K} A_0 \right) // 40$$

$$A_6 = \frac{\mu}{K} \left( \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{K} A_0 \right) // 30$$

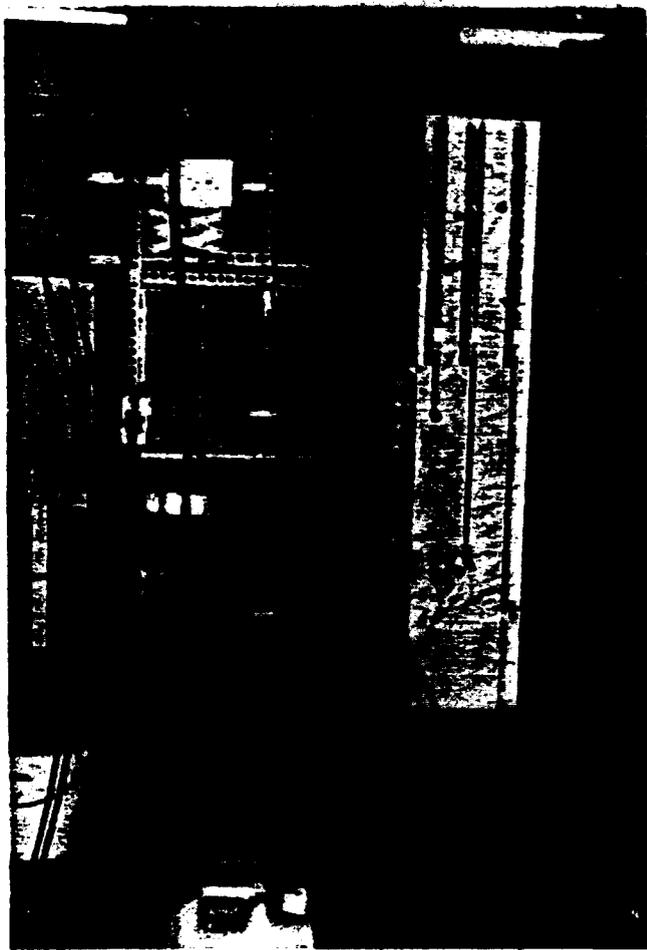
etc .....

Como pode ser notado todos os termos  $A_n$  são funções de  $A_0$  apenas, o qual poderia ser obtido a partir da segunda condição de contorno. Devido a dificuldade de se obter uma lei de recorrência para os valores de  $A_n$ , fica difícil determinar o valor de  $A_0$ , já que a solução é uma série infinita.

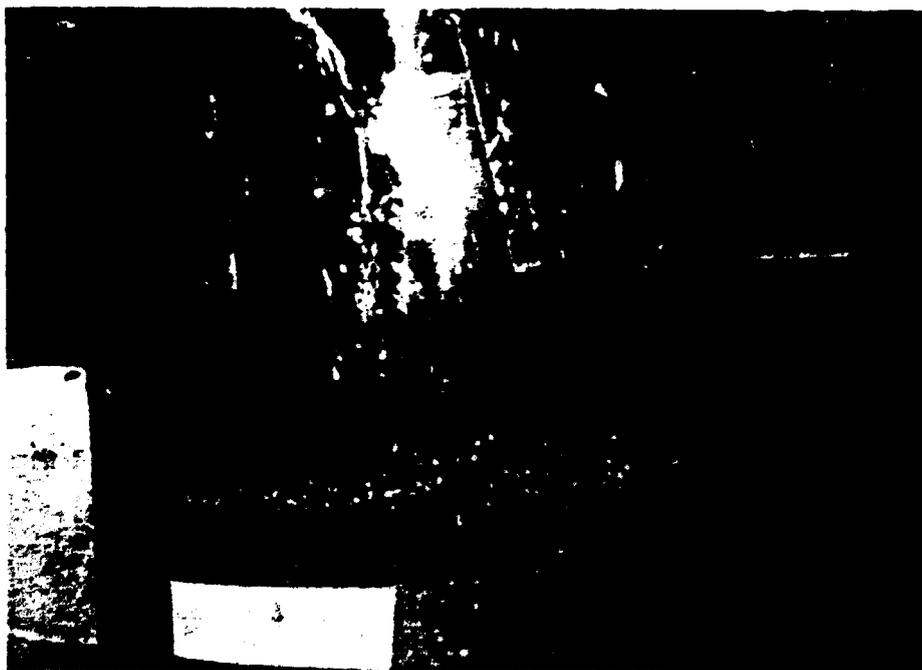
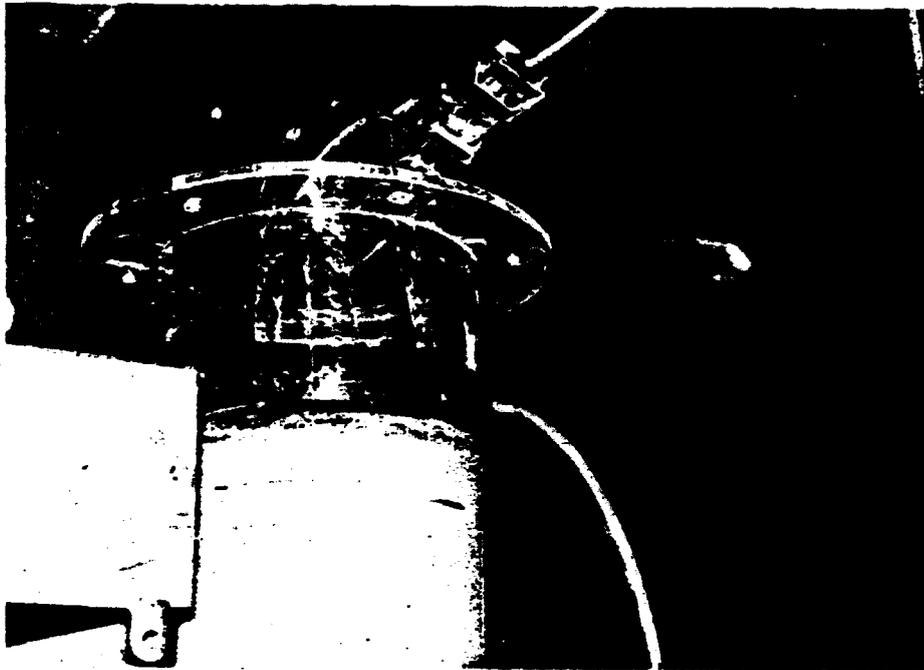
Devido a essas dificuldades decidiu-se pela determinação experimental de  $V_z$ , através de um rotâmetro na saída do leito.

Inúmeros trabalhos já foram realizados para a obtenção teórica de  $V_z$  em um meio poroso. A maioria deles envolve métodos variacionais, (10) e (11) cuja complexidade e confiabilidade na descrição do fenômeno nos levou optar pelo rotâmetro.

ANEXO IV - FOTOGRAFIAS



**MONTAGEM DEFINITIVA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO**



INJEÇÃO DO TRAÇADOR



DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO



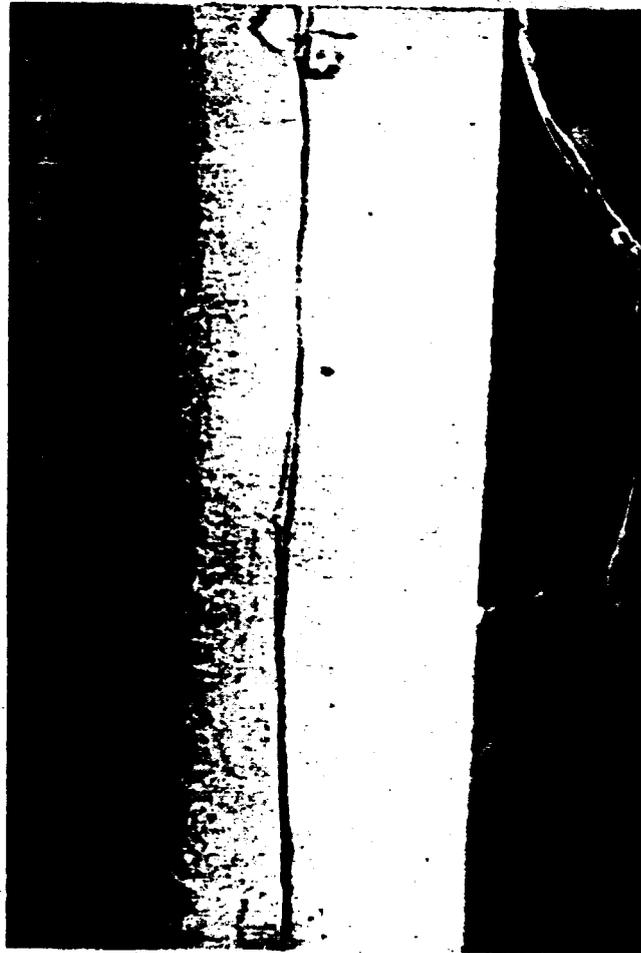
**SISTEMA TESTE PARA MEDIDAS DE DISPERSÃO**



DETALHES DA INJEÇÃO



INJEÇÃO DO TRAÇADOR



**DISPERSÃO DO TRAÇADOR NA COLUNA**