

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS

Estudo do Fenômeno "FINGERING" em um  
meio poroso através de imagens e teoria  
da percolação por invasão

ADOLFO NICOLAS POSADAS DURAND

Tese apresentada ao Instituto  
de Física e Química de São Carlos  
para a obtenção do título de  
Doutor em Ciências (Física Apli -  
cada).

Orientador: Dr. Silvio Crestana



Departamento de Física e Ciência dos Materiais

São Carlos - São Paulo

1994

100



MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE ADOLFO NICOLAS POSADAS DURAND APRESENTADA AO  
INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 16/03/1994

COMISSÃO JULGADORA:

*Silvio Crestana*

Prof. Dr. Silvio Crestana

*Ribeiro Tannus*

Prof. Dr. Ribeiro Tannus

*Roberto Nicolau Enoch*

Prof. Dr. Roberto Nicolau Enoch

*Klaus Reichardt*

Prof. Dr. Klaus Reichardt

*Fazal Hussain Ghauch*

Prof. Dr. Fazal Hussain Ghauch

*du*

**A Jannel e Angelica**

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Silvio Crestana, pela orientação, dedicação e amizade.

Ao Prof. Roberto Nicolau Onody, pela participação e discussão dos aspectos teóricos da teoria de percolação por invasão, assim como do algoritmo de simulação e amizade.

Ao Prof. Alberto Tannús, pela participação e discussão na obtenção das imagens por RMN e amizade.

Ao Prof. Carlos Horacio Panepucci, pelas facilidades oferecidas no laboratório de imagens por RMN e suas valiosas sugestões no uso da técnica de RMN para a investigação da dinâmica do fenômeno "fingering".

Ao Prof. Celso Arruda, pelas facilidades oferecidas na utilização do aparelho de imagens por tomografia de raios X do Hospital das Clínicas da Universidade Estadual De Campinas e amizade.

Ao Prof. Orêncio Monge Vilar por facilitar-me a utilização do laboratório de análises de materiais do Departamento de Geotecnia e amizade.

Ao Prof. Michel Aegerter por ter facilitado a utilização do aparelho de porosimetria de mercúrio.

Ao Prof. Roberto Lotufo, pelas valiosas sugestões à respeito da técnica de processamento de imagens, assim como sua participação na reconstrução tridimensional do fenômeno "fingering" e amizade.

Aos colegas Lúcio Jorge e André Torre, pelo apoio constante no uso das técnicas de processamento de imagens e amizade.

Aos pesquisadores do CNPDIA, em especial ao Clovis Biscegli, Paulo Cruvinel, Carlos Vaz e Vitor Neto pelo apoio e auxílio nas diversas etapas do desenvolvimento deste trabalho e amizade.

Ao pessoal técnico do CNPDIA e de forma muito especial ao Possato, Wilson, Godoy, Renê, Gilmar e Valentim, pelo auxílio na construção das colunas de acrílico, montagem dos diferentes experimentos do fenômeno "fingering" em laboratório e desenhos técnicos.

Ao pessoal administrativo do CNPDIA, em especial ao Elomir pelo auxílio e esclarecimento das diferentes questões de ordem legal perante os organismos governamentais.

Às Secretárias do CNPDIA, em especial à Ana Maria e à Érita pela sua amizade, auxílio e disponibilidade.

Ao pessoal técnico do laboratório de imagens por RMN, em especial ao Edson e Mateus, pelo apoio e participação nas aquisições experimentais com o sistema de RMN.

Ao Marcos e Marcelo, pelo auxílio e participação nas medidas experimentais com o porosímetro de mercúrio.

Ao José Luiz, pelo auxílio e participação nas medidas experimentais com o permeâmetro.

Ao Leandro e Holiven, pelo apoio e participação nas aquisições experimentais com o sistema de imagens por tomografia médica de raios X.

À Véra e à Janis pelas facilidades bibliográficas e amizade.

Ao Cláudio e Valdir, pela amizade e auxílio no uso das estações SUN e do computador VAX do IFQSC - USP.

Aos professores, pessoal técnico e administrativo do laboratório de Biofísica do IFQSC.

Aos colegas de estudos da Pós-Graduação, pelo apoio e amizade.

À minha esposa Jannel, pela correção, montagem bibliográfica, dedicação e constante apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPDIA - EMBRAPA, pelas facilidades institucionais e estrutura laboratorial.

Aos laboratórios de: Imagens por RMN, Porosimetria e Biofísica do DFCM - IFQSC-USP; Análises de Materiais do Departamento de Geotecnia - EESC - USP; Porosimetria e Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais - UFSCar.; Imagens por Tomografia Médica de raios X do Hospital das Clínicas - UNICAMP; Escoamento em Meios Porosos do Centro de Engenharia de Petróleo - Departamento de Engenharia Mecânica - UNICAMP e finalmente ao Departamento de Engenharia Elétrica - Centro de Computação- UNICAMP.

Ao Departamento de Física e Ciências dos Materiais do IFQSC - USP.

À FAPESP, pela concessão da Bolsa de Doutorado, processo No. 90/1770-0.

Ao Projeto Temático, "Transporte, Previsão do Destino e Balanço de Pesticidas no Solo": Processo FAPESP No. 90/3773-7.

E a todos que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMARIO

	<b>Pagina</b>
RESUMO	,
ABSTRACT	”
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>DINÂMICA DE FLUIDOS EM MEIOS POROSOS</b>	<b>09</b>
2.1	
<b>Descrição e propriedades geométricas de um meio poroso</b>	<b>09</b>
2.1.1	
<b>"Definição de um meio poroso"</b>	<b>09</b>
2.1.2	
<b>Quantidades geométricas que caracterizam um meio poroso</b>	<b>10</b>
2.2	
<b>Quantidades físicas que caracterizam o fluido no interior de um meio poroso</b>	<b>12</b>
2.2.1	
<b>Estado de energia do líquido no solo</b>	<b>13</b>
A) Unidades de energia potencial	13
a) Potencial gravitacional	14
b) Potencial de pressão	14
c) Potencial matricial	14
d) Potencial osmotico	15
2.2.2	
<b>Capilaridade</b>	<b>15</b>
2.3	
<b>Dinâmica da infiltração do líquido no solo</b>	<b>17</b>
2.3.1	
<b>Meios homogêneos saturados</b>	<b>18</b>
A) Equação de Darcy-Richard	18
2.3.2	
<b>Meios homogêneos não-saturados</b>	<b>19</b>
2.3.3	
<b>Meios estratificados (heterogêneos) não-saturados</b>	<b>22</b>
A) Fluxo preferencial	23

	B) Fenômeno "fingering"	24
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>TEORIAS</b>	<b>27</b>
3.1	<b>Geometria fractal</b>	27
3.1.2	Fractais matemáticos e objetos físicos	29
3.1.3	Fractais determinísticos e randômicos	33
3.1.4	Fractal auto-afim	36
3.1.5	Técnicas para o cálculo da dimensão fractal de uma estrutura	39
	a) Método de "box-counting"	39
	b) Método de "sand-box"	41
3.2	<b>"Fingering" viscoso</b>	41
3.2.1	Cela de "Hele-Shaw"	41
3.2.2	"Fingering" viscoso em um meio poroso	47
3.2.3	"Fingering" em solos	49
3.3	<b>Teoria da percolação</b>	52
3.3.1	Percolação clássica	52
3.3.2	Percolação por invasão (IP)	59
3.3.3	Percolação por invasão modificada para o caso do fenômeno "fingering" em solos	60
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>DESCRIÇÃO ABREVIADA DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS ATRAVÉS DE IMAGENS</b>	<b>66</b>
4.1	<b>Digitalização e processamento de imagens</b>	66
4.1.2	Representação de uma imagem digital	67
4.1.3	Elementos dos sistemas de processamento de uma imagem digital	69
4.2	<b>Tomografia por ressonância magnética (TORM)</b>	73
4.2.1	Sinal de RMN	73

4.2.2	Ressonância magnética nuclear pulsada	78
4.2.3	"Spin-echo"	80
4.2.4	Geração de uma imagem por RMN	81
4.2.5	Obtenção de imagens pelo método de transformada de Fourier bidimensional direta (2DFT)	84
4.3	<b>Tomografia computadorizada (TC) por raios X</b>	87
4.3.1	Princípios físicos da TC por raios X	88
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>93</b>
5.1	<b>Preparação e seleção das amostras de solo</b>	<b>93</b>
5.1.2	Medida da condutividade hidráulica K em saturação	94
5.1.3	Medida da porosidade total ( $\Phi$ )	96
5.1.4	Medida da distribuição de poros ou perfil de poros das amostras selecionadas	97
5.2	<b>Experimentos do fenômeno "fingering" em 2-D</b>	<b>99</b>
5.2.1	Montagem do experimento de dupla camada (solo estratificado)	99
	a) Filmagem do experimento e digitalização de imagens	100
	b) Simulação dos "fingers" através do algoritmo de percolação por invasão modificada	103
5.2.2	Montagem do experimento do solo homogêneo (não estratificado)	104
5.3	<b>Experimentos do fenômeno "fingering" em três dimensões (3-D)</b>	<b>105</b>
5.3.1	Experimentos com o tomógrafo de raios X	105
5.3.2	Experimentos com o tomógrafo de ressonância magnética nuclear	109
	a) Reconstrução tridimensional a partir das imagens de RMN	113

	b) Estudo da dinâmica do fenômeno "fingering" através de medidas de "spin-echo"	113
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>115</b>
6.1	<b>Resultados das medidas de condutividade hidráulica <math>K</math> e porosidade <math>\Phi</math></b>	<b>115</b>
6.2	<b>Resultado das medidas de perfil de distribuição de poros</b>	<b>116</b>
6.3	<b>Resultados dos experimentos do fenômeno "fingering" em 2-D</b>	<b>122</b>
6.3.1	Coluna de areia de dupla camada (solo estratificado)	122
	A) Caracterização dos "fingers" através das técnicas de processamento de imagens e do cálculo de sua dimensão fractal $D$	131
	B) Simulação do fenômeno "fingering" em 2-D	135
	B1) Simulação da dinâmica dos "fingers" através de sua dimensão fractal	136
	B2) Simulação dos "fingers" através de sua característica morfológica	137
	B3) Valores dos parâmetros "F's" introduzidos na simulação	143
	B4) Perfil de distribuição de poros obtidos através da simulação	145
6.3.2	Coluna de areia de uma única camada (solo não estratificado)	150
6.4	<b>Resultados experimentais do fenômeno "fingering" em 3-D</b>	<b>152</b>
6.4.1	Resultados experimentais com o tomógrafo médico de raios X	152

6.4.2	Resultados experimentais com o tomógrafo de RMN	157
	a) Resultados obtidos com a técnica de imagens (TORM)	158
	b) Resultados das medidas usando a técnica de "spin-echo"	163
<b>CAPÍTULO VII</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	167
7.1	<b>Conclusões</b>	167
7.2	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b>	170
	•	
	<b>APÊNDICE</b>	172
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	176

## RESUMO

A instabilidade da frente de molhamento ou fenômeno "fingering" pode ocorrer quando um líquido percola por um meio poroso que apresenta uma dupla camada ao longo de seu perfil vertical. Este fenômeno tem um papel determinante nos processos relacionados ao transporte de solutos em sistemas particulados, a contaminação ambiental e a recuperação de petróleo entre outros. No presente trabalho, foram realizados, em laboratório, experimentos com infiltração de água através de colunas de solo de dupla camada, com a finalidade de se estudar os processos físicos envolvidos no fenômeno "fingering" em duas e três dimensões. Em duas dimensões, utilizando a técnica de imagens, foi acompanhada a dinâmica dos "fingers", através de uma coluna planar de solo estratificado (dupla camada) e homogêneo (uma só camada). A estrutura morfológica dos "fingers" foi caracterizada não somente através de sua dimensão fractal como também foram realizadas simulações, usando o modelo modificado de percolação por invasão. Em três dimensões, usando uma coluna cúbica de solo estratificado, foi estudada a infiltração de água em condições de equilíbrio hidrodinâmico através da técnica de imagens por ressonância magnética nuclear (RMN). O acompanhamento da dinâmica dos "fingers", através de uma fatia central, no interior da coluna, foi realizado utilizando-se a técnica de imagens por tomografia médica de raios-X. Foi também possível seguir a dinâmica espacial da frente de infiltração, com o sistema de RMN, medindo-se o sinal de "spin-echo". Os resultados mostraram uma grande variabilidade espacial e temporal dos "fingers", ficando evidente o caráter tridimensional do fenômeno, sua relação de ocorrência com a distribuição do perfil de poros, com a estratificação do solo e a evidência de que o fenômeno pode acontecer mesmo em solos homogêneos. O valor da dimensão fractal, resultou estar correlacionado com a granulometria do solo. O modelo modificado de percolação por invasão proporcionou a determinação do perfil de distribuição de poros para cada solo simulado, reproduzindo adequadamente os resultados experimentais.

## ABSTRACT

The wetting front instability or fingering phenomenon may occur when a liquid moves through the vertical profile of a double-layer porous medium. That phenomenon has been showed to be extremely important in the processes related to the transport of solutes in porous media, to environmental contamination, to petroleum recovery, as well as to other processes. In the present work, with the aim of studying the physical processes concerning the fingering phenomenon in two and three dimensions experiments of water infiltration through double-layer soil columns were carried out in the laboratory. In two dimensions the fingering dynamics through a planar column of stratified soil (double-layer) and homogeneous soil (single-layer) was followed by using imaging techniques. The morphologic structure of fingers was characterized by using the fractal dimension and simulations were performed by using a modified percolation model by invasion. In three dimensions, the infiltration of water through a cubic column of stratified soil was studied under hydrodynamic steady state conditions using images obtained by nuclear magnetic resonance (NMR). The fingering dynamics into a transverse slice located in the center of the cubic column was studied taking into account images obtained by medical X-ray tomography. Also, it was possible to follow the spatial dynamics of the wetting front by means of the NMR system measuring the sample "spin-echo" signal. The results demonstrated the spatial and temporal variability of the fingering phenomenon dynamics, its three dimensional characteristics, its occurrence dependence with the porous distribution profile, with the soil stratification and revealed that the phenomenon may also take place in homogeneous soils. Regarding the fingering fractal dimension it was found that it depends on the soil granulometry. The modified percolation model by invasion was able to appropriately simulate the porous distribution profile of each soil investigated reproducing the experimental results.

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

O conhecimento dos fundamentos físicos dos fenômenos de transporte, em um meio poroso, é de vital importância em muitos campos das Ciências Aplicadas como Engenharia de Petróleo, Reologia, Sistemas Particulados, Indústria Alimentar, Física de Solos e Hidrologia entre outros. Estes fenômenos envolvem problemas extremamente interessantes e desafiantes tanto para a pesquisa teórica como experimental.

O solo, conhecido como um dos sistemas porosos mais complexos da natureza, apresenta inumeráveis fenômenos físicos, químicos e biológicos altamente variáveis e não lineares, na maioria das vezes ocorrendo longe do equilíbrio termodinâmico. Os avanços lentos e áridos do passado no sistema solo, advêm basicamente do conhecimento empírico e a inferência estatística do pesquisador do solo, mostrando assim a otimização para o manejo em situações muito específicas do solo. Contudo, nos dias de hoje com a grande pressão social para uma agricultura eficiente e que torne mínima a contaminação ambiental, resulta ser necessário o conhecimento dos diferentes mecanismos envolvidos nos variados fenômenos físicos, químicos e biológicos presentes no sistema solo. Porém, ferramentas modernas como da Física que permitem o estudo de superfícies a nível atômico ou através dos conceitos mais recentes da teoria fractal e do caos estão sendo de grande utilidade para poder determinar os fundamentos dos diferentes mecanismos de variabilidade espacial e temporal do solo. Também, a aplicação das técnicas modernas da física experimental como espectroscopias por transformada de Fourier do infravermelho (FTIR), ressonância magnética nuclear (RMN), ressonância de spin eletrônico (RSE), absorção de raios-X por estruturas finas (EXAFS); técnicas de imagens como microscopia eletrônica por transmissão de alta resolução (HRTEM), microscopia de varredura por tunelamento (STM), microscopia por força atômica (AFM), tomografia por raios-X e tomografia por RMN dentre outras, estão se mostrando como muito

promissoras. Desta forma, faz-se necessário uma maior convergência e participação dos pesquisadores das diversas áreas das ciências básicas e aplicadas [1].

Um dos fenômenos físicos considerados de grande relevância e importância prática, tanto em Física de Solos como em Engenharia de Petróleo é o fenômeno "fingering" ou instabilidade hidrodinâmica que ocorre sob certas condições físicas, quando um fluido se desloca através de um meio poroso.

Em Engenharia de Petróleo, gases ou solventes, miscíveis com o petróleo, podem ser usados para deslocar o fluido no estágio secundário ou terciário da recuperação de petróleo dos reservatórios rochosos. Assim, teoricamente, não deveria ficar petróleo residual no reservatório. Mas, o solvente injectado é mais móvel (menos viscoso) que o fluido presente no reservatório. Desta forma, existe a tendência do solvente móvel se movimentar através do reservatório ao longo de canais estreitos ("fingers"). O processo é inteiramente instável. Uma vez que um pequeno "finger" de alta concentração de solvente surge, outros solventes rapidamente se deslocam através dele [2]. Esta instabilidade (análoga à instabilidade de Rayleigh-Taylor em Hidrodinâmica e Física dos Plasmas, que ocorre quando dois fluidos de diferentes densidades são submetidos à aceleração) é conhecida como "fingering" viscoso, devido a que as forças viscosas são as que dominam o fenômeno físico. Em outras situações físicas de ocorrência do "fingering", pode acontecer de as forças capilares dirigirem o fenômeno físico, por exemplo, quando a velocidade do fluxo é bem lenta, gerando neste caso o chamado "fingering" capilar. O mesmo fato pode acontecer quando é usado um fluido não miscível [3].

A importância de se estudar o fenômeno "fingering" em petróleo é basicamente a recuperação do petróleo dos reservatórios rochosos. Nessa área, o fenômeno tem sido descrito há longo tempo, desde as primeiras observações do fenômeno por Engeberts e Klinkerberg [4] quando usavam água para tirar petróleo de um meio poroso. Eles deram o nome de "fingering" viscoso a este fenômeno.

Os trabalhos sobre o fenômeno "fingering" viscoso e capilar em Engenharia de Petróleo que podemos citar são os de: Berrie e Christie [2]; Lenormand et al [3], Lenormand [5]; Nitman et al [6]; Paterson [7]; Chuoke et al [8]; Safman e Taylor [9]; Furuberg et al [10]; Witten and Sanders [11]; Wilkenson e Willensen [12] e Meakin et al [13]. Estes trabalhos foram realizadas basicamente em duas dimensões e os efeitos gravitacionais foram considerados desprezíveis, embora alguns esforços tenham sido feitos em três dimensões, tanto do ponto de vista teórico [14] como experimental [15]. Contudo, o fenômeno "fingering" ainda apresenta grandes desafios para a pesquisa científica, tanto do ponto de vista teórico como experimental, sobretudo em três dimensões, onde os efeitos gravitacionais não podem ser desprezados e a dinâmica da interface ainda é pouco compreendida [16].

Em Física de Solos as condições físicas para a ocorrência do fenômeno "fingering" são um tanto diferentes daquelas da Engenharia de Petróleo onde os efeitos gravitacionais não podem ser desprezados, pois a gravidade domina a dinâmica dos "fingers". Por exemplo: a instabilidade hidrodinâmica do fluxo através das zonas não saturadas do subsolo, pode ser devido a estratificação do solo ou a condições iniciais impostas [17]. Mesmo assim, as características físicas são semelhantes, podendo utilizar conhecimentos da Engenharia de Petróleo em solos.

O deslocamento do fluido, através de caminhos preferenciais ou "fingers", é extremamente importante na agricultura, nos processos hidrológicos de infiltração e no transporte químico de nutrientes através do perfil do solo. Por exemplo: de interesse particular é o papel que o fluxo preferencial desempenha no transporte de pesticidas, metais pesados, lixo radioativo e outros poluentes, podendo como consequência, atingir rapidamente o lençol freático e comprometer a qualidade dos mananciais de água, que posteriormente, servirão para irrigação ou mesmo para consumo da população [18].

A instabilidade do fluxo pode ocorrer e ser facilmente observada em solos, quando a condutividade hidráulica aumenta ao longo da profundidade (solos estratificados). Por

exemplo: quando o fluido encontra, durante o seu movimento, uma interface de variação brusca (descontinuidade) da condutividade hidráulica, passando de um valor menor (por exemplo: solo de textura fina) para um maior (textura grossa). As equações, que usualmente descrevem o transporte de água e de solutos em meios saturados e não saturados assumem a validade da hipótese da estabilidade da "frente de molhamento". Portanto, não foram concebidas e não se aplicam satisfatoriamente às condições de fluxo instável.

O fenômeno "fingering", em solos, têm sido estudado intensamente, tanto no laboratório [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26] como no campo [27, 28, 29]. Tais estudos tem sido basicamente em duas dimensões: através de observações visuais do fenômeno, transmissão de luz e digitalização e processamento de imagens [30].

Experimentos realizados recentemente com a finalidade de se conhecer melhor os mecanismos físicos para a ocorrência do fenômeno "fingering", em solos, têm mostrado que o mesmo é dominado pela força gravitacional, ocorre ocasionalmente, durante a infiltração e redistribuição do líquido e que as condições iniciais de umidade do solo tem muito a ver com a sua ocorrência [31]. Consequentemente, ele pode aparecer, mesmo em solos homogêneos [26], onde, neste caso, o parâmetro determinante é a taxa de fluido aplicado na superfície do solo.

Em relação a modelos teóricos para a explicação do fenômeno, em solos, alguns esforços tem-se realizado, sendo os mais relevantes, os de Raats [32]; Philip [33]; Hillel e Baker [34]; Glass et al [22, 23], Chang [35] e envolvendo simulação numérica [36, 37]. Todos estes modelos foram desenvolvidos para duas dimensões, embora o fenômeno seja de característica tridimensional.

Recentemente, Glass [25] e Glass and Parlange [17] fizeram uma ampliação de seu modelo original em duas dimensões para três dimensões, sendo validadas experimentalmente no laboratório. Todavia, o experimento foi desenvolvido para condições estáticas e destrutivas.

A amostra de areia usada (recipiente cilíndrico), foi congelada depois de gerados os "fingers", e cortada em fatias para quantificá-los. Logicamente, todo este processo metodológico introduz uma perturbação muito grande que será refletida na validação do modelo.

Desta forma, o fenômeno "fingering" em solos, de forma idêntica ao que ocorre em petróleo, apresenta ainda grandes desafios para a pesquisa científica, tanto do ponto de vista de modelos teóricos como de experimentos.

Por se tratar de um processo basicamente tridimensional que se desenvolve longe do equilíbrio é muito promissor o uso de teorias modernas como de grupo de renormalização (RG), "scaling" e, em geral, as teorias dos sistemas desordenados [38, 16] de uso comum em física estatística. Também, com o rápido crescimento dos conceitos da teoria fractal [39] na física, foi mostrado que o "fingering" viscoso em meios porosos é de característica fractal [40, 41, 42].

Por outro lado, apesar do fenômeno "fingering" ser um problema muito importante em Física de Solos, todos os relatos encontrados na literatura advêm de pesquisas realizadas na América do Norte, Europa ou Japão, onde cada vez maior número de pesquisadores dos diferentes campos, tanto das ciências básicas como aplicadas estão se envolvendo na pesquisa deste fenômeno. Nos últimos anos, tem aumentado o interesse da comunidade científica internacional pelo fato deste fenômeno estar relacionado diretamente com os processos de contaminação ambiental [1]. Porém, no Brasil e na América Latina não foi encontrada nenhuma citação procedente de grupos de pesquisa destes países, particularmente em Ciência do Solo.

Desta forma, como Licenciado em Física Básica e depois de obter o Mestrado em Física Aplicada, trabalhando com problemas ligados aos processos de transporte como a dinâmica de formação e fusão do gelo em um solo não saturado, submetido a condições de fronteira variáveis [43, 44], estávamos motivados e com certa experiência em lidar com os

problemas de transporte em um meio poroso como o solo. Assim, foi natural continuar o Doutorado em Física Aplicada, estudando o desafiante problema do fenômeno "fingering", que do ponto de vista da Física Aplicada, se tornava interessante pela alta complexidade em sua forma e desenvolvimento e onde poderíamos aplicar alguns resultados teóricos extraídos da Física Básica, sobretudo aqueles estudados na Mecânica Estatística. Do ponto de vista experimental, era desafiante recorrer às técnicas de imagens, como método experimental para se fazer o acompanhamento da dinâmica espacial do referido fenômeno. Para isto, contamos com a experiência da carreira do orientador que tem trabalhado nas aplicações de imagens tomográficas, ao solo [45].

Como consequência, foi definido o projeto de pesquisa com apoio da FAPESP, onde nos propusemos empregar modelos como os de percolação para a simulação dos "fingers", teoria fractal para a caracterização das estruturas destes "fingers" e as técnicas de processamento de imagens e tomografia por raios-X e RMN.

No ano seguinte ao início do projeto de pesquisa para o Doutorado, o mesmo passou a fazer parte de um projeto temático de equipes: "Transporte, Previsão do Destino e Balanço de Pesticidas no Solo", também financiado pela FAPESP com a participação da EMBRAPA, do IAC e da USP. Através deste projeto o CNPDIA montou um laboratório de processamento de imagens, contando com uma estação de trabalho tipo Silicon Graphics de dedicação exclusiva ao processamento de imagens, com o auxílio de outras máquinas de menor porte tipo IBM-PC e MacIntosh. Este laboratório conjuntamente com as estações SUN e o computador VAX, do IFQSC-USP, viabilizaram nossos objetivos de estudar o fenômeno "fingering", tridimensionalmente.

No decorrer dos três anos de pesquisa, envolvidos com o problema do fenômeno "fingering" em solos, conseguimos interagir com diferentes laboratórios e grupos de pesquisa, que foram de vital importância para alcançar os objetivos propostos, que está refletido nos resultados que serão apresentados no decorrer desta tese.

Por exemplo, do ponto de vista experimental, atuamos com os seguintes laboratórios: laboratório de análises de materiais do Departamento da Geotecnia da EESC-USP, laboratório de porosimetria do Departamento de Ciências de Materiais da UFSCar, laboratório de porosimetria do Departamento de Física e Ciências dos Materiais do IFQSC-USP, laboratório de imagens por ressonância magnética nuclear do Departamento de Física e Ciências dos Materiais do IFQSC-USP, laboratório de Biofísica do DFCM-IFQSC, laboratório de tomografia por raios-X do Hospital das Clínicas da Universidade de Campinas, laboratório de escoamento em meios porosos, do Centro de Engenharia de Petróleo da UNICAMP, laboratório de processamento de imagens do Departamento de Engenharia Elétrica da UNICAMP, além do laboratório de tomografia e processamento de imagens do CNPDIA-EMBRAPA.

Do ponto de vista teórico, contamos com a contribuição do Prof. Dr. Roberto Nicolau Onody, da área de Física Teórica do DFCM-IFQSC, especialista em Mecânica Estatística. Sua valiosa colaboração, foi de vital importância para simularmos o acompanhamento da dinâmica dos "fingers" através de modelo que utiliza a teoria da percolação por invasão. Nesta linha, também foram valiosas as sugestões fornecidas pelo Prof. Hans Herman, pesquisador em Mecânica Estatística do Instituto de Física Teórica em Julich, Alemanha, sobretudo no que tange às aplicações da teoria fractal.

Do ponto de vista experimental, tivemos a colobaração dos Profs. Panepucci e Tannús, do laboratório de imagens por RMN do DFCM-IFQSC, cujas participações permitiram fazer o acompanhamento dinâmico e espacial dos "fingers" usando o aparelho de RMN. Em relação às técnicas de processamento de imagens empregadas e a reconstrução tridimensional da estrutura dos "fingers", a colaboração do Prof. Dr. Roberto Lotufo, do Departamento da Engenharia Elétrica da UNICAMP, especialista em Computação Gráfica, foi também decisiva para a obtenção da grande parte dos resultados a serem apresentados.

A seguir fornecemos uma explicação resumida do conteúdo de cada capítulo.

No capítulo II, apresentamos uma descrição da dinâmica de fluidos em meios porosos, especificamente em solos. Definimos algumas quantidades geométricas e físicas que caracterizam o meio poroso, como o solo e a dinâmica do fluido nele contido. Em seguida, a partir da equação de Darcy, descrevemos a infiltração de água em solos homogêneos saturados e não saturados. Finalmente, discutimos a infiltração através de solos estratificados não-saturados, chamando atenção sobre o fluxo preferencial e o fenômeno "fingering".

No capítulo III, discutimos brevemente os modelos de crescimento ou "fractal growth phenomena". Descrevemos a teoria da geometria fractal, suas diferenças em relação à geometria euclidiana e como ela descreve melhor os fenômenos naturais. Em seguida, discutimos o fenômeno "fingering" viscoso e capilar em hidrodinâmica, suas características físicas e importância prática. Finalmente, nos centramos na descrição do modelo da percolação ordinária, percolação por invasão e as modificações introduzidas na invasão para simular o fenômeno "fingering" em solos, o que chamaremos de invasão "modificada".

No capítulo IV, apresentamos uma descrição breve das técnicas de digitalização e processamento de imagens, tomografia por ressonância magnética nuclear e tomografia computadorizada de raios-X.

No capítulo V, descrevemos os materiais e métodos empregados nas medidas experimentais e a técnica de simulação da percolação por invasão modificada.

No capítulo VI, apresentamos os resultados e discussão.

No capítulo VII, são apresentados as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, no apêndice, são apresentadas as medidas do perfil de distribuição de poros, obtidos com o porosímetro de mercúrio.

## CAPITULO II

### DINÂMICA DE FLUIDOS EM MEIOS POROSOS

Neste capítulo, apresentaremos uma breve descrição da teoria que governa o fluxo de água em um meio poroso, especificamente em solos. Começaremos com algumas definições básicas que serão de importância no decorrer do presente capítulo e dos próximos. A partir da equação de Darcy, descreveremos a infiltração de água em solos não estratificados saturados e não-saturados que chamaremos de "transporte homogêneo". Em seguida, descreveremos a infiltração através de solos estratificados não-saturados, o que vamos chamar de "transporte não-homogêneo". Nesta parte, chamaremos atenção sobre o fluxo preferencial, suas características físicas e geométricas, causas, importância prática e o estado da arte do ponto de vista da pesquisa científica. Finalmente, nos concentraremos na discussão do fluxo preferencial específico devido à instabilidade hidrodinâmica, chamado também de fenômeno "fingering".

#### 2.1.- Descrição e propriedades geométricas de um meio poroso

##### 2.1.1.- "Definição de um meio poroso"

Antes de estudar o transporte de um fluido, através de um meio poroso, é necessário esclarecer o que se entende por um meio poroso. Podemos começar definindo um "meio poroso" como um corpo sólido que contém "poros". Pressupõe-se que o significado de um "poro" seja claro e intuitivo. Mas, se tentarmos dar uma definição geometricamente exata de um "poro", infelizmente surgirá uma dificuldade maior. Intuitivamente "poros" são espaços vazios distribuídos de forma mais ou menos regular através do material.

Se os vazios em um sólido são extremamente pequenos, eles são chamados de "interstícios moleculares" e, se ao contrário, esses vazios forem muito maiores, eles serão chamados de "cavernas". Assim, os "poros" são espaços vazios intermediários entre as cavernas

e os interstícios moleculares. Conseqüentemente, a limitação de seu tamanho é bastante intuitiva e indefinida.

Os poros em um meio poroso podem ser interconectados e não-interconectados. O transporte do fluido através do sistema poroso pode ser possível somente se uma mínima parte do espaço de poros for interconectado. Como exemplo de meios porosos, podemos citar: os diferentes tipos de rochas, as diferentes camadas do solo, os concretos utilizados na indústria da construção, células biológicas, materiais cerâmicos, agregados fibrosos como lençol, feltros, filtros de papel, filtros industriais, membranas biológicas, partículas catalíticas e outros. Assim, o conceito de meio poroso compreende uma ampla variedade de substâncias.

### 2.1.2.- Quantidades geométricas que caracterizam o meio poroso

Um meio poroso pode ser caracterizado por uma variedade de propriedades geométricas [46], sendo uma das mais importantes a fração (ou porcentagem) de volume de vazios conhecida como porosidade ( $\Phi$ ):

$$\Phi = \frac{V_f}{V_t} \quad (2.1)$$

onde  $V_f$  é o volume de vazios (Fig. 2.1) e  $V_t$  o volume total do meio. Assim,  $\Phi$  representa uma medida relativa do volume total dos poros no meio poroso.

Se o cálculo da porosidade é feito levando em conta os poros interconectados sobre o espaço total de poros, a quantidade resultante é chamada de porosidade efetiva ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{(1-\Phi)} \quad (2.2)$$

A figura 2.1 apresenta esquematicamente o solo considerado como um sistema de três fases: ar, líquido e sólido.  $V_a$  é o volume do ar,  $M_l$  e  $V_l$  a massa e o volume do líquido,  $M_s$  e  $V_s$  a massa e o volume do sólido,  $V_f = V_a + V_l$ ,  $V_t = V_a + V_l + V_s$  e  $M_t = M_l + M_s$ . Assim, se os poros vazios ( $V_f$ ) estão completamente preenchidos com líquido, diz-se que o sistema está saturado. Caso contrário, o sistema é dito não-saturado.

A partir da figura 2.1, vamos definir outros parâmetros geométricos do sistema poroso frequentemente usados em Física de Solos.

a) Densidade da partícula ou do sólido ( $\rho_s$ ):  $\text{g/cm}^3$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.3)$$

onde  $M_s$  é a massa do sólido e  $V_s$  o volume do sólido.

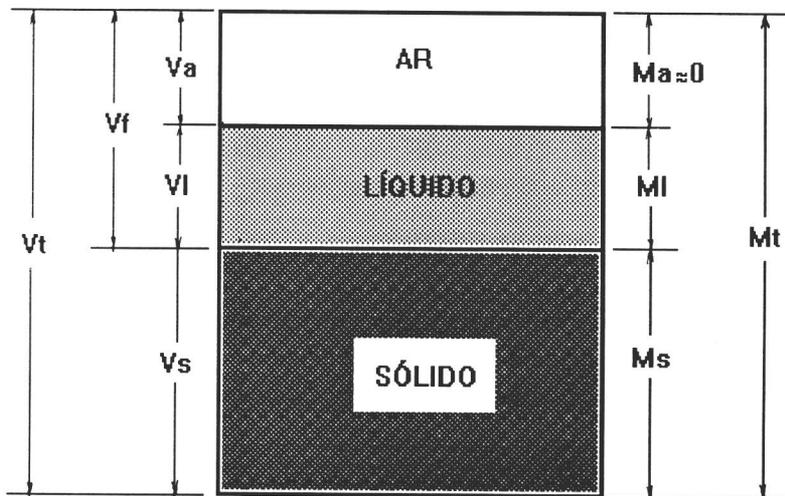


Fig. 2.1. Esquema mostrando o solo como um sistema de três fases

b) Densidade global seca ou densidade aparente ( $\rho_b$ ):  $\text{g/cm}^3$

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} \quad (2.4)$$

A umidade ou o conteúdo relativo de água no solo pode ser expressa de várias formas [47]. Os mais comumente usados são a umidade de massa e a umidade de volume:

c1) A umidade de massa (chamada também de gravimétrica) ( $w$ ):  $\text{gr/cm}^3$  definida como:

$$w = \frac{M_l}{M_s} \quad (2.5)$$

onde  $M_l$  é a massa de água contida no sistema e  $M_s$  a massa de solo seco. O solo, geralmente é definido como seco, quando secado em um forno a  $105^\circ\text{C}$  durante pelo menos 24 h. Para solos minerais, em saturação  $w$ , pode variar de 25% a 60%, dependendo da densidade global [47].

c2) A umidade de volume ou volumétrica ( $\theta$ ):  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} = \frac{V_l}{(V_s + V_f)} \quad (2.6)$$

A umidade volumétrica, considerada como a fração de água no solo, é geralmente expressa como uma porcentagem de volume total do solo. Para solos arenosos,  $\theta$  em saturação pode variar na faixa de 40% a 50% e em solos argilosos, ele pode chegar até 60% [47].

## 2.2.- Quantidades Físicas que caracterizam o fluido no interior de um meio poroso

A seguir, são descritas algumas quantidades físicas, comumente empregadas em um meio poroso, como o solo que caracteriza a dinâmica do líquido nele contido.

### 2.2.1.- Estado de energia do líquido no solo

Como qualquer corpo "livre" da natureza, o líquido no solo pode possuir tanto a energia cinética como a energia potencial.

Desde que o deslocamento do líquido no solo é bastante lento, sua energia cinética é considerada desprezível. Portanto, a energia potencial, que depende da posição e das condições internas do sistema será o parâmetro físico mais importante para determinar o estado e o movimento do líquido no solo. Assim, o conhecimento de seu estado de energia em cada ponto do sistema pode permitir o cálculo das forças que atuam sobre o líquido e determinar quanto ele se encontra afastado do seu estado de equilíbrio.

O líquido no solo está sujeito a numerosas forças, o que faz com que sua energia potencial seja diferente do líquido no seu estado "livre". Essas forças resultam da atração do líquido pela matriz sólida, da presença de solutos, da ação de gases externos e da força gravitacional. Desta forma, o potencial total ( $\Phi_t$ ) atuante sobre o líquido pode ser considerado como a soma desses fatores [47, 48]:

$$\Phi_t(\vec{r}) = \phi_g(\vec{r}) + \phi_p(\vec{r}) + \phi_{os}(\vec{r}) + \phi_m(\vec{r}) \quad (2.7)$$

onde  $\phi_g(\vec{r})$ ,  $\phi_p(\vec{r})$ ,  $\phi_{os}(\vec{r})$  e  $\phi_m(\vec{r})$  são respectivamente o potencial gravitacional, o potencial de pressão, o potencial osmótico e o potencial matricial, sendo  $\vec{r}$  o vector de posição.

#### A) Unidades de Energia Potencial

Como a energia de um sistema é uma grandeza extensiva, então sempre será melhor expressá-la por unidade de uma outra grandeza proporcional extensão do sistema. Três formas são as mais utilizadas:

- 1) energia por unidade de massa - sua dimensão é  $L^2T^{-2}$ : Joule/kg, erg/g, cal/g.
- 2) energia por unidade de volume - possui dimensões de pressão:  $ML^{-1}T^{-2}$ , atm, bar, dina/cm<sup>2</sup>.
- 3) energia por unidade de peso (carga hidráulica) - possui dimensões de comprimento  $L$  : altura do líquido, cm, m.

Neste trabalho, adotaremos, por comodidade, a difinição contida no item 3): energia/unidade de peso. Assim, os potenciais considerados na equação (2.7) poderão ser expressas como segue:

a) **Potencial Gravitacional ( $\phi_g$ ):** cm

$$\phi_g = z \quad (2.8)$$

onde  $z$  é a coordenada referencial que será considerada como zero, na superfície do solo, e positiva, no sentido que segue a profundidade do solo.

b) **Potencial de Pressão ( $\phi_p$ ):** cm de H<sub>2</sub>O

$$\phi_p = h \quad (2.9)$$

onde  $h$  é a altura da carga hidráulica. A componente de pressão aparece apenas quando a pressão que atua sobre a água é diferente da pressão atmosférica, sendo de importância só para solos saturados.

c) **Potencial Matricial ( $\phi_m$ ):** cm

A componente matricial aparece devido à interação entre a matriz sólida do solo e o líquido: trabalho capilar, trabalho contra as forças de adsorção, elétricas e outros. Esta

componente é difícil de ser calculada. Ela é medida experimentalmente através de instrumentos de pressão ou sucção. No solo  $\phi_m$  (pressão negativa) está relacionado, de forma não analítica, com a porcentagem de umidade do solo ( $\theta$ ). Quanto maior  $\theta$  (maior a umidade) maior será  $\phi_m$  [47, 48, 49].

#### d) Potencial Osmótico ( $\phi_{OS}$ ):

A componente osmótica  $\phi_{OS}$  aparece devido a sais minerais e substâncias orgânicas no líquido do solo. Este potencial é de difícil determinação. Existem, porém, instrumentos específicos para sua medida [47, 49]. Na maioria dos solos, a componente osmótica é desprezível, principalmente quando a umidade  $\theta$  é alta (próximo da saturação).

#### 2.2.2.- Capilaridade

Os fenômenos capilares resultam da tensão superficial do líquido e de seu ângulo de contato com as partículas sólidas. Para superfícies planas de líquido (como no caso de poros saturados), não existe diferença de pressão entre pontos imediatamente superiores e inferiores interface líquido-gás. Para superfícies curvilíneas (Fig.2.2), já existe uma diferença de pressão, responsável por uma série de fenômenos capilares. Para um solo não-saturado (três fases), a equação fundamental de capilaridade está dada pela equação de Laplace [50]:

$$\Delta p = p_l - p_a = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.10)$$

onde  $\Delta P$  é a diferença de pressão, através da superfície curva ar-líquido,  $P_a$  é a pressão na região do ar,  $P_l$  a pressão na região do líquido,  $\sigma$  a tensão superficial da interface ar-líquido e  $R_1, R_2$  os raios de curvatura. O sinal de  $R$  é positivo (+) sobre uma superfície convexa e negativo sobre uma superfície côncava (Fig.2.2) [50].

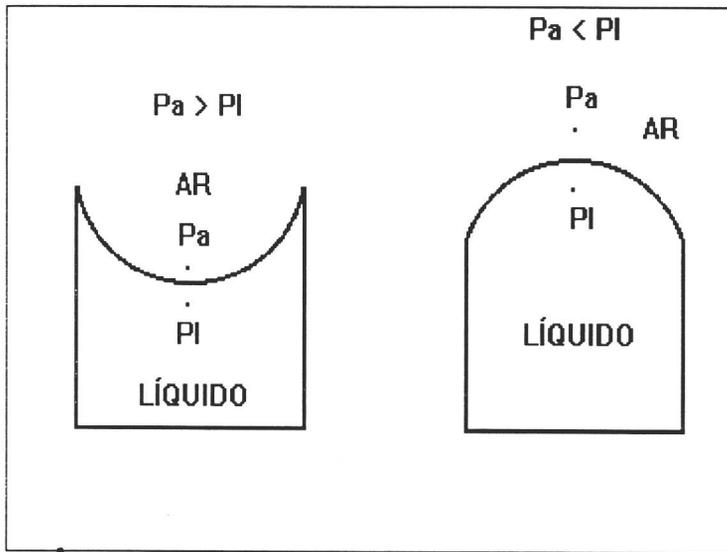


Fig. 2.2. Interface ar-líquido para superfícies côncava e convexa.

Para um tubo capilar cilíndrico (Fig. 2.3) onde  $R_1 = R_2 = R$  e considerando  $P_a=0$ , da equação (2.10) obtém-se:

$$p_l = -\frac{2 \sigma \cos \gamma}{r} \quad (2.11)$$

onde  $r$  é o raio do tubo capilar e  $\gamma$  o ângulo de contato.

Se o ângulo de contato  $\gamma$  for igual a  $0^\circ$ , o líquido se espalhará completamente sobre o sólido. Diz-se, neste caso, que o líquido molha o sólido ("molhamento total"). Um ângulo de contato de  $180^\circ$  corresponderá a um "não molhamento" ou rejeição total do líquido pelo sólido. Assim, define-se que o líquido é "molhante" ou molha o sólido quando  $0^\circ < \gamma < 90^\circ$ . Caso contrário, para  $\gamma > 90^\circ$ , diz-se que o líquido é "não molhante" ou não molha o sólido (ele é repelido pelo sólido (Fig. 2.4)) [48, 49].

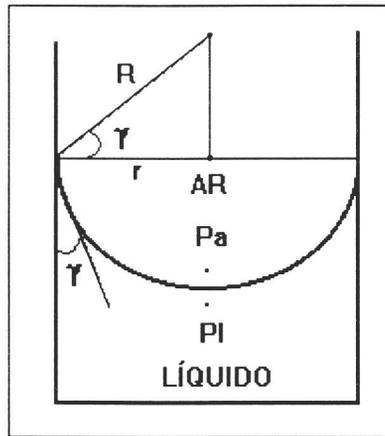


Fig. 2.3. Menisco presente em um tubo capilar cilíndrico.

### 2.3.- Dinâmica da infiltração do líquido no solo

Como já foi visto no item 2.2, o movimento na fase líquida dá-se em resposta a diferenças de potencial do líquido. Se não incluirmos a componente osmótica ( $\phi_{OS}$ ) e dado que a componente de pressão ( $\phi_p$ ) é positiva e a componente matricial ( $\phi_m$ ) é negativa, eles podem ser agrupados em uma única componente  $h = \phi_p + \phi_m$  que cobre toda a faixa de pressões. Assim a equação (2.7) fica representada por (cm de  $H_2O$ ):

$$\Phi_t = H = h + z \quad (2.12)$$

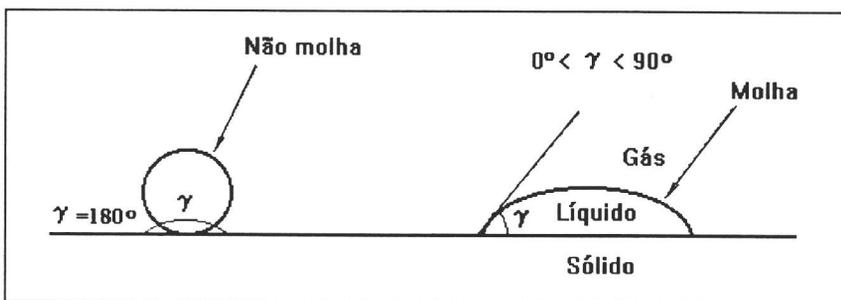


Fig. 2.4. Ângulo de contato entre o líquido-gás-sólido: não molhamento e molhamento.

### 2.3.1.- Meios homogêneos saturados

#### A) Equação de Darcy - Richard

A primeira publicação relacionando o fluxo de água com o gradiente de potencial advém do hidrólogo francês Henry Darcy, sendo generalizada depois por Slichter [51] para um meio saturado, através de uma equação diferencial macroscópica:

$$\vec{q} = -K_s \vec{\nabla}H \quad (2.13)$$

onde  $\vec{q}$  é a densidade de fluxo do líquido no solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2.\text{seg}$ ),  $\vec{\nabla}H$  o gradiente de carga hidráulica ( $\text{cm}/\text{cm}$ ),  $K_s$  uma constante chamada de condutividade hidráulica ( $\text{cm}/\text{s}$ ), onde o índice s indica saturação.

O módulo de  $\vec{q}$  ( $q$ ) é o volume  $Q$  de água (ou líquido) que passa por unidade de tempo pela unidade de área de secção transversal  $A$  (perpendicular ao movimento):

$$q = \frac{Q}{t A} \quad (2.14)$$

Assim, a condutividade hidráulica ( $\text{cm}/\text{s}$ ) pode ser definida como:

$$K_s = -\frac{q}{|\vec{\nabla}H|} \quad (2.15)$$

No caso mais geral, a condutividade hidráulica depende das propriedades do fluido e do material poroso. Mas, em condições de saturação  $K_s$  é constante. Assim, acoplando a equação de continuidade (Lei de conservação da massa) [47],

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q} \quad (2.16)$$

com a equação (2.13) (válido para um meio saturado somente),

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot K \bar{\nabla} H = -\bar{\nabla} \cdot \bar{q} \quad (2.17)$$

relação conhecida como equação de Darcy-Richard, onde  $t$  é o tempo e  $\theta$  a umidade do meio.

Para meios isotrópicos (solos não estratificados ou homogêneos) saturados:  $K_x = K_y = K_z = K_s = \text{constante}$ ,  $\theta = \theta_s$  (saturado) = constante,  $\delta\theta/\delta t = 0$ ,  $H = \psi$  (potencial) e de (2.17) obtém-se:

$$K_s \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} \psi = 0 \quad \text{-----} \rightarrow \quad \nabla^2 \psi = 0 \quad (2.18)$$

conhecida como equação de Laplace que descreve o fluxo em equilíbrio hidrodinâmico (ou em regime permanente), significando que o fluxo  $q$  é uma constante. A umidade  $\theta$  e o potencial  $\psi$  são independentes do tempo, mas variam no espaço. Esta variação produz o gradiente que é responsável pelo fluxo. Nesta situação, o líquido sempre estará sob pressão positiva e a solução da equação diferencial linear (2.18) fica enormemente simplificada [47, 49].

### 2.3.2.- Meios homogêneos não-saturados

O fluxo de um líquido denomina-se não-saturado, quando ele ocorre no solo em qualquer condição de umidade  $\theta$  abaixo do valor de saturação  $\theta_s$ . A maioria dos processos que envolvem movimento de líquido no solo, ocorre em condições não-saturadas. Daí a importância de se estudar este tipo de fluxo.

A equação de Darcy-Richard também pode ser aplicada para descrever o fluxo em meios porosos não-saturados (homogêneos) [47]. Assim, para solos não-saturados, a equação diferencial (2.17) é escrita como [47, 51]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot [K(h) \vec{\nabla} H] \quad (2.19)$$

sob a hipótese de que a condutividade hidráulica  $K$  depende univocamente da função  $h$  (potencial matricial de sucção). Então, em (2.19), podemos escrever  $K = K(h)$  ou  $K = K(\theta)$ , independentemente. Esta condutividade hidráulica  $K$  também depende de um outro parâmetro  $h'$  chamado de histerese [47, 51]:  $K = K_h(\theta)$ . Mas, incluir a histerese na equação (2.19) complicaria ainda mais sua solução. Assim, o parâmetro de histerese geralmente não é considerado ou considerado desprezível nos estudos de Física do solo.

Como  $H = h + z$ , então a equação (2.19) fica expressa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot [K(h) \vec{\nabla} (h + z)] \quad (2.20)$$

Pela alta complexidade (não-linearidade) da equação (2.20), comumente, para fins de solução, a mesma é decomposta em suas componentes horizontais e verticais. Muitas vezes, pode-se considerar o gradiente gravitacional  $\nabla_z$  desprezível comparado com o gradiente de sucção matricial  $\nabla_h$ . Neste caso, considerando a componente horizontal unidimensional (por exemplo na direção do eixo  $x$ ) a equação (2.20) fica expressa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [K(\theta) \frac{\partial h}{\partial x}] \quad (2.21)$$

Reescrevendo-se (2.21) como gradiente de umidade (ao invés do gradiente do potencial matricial), usando a regra da cadeia obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x}] \quad (2.22)$$

Definindo-se o parâmetro físico difusividade hidráulica como  $D(\theta)$ :

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (2.23)$$

a equação mais geral do escoamento horizontal fica:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}] \quad (2.24)$$

Por outro lado, considerando-se a equação (2.13) e (2.24), obtém-se:

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2.25)$$

que é análoga à primeira lei de difusão de Fick, que estabelece que a taxa de difusão é proporcional ao gradiente de concentração. No entanto, a complexidade matemática presente nas equações (2.23) e (2.24) é muito superior, pois K depende de  $\theta$ , tornando (2.24) não linear e no caso mais geral, K também depende da histerese.

No caso de infiltração vertical a relação (2.20) poderá ser expressa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(\theta) (\frac{\partial h}{\partial z} + 1)] \quad (2.26)$$

Usando a relação (2.23), obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}] - \frac{\partial}{\partial z} K(\theta) \quad (2.27)$$

onde z é a coordenada vertical, considerada como positiva de "cima para baixo".

Como pode ser observado da relação (2.27), considerando a componente vertical, a equação diferencial de transporte é ainda mais complexa do que o transporte horizontal unidimensional. Conseqüentemente, tentar descrever o transporte do fluxo considerando

simultaneamente a componente horizontal e vertical ou mais ainda, descrever o comportamento tridimensional do fluxo (como ocorre na realidade), será quase impossível usando o modelo de transporte de Darcy-Richard, pela alta não linearidade presente nos parâmetros físicos  $K(\theta)$ ,  $\theta(x,y,z)$  e  $D(\theta)$ .

A maioria das soluções das equações de transporte de fluxo, em meios porosos não-saturados e homogêneos, tem sido desenvolvida para condições de regime permanente ( $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ ), sendo poucas as soluções propostas para regimes transientes ou não permanentes. As soluções analíticas propostas são baseadas na linearização das equações diferenciais envolvidas em situações muito particulares [52, 53] ou em soluções aproximadas [54, 55]. Na maioria das vezes, as soluções são calculadas numericamente [56, 57] ou através de métodos estocásticos [58].

Como não é propósito desta tese discutir tais soluções, não vamos detalhar mais o assunto. Porém, devemos ressaltar que as soluções das equações diferenciais que descrevem o fluxo nas componentes horizontal e vertical, sob condições iniciais e de fronteira adequadas, são amplamente discutidas na maioria dos livros de Física do Solo [47, 48, 49, 59].

### 2.3.3.- Meios estratificados (heterogêneos) não-saturados

A descrição analítica, ou mesmo numérica do transporte de fluido através de meios porosos estratificados (solos heterogêneos), será muito mais complicada, do que na situação da secção (2.3.2). Estas complicações surgem do fato de que a condutividade hidráulica  $K$  e a difusividade hidráulica  $D$  são funções das coordenadas de posição. Isto é  $K_x \neq K_y \neq K_z$  e  $D = D(r,\theta)$ .

Para situações específicas, como transporte horizontal unidimensional ou vertical, soluções numéricas podem ser possíveis, através de aproximações pelo método de diferenças

finitas ou elementos finitos. Para tal, as funções  $D(x,\theta)$  e  $K(\theta,x)$  devem ser conhecidas experimentalmente [60, 61, 62, 63, 64, 65]. Deve-se reconhecer que se tem obtido alguns avanços através do emprego das teorias de "scaling" ou fatores de escala, baseado no trabalho inicial de Miller e Miller [66] que, pela primeira vez, em 1956, introduziram o conceito de meios similares em Física de Solos [67, 68, 61, 69]. Idem, quanto aos conceitos de Geostatística [70] e variabilidade espacial [71, 63, 72, 73].

Recentemente, com o avanço das idéias e conceitos da teoria da Geometria Fractal [39], novas oportunidades de pesquisa foram abertas com a aplicação destes conceitos no estudo do transporte de fluidos em solos heterogêneos [74, 75, 76, 77, 78].

Em muitas situações, o transporte de fluidos através de solos estratificados, pode dar-se através de caminhos preferenciais conforme será descrito, em seguida. Nestes casos, os modelos que se apoiam na equação de Darcy-Richard, até agora descritos, serão incapazes de descrever adequadamente o movimento de fluidos através de caminhos preferenciais.

#### A) Fluxo preferencial

O fluxo preferencial pode aparecer em solos estratificados, devido a um aumento na condutividade hidráulica, ao longo de sua profundidade ou em solos com alta densidade de canais deixados pelas raízes mortas ou minhocas, em solos fraturados, em solos com alta porcentagem de macroporos ou ainda naqueles solos que apresentam características de expansão ou contração dos seus poros. Nesta situação, a velocidade de transporte do líquido é muito maior do que nos solos que não apresentam estas características, transportando o fluido por caminhos de "bypass" ou "curto circuito", podendo atingir rapidamente o lençol freático. Os modelos já descritos baseados nas equações de Darcy-Richard, como qualquer modelo matemático, têm certas limitações. Uma delas é não considerar a componente preferencial do fluxo. Esta limitação é a mais séria delas e representa a maior fonte de incerteza na aplicação dos modelos para o estudo de transporte de fluidos no solo [79].

As limitações, nos presentes modelos usados, têm sido tratados muito superficialmente pelos cientistas de Física de Solos, mesmo sabendo que o fluxo preferencial é um fenômeno que produz consequências práticas muito importantes. Nos últimos anos, devido à crescente preocupação relacionada ao impacto de substâncias contaminantes nos recursos da água e do solo, bastante ênfase tem-se dado para explicar a distribuição espacial e temporal dos fluídos na região não saturada do solo. O enfoque dos modelos tem sido colocado na variabilidade espacial das propriedades hídricas, no fluxo através de fraturas e macroporos, e nos buracos deixados pelas minhocas ou raízes [80]. Também, modelos estocásticos obtidos da Física Estatística utilizando teoria de percolação [81, 82, 83] e automatas celulares [84, 85], além de aproximações numéricas e estocásticas [86, 87].

## B) Fenômeno "fingering"

O fenômeno "fingering", também chamado de instabilidade hidrodinâmica ou instabilidade da frente de molhamento é um caso particular de fluxo preferencial, motivo desta tese. O mesmo aparece quando um fluído menos viscoso (por exemplo água) é injetado sobre outro mais viscoso (por exemplo petróleo). Em solos, ele pode ocorrer quando o líquido (água ou soluto) encontra, durante o seu movimento uma interface de variação brusca da condutividade hidráulica, passando de um valor menor (por exemplo: solo de textura fina) para um maior (textura grossa). Dependendo do tipo de forças que dominam o processo, o "fingering" pode ser de caráter viscoso ou capilar [88]. O "fingering" viscoso, importância vital e presente em muitos processos, como de recuperação de petróleo, fenômenos hidrodinâmicos e outros, será tratado no próximo capítulo. A seguir, trataremos do "fingering" em solos, que basicamente, é de caráter capilar e tem uma grande importância prática. Como exemplo, as substâncias contaminantes como pesticidas, compostos químicos, metais pesados, lixo radioativo, hospitalar, urbano e outras poluentes, podem atingir rapidamente o lençol freático e comprometer a qualidade dos mananciais de água que posteriormente servirão para irrigação ou mesmo para consumo da população.

O fenômeno "fingering" em solos tem sido estudado extensivamente, tanto no laboratório [19, 89, 31] como no campo [27, 28]. Estes estudos têm sido basicamente em duas dimensões, através de observações visuais do fenômeno, transmissão de luz, digitalização e processamento de imagens [30].

Experimentos realizados recentemente tem mostrado que a ocorrência do fenômeno "fingering" pode-se dar ocasionalmente durante a infiltração e redistribuição de líquidos [22, 23]. Nesses casos as condições iniciais de umidade do solo e as condições de fronteira desempenham um papel relevante na ocorrência ou não do fenômeno. Conseqüentemente, o fenômeno "fingering" pode aparecer, mesmo em solos homogêneos [26]. Por exemplo, em situações de irrigação do solo, inicialmente seco, umedecimentos discretos do terreno podem ser observados causando desequilíbrio na absorção de água e nutrientes pelas plantas ou sementes, já que algumas partes do solo tornam-se saturadas e outras totalmente secas. Esta situação fornece um problema experimental metodológico: cria-se uma forte variabilidade espacial que dificulta o processo de amostragem para a medida da umidade do solo ou para a localização e balanço de nutrientes e poluentes ao longo da superfície e sub-superfície do solo [79].

Em relação a modelos teóricos, para explicação do fenômeno "fingering", alguns esforços tem-se realizado, sendo os mais relevantes, por exemplo, Raats [32]; Philip [33]; Hillel e Baker [34], Baker e Hillel [24], Glass et al [22, 23] e Chang [35].

No entanto, estes modelos ainda não são suficientes para descrever adequadamente a ocorrência do fenômeno "fingering" em condições reais de campo ou mesmo de laboratório. Principalmente, quando o fenômeno apresenta um comportamento tridimensional com uma grande variabilidade espacial e temporal em sua estrutura interna incapaz de ser observada externamente [90].

Recentemente, Glass [25], Glass e Parlange [17] fizeram uma ampliação de seu modelo original em duas dimensões para 3 dimensões, sendo "validada" experimentalmente no laboratório. Embora de modo bastante criativo e prático, o experimento desenvolvido por estes autores, foi realizado em condições estáticas e destrutivas. A amostra de areia usada (recipiente cilíndrico, no caso) foi "irrigada" na sua superfície e congelada após atingir o seu equilíbrio hidrodinâmico. Em seguida, foi extraída a parte de solo seco (não molhado pela irrigação) ficando assim, só o "esqueleto", por onde o fluxo se deslocou preferencialmente durante a irrigação. Este "esqueleto" ("fingers" congelados) foi, em seguida, cortado em fatias para quantificar os "fingers" gerados. Certamente, todo este processo metodológico introduz uma perturbação muito grande que poderá refletir na validação do modelo.

Assim, o fenômeno "fingering" ainda apresenta grandes desafios para a pesquisa científica, tanto do ponto de vista de modelos teóricos como de experimentos. Do ponto de vista teórico, toda vez que o fenômeno apresentar uma alta "estocasticidade" em sua ocorrência e comportamento, será necessário introduzir teorias modernas que levem em conta esta característica estocástica ou não determinística. Do ponto de vista experimental, pela grande variabilidade espacial e temporal, serão necessárias metodologias capazes de apresentar uma visualização tridimensional do fenômeno. É o caso por exemplo, das técnicas de tomografia por imagens de RMN, raios X e outras que apresentem a possibilidade de mostrar imagens bi e tridimensional em tempo real.

No próximo capítulo, descreveremos algumas teorias recentes advindas da mecânica estatística que servirão de partida para uma caracterização teórica do referido fenômeno.

## CAPITULO III

### TEORIAS

Neste capítulo, descreveremos alguns modelos estatísticos (não determinísticos) extraídos da Mecânica Estatística que, nos últimos anos, tiveram grande aplicação pelo sucesso na descrição de fenômenos randômicos próprios dos sistemas desordenados ou fenômenos críticos. Grande parte destes modelos, conhecidos como modelos de crescimento ou "fractal growth phenomena", estão sendo extensivamente usados pelos cientistas tanto das ciências básicas como aplicadas no decorrer dos últimos anos. Estes modelos, pela randomicidade, envolvida no processo de simulação e característica fractal, estão mais próximos da representação de muitos fenômenos naturais como a formação de cristais de gelo, eletrodeposição, fenômeno "fingering", formação de nuvens, sedimentação, fraturas e outros, comparados com os modelos clássicos ou determinísticos, baseados na geometria euclidiana. Assim, começaremos descrevendo a teoria da geometria fractal, sua diferença em relação à geometria euclidiana e como os fractais descrevem melhor os fenômenos naturais. Logo em seguida, discutiremos o fenômeno "fingering" viscoso e capilar em hidrodinâmica, suas características físicas e importância prática. Finalmente, nos concentraremos na descrição do modelo particular de crescimento, da teoria de percolação "ordinária", da percolação por invasão e as modificações introduzidas na invasão para simular o fenômeno "fingering" em solos que chamaremos de invasão "modificada".

#### 3.1.- Geometria fractal

Durante as últimas décadas, foi identificado pelos físicos das mais diversas áreas que muitos objetos experimentais possuíam estruturas que apresentavam um tipo especial de complexidade geométrica. A evidência destes objetos foi amplamente divulgada por Benoit Mandelbrot [39, 165], que chamou a atenção das propriedades geométricas particulares de objetos tais como as costas dos continentes, os ramos das árvores ou as superfícies das nuvens.

Mandelbrot chamou de "fractal" a estas formas complexas para expressar que elas podem ser caracterizados por uma dimensionalidade não inteira (fracionária). Com o desenvolvimento da pesquisa, nesta direção, a lista de exemplos fractais é muito ampla, incluindo estruturas de agregados microscópicos até "clusters" de galáxias.

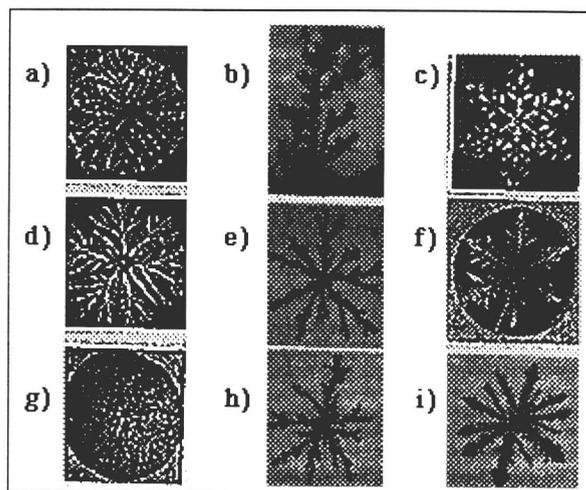


Fig. 3.1. Exemplo de estruturas geométricas complexas observadas em vários experimentos com interfaces instáveis de crescimento. a), b) e c) são três situações dos fenômenos de cristalização. d), e) e f) são exemplos de *fingering* viscosos sob três condições diferentes. g), h) e i) representam três estruturas diferentes de eletrodeposição de zinco. A dimensão fractal encontrada para às estruturas da coluna do meio é  $D \approx 1.7$  [92].

Um importante campo de aplicação dos fractais constituem os fenômenos de crescimento longe do equilíbrio termodinâmico, comuns em muitos campos da ciência e tecnologia, exemplos destes processos incluem solidificação dendrítica, "fingering" viscoso, eletrodeposição e outros (vide Fig. 3.1). Na década dos 70, a maioria de físicos da área de Mecânica Estatística foram envolvidos com os problemas de transição de fase de segunda ordem no equilíbrio termodinâmico. Estes estudos levaram a importantes teorias e métodos, incluindo a renormalização [91] baseada na invariante de escala do sistema. Os fractais de

crescimento também são objetos invariantes de escala (esta propriedade é equivalente a sua auto similaridade). Assim, o conhecimento acumulado das pesquisas de transição de fase de segunda ordem, propiciou o rápido desenvolvimento dos processos fractais, colocando também em evidência o escalonamento multifractal, uma generalização dos fractais, característica importante de muitos fenômenos de crescimento [88, 92].

Algumas propriedades básicas de objetos com dimensões "anômalas" (diferente da euclidiana), foram observadas e pesquisadas já no começo do século por Hausdorff [93] e Besicovitch [94]. A relevância dos fractais na Física e outros campos do conhecimento foi relatada por Mandelbrot, que mostrou a riqueza da geometria fractal, apresentando importantes resultados através das publicações de seus livros sobre este assunto [95, 165, 39]. A seguir, faremos uma introdução sobre os conceitos básicos, propriedades e diferentes tipos de fractais.

### 3.1.2.- Fractais Matemáticos e objetos Físicos

Uma característica comum dos objetos fractais é que eles apresentam auto-similaridade (invariante de escala). Exemplos destes objetos são as linhas costeiras, árvores, montanhas, nuvens entre outros.

Para formas mais simples, a auto-similaridade não ocorre perfeitamente ou é satisfeita de forma trivial. Por exemplo, um círculo e suas partes (um arco) não tem o mesmo aspecto. Mas, naturalmente um círculo (um disco) e qualquer menor disco daí retirado será trivialmente similar (pode ser tirado de qualquer outro por redução ou extensão). No entanto, se observamos a curva triádica de Koch (Fig. 3.2), podemos ver que em qualquer escala de observação, a célula "unitária" geradora do objeto é repetida infinitamente. A auto-similaridade pode ser expressa matematicamente como segue [92]:

$$N_i \left( \frac{\varepsilon}{r_i} \right) = N(\varepsilon) \quad (3.1)$$

onde  $N(\epsilon)$  é o número de "caixas" de tamanho  $\epsilon$  para varrer a estrutura toda e  $N_i(\epsilon/r_i)$ , é o número de "caixas" de raio  $(\epsilon/r_i)$  necessárias para cobrir a estrutura toda no estágio- $i$ .

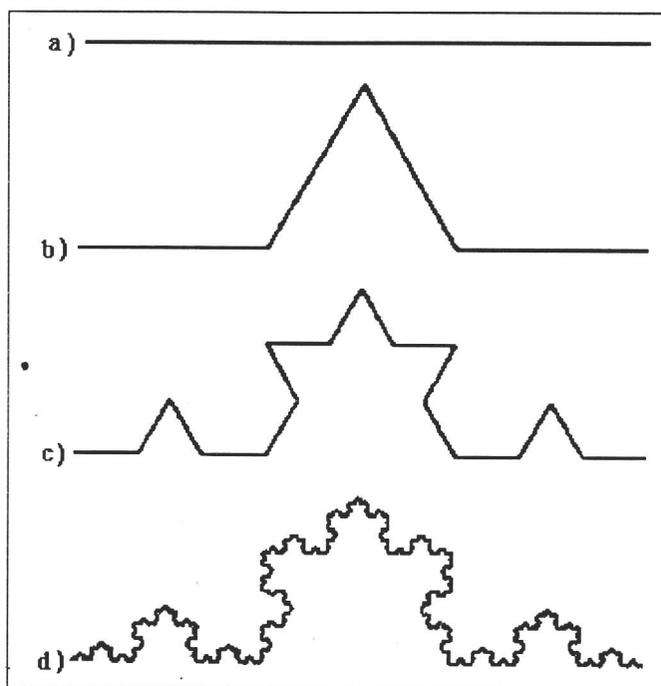


Fig. 3.2. Curva triádica de Koch. em a) o segmento unitário é dividido em 3 segmentos iguais. O segmento do meio é então transformado em dois outros (b), obtendo-se agora 4 novos segmentos na primeira geração  $n=1$  (cela inicial de geração). Cada um dos quatro segmentos é novamente dividido em três, obtendo-se (c) a segunda geração ( $n=2$ ). O aspecto do objeto depois da quinta geração ( $n=5$ ) é mostrado em (d). O fractal é obtido quando o processo se repete indefinidamente.

Uma segunda característica dos objetos fractais é sua dimensão fracionária  $D$  (a diferença da geometria euclidiana que define dimensões inteiras), a qual é maior que sua dimensão topológica  $D_t$  (para um ponto,  $D_t$  é igual a zero; para uma curva,  $D_t = 1$ ; e para uma superfície,  $D_t = 2$ ) e menor que a dimensão do espaço no qual o fractal está imerso ( $d=2$ , no caso da curva triádica de Koch) [39]. Assim,  $1 < D < 2$  para objetos fractais lineares,

$2 < D < 3$ , para objetos fractais definidos no plano e  $2 < D < 3$ , para objetos fractais definidos no espaço (Fig. 3.3). A dimensão  $D$  é o parâmetro que caracteriza quanto compacto é o objeto. Esta dimensão é definida como segue [39]:

da geometria euclidiana, para um segmento de reta de tamanho unitário, dividido em  $N$  partes iguais, sendo cada parte representada por  $r = 1/N$  ou  $r N = 1$ , para uma superfície unitária,  $r = 1/N^{1/2}$  ou  $r^2 N = 1$  e para um volume de tamanho unitário  $r = 1/N^{1/3}$  ou  $r^3 N = 1$ . Assim, generalizando para uma dimensão qualquer  $D$  (fracionária),  $r N^D = 1$ , podendo então defini-se a dimensão fractal  $D$  [96] como sendo:

$$D = \frac{\log N(r)}{\log(1/r)} \quad (3.2)$$

Por exemplo, no caso da curva triádica de Koch, em a) o segmento unitário é dividido em ( $r'=3$ ) ( $r=1/r'$ ) segmentos iguais. O segmento do meio é então transformado em dois outros b) obtendo-se agora  $N (=4)$  novos segmentos na primeira geração ( $n=1$ ). Cada um dos quatro segmentos é novamente dividido em três, obtendo-se c) a segunda geração ( $n=2$ ). O aspecto do objeto depois da quinta geração ( $n=5$ ) é mostrado em d). O fractal é obtido quando o processo se repete indefinidamente. Assim, no estágio  $n$ ,  $r' = (1/3)^n$  e  $N(r') = 4^n$ , que introduzido na equação (3.2), a dimensão fractal desta curva pode ser calculada:  $D = \log N / \log r = \log 4 / \log 3 = 1.26\dots$

Uma terceira característica dos objetos fractais é a sua relação de "massa" com o seu tamanho linear  $L$  (onde  $L$  é medido em termos da geometria euclidiana). Por exemplo, a "massa" de um objeto fractal (ou qualquer outro)  $M(L)$  pode ser medido preenchendo todo o objeto com "esferas" ou "caixas" de lado  $r$ , sendo a massa expressa como:

$$M(r) = N(r) r^d \quad (3.3)$$

onde  $N(r)$  é o número de "caixas" necessários para cobrir o objeto todo,  $M(r)$  é a "massa" no sentido matemático,  $d$  é a dimensão euclidiana e  $r \ll L$ .  $N(r)$  deverá ser o número dos "boxes" menores com que a varredora será realizada. Para objetos ordinários (não fractais)  $M(r)$  rapidamente atinge um valor constante, enquanto que para objetos fractais  $M(r) \rightarrow 0$ , quando  $r \rightarrow 0$ . De outro lado, a superfície dos objetos fractais pode ser anormalmente grande (infinito) em relação a seu tamanho  $L$ . Por exemplo, a superfície de Von Koch cresce indefinidamente conforme  $r$  decresce ( $r \rightarrow 0$ ) [92, 88].

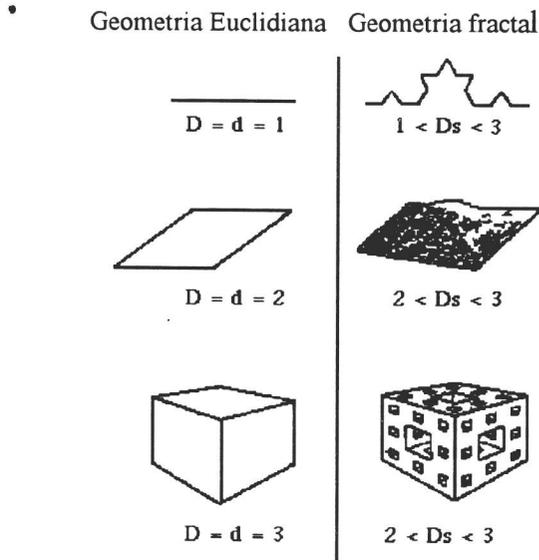


Fig. 3.3. Comparação entre a geometria fractal e a geometria euclidiana.  $D$ ,  $d$  e  $D_s$  representam dimensão topológica, euclidiana e fractal, respectivamente [97].

Do ponto de vista da física, os objetos fractais não possuem auto-similaridade em todas as escalas de observação. Em física, os objetos fractais possuem auto-similaridade dentro de uma faixa limitada de escala superior ("upper cutoff") e inferior ("lower cutoff") de observação. Na maioria das vezes, esta auto-similaridade é estatística, isto é, os objetos

fractais físicos possuem "auto-similaridade estatística", o que significa que a célula geradora é uma réplica estatística do objeto em uma faixa definida de escalas de observação.

### 3.1.3.- Fractais determinísticos e randômicos

Matematicamente, é possível satisfazer o conceito de auto-similaridade exatamente para os objetos fractais, de forma que a medida de sua "massa" depende do parâmetro  $r$ , mesmo que  $(r/L)$  ( $L$  é o tamanho da estrutura) seja o menor valor que qualquer valor finito (por exemplo, podemos fixar  $r$  e fazer  $L \rightarrow \infty$ ). Estes objetos são também chamados de fractais determinísticos. Por exemplo, na figura 3.4a, temos uma estrutura (dentro do espaço euclidiano  $d=2$ ) que vai crescendo a partir de um tamanho típico unitário " $a$ " ( $\square$ ). A "massa" deste objeto considerada como uma função linear de  $L$ ,  $M(L)$ , é preenchida pelos "boxes" de "massa" unitária  $\square$  ( $a = 1$ , usualmente assumido), então  $M(L)=N(L)$ , sendo  $N(L)$  o número de tais "boxes". Desta forma,  $N(L)$  é escalado conforme o expoente fracionário  $D$  [92],

$$N(L) \propto L^D \quad (3.4)$$

consequentemente, se define:

$$D = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\log N(L)}{\log(L)} \quad (3.5)$$

Esta equação é a relação de auto-similaridade para objetos fractais de crescimento, a partir de um parâmetro mínimo unitário ( $a=1$ ), como função do tamanho  $L$  da estrutura (fractal de tamanho infinito).

No entanto, no sentido inverso, para fractais finitos de ramificações infinitamente pequenas (Fig. 3.4b), onde agora  $L$  será fixo, mas  $r \rightarrow 0$  ( $r \ll 1$ ), teremos que:

$$N(R) \propto r^{-D} \quad (3.6)$$

e se define,

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log(1/r)} \quad (3.7)$$

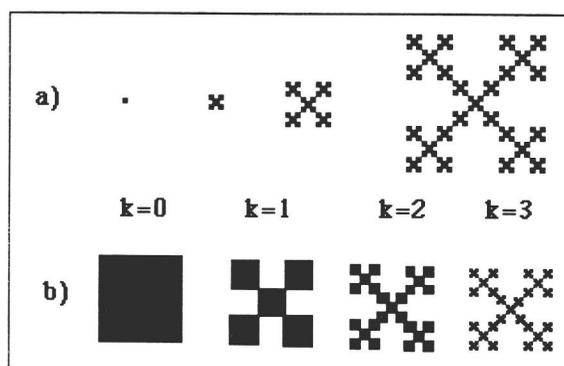


Fig.3.4.- Exemplo de uma construção de um fractal determinístico. Em (a) tem-se uma estrutura fractal de crescimento, usando um procedimento iterativo. (b) representa uma estrutura análoga, só que desta vez, a estrutura foi obtida a partir de sucessivas divisões do quadrado original. Quando  $k \rightarrow \infty$  ambas as estruturas têm dimensão fractal  $D=1.465\dots$ .

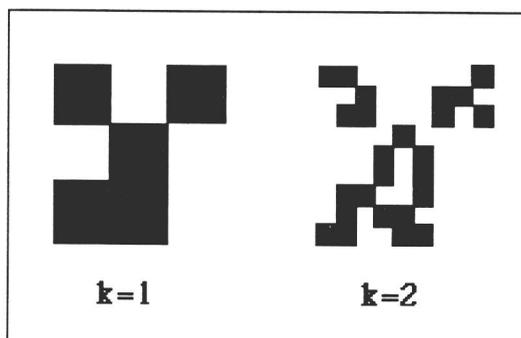


Fig. 3.5. Construção de um fractal estocástico. A dimensão fractal desta estrutura é igual dimensão fractal da estrutura da figura 3.4. Só a forma de suas estruturas são diferentes.

As equações (3.5) e (3.7) são complementares, pois ambas as relações nos levam a caracterizar uma mesma estrutura fractal (Figs. 3.4a e 3.4b) obtidas por agregação ou crescimento ( $r=\text{fixo}$ ,  $L \rightarrow \infty$ ) e por divisão ("desagregação") ( $r \rightarrow 0$ , e  $L = \text{fixo}$ ). Assim, em ambas as relações  $N(L)$  e  $N(r)$  divergem quando  $L \rightarrow \infty$  e  $r \rightarrow 0$ , respectivamente.

Para descrever objetos fractais de tamanho finito ( $L < \infty$ ), que são os de interesse da Física, podemos usar uma quantidade adimensional  $\varepsilon$  definido como  $\varepsilon = r/L$ , que será o tamanho dos "boxes" de cobertura, normalizada ao tamanho linear da estrutura  $L$ . Então, quando  $r$  é fixo e  $L=r/\varepsilon$ , obtém-se de (3.4):

$$N\left(\frac{r}{\varepsilon}\right) \propto \left(\frac{r}{\varepsilon}\right)^D \quad (3.8)$$

Como  $r$  é constante, então:

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D} \quad (3.9)$$

Agora, fixando-se  $L$ ,  $r=L\varepsilon$  em (3.6) ( $L=\text{constante}$ ):

$$N(L\varepsilon) \propto (L\varepsilon)^{-D} \quad \dots > \quad N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D} \quad (3.10)$$

onde  $\varepsilon \ll 1$ ,  $N(\varepsilon)$  é o número de "boxes" de dimensão euclidiana  $d$  e de raio  $L\varepsilon$  necessários para cobrir o objeto todo e  $D$  a dimensão fractal. Desta forma, para discussão das propriedades de fractais, em geral, a relação (3.10) é usada. Mas, no caso de fractais de modelos de crescimento, é mais conveniente usar a expressão (3.4).

Os objetos fractais até aqui descritos são determinísticos ou matemáticos, pois eles têm uma lei de crescimento (ou divisão) definida. No caso de crescimento, figura 3.4, a lei de crescimento é:  $N(L) = n^k$ ,  $L=r^k \cdot a$ ,  $k=0,1,2,\dots$ ,  $n=5, a=1$  e  $r=3$ . Assim:  $D = \log 5 / \log 3 = 1.46\dots$ . No caso de divisão, figura 3.5, a lei de divisão é:  $N(r) = n^k$ ,  $r = (1/3)^k$ , como  $n=5$  e  $r = (1/3)^k$ ,

$D = \log 5 / \log 3 = 1.46\dots$ . Nestes objetos fractais, usamos o mesmo parâmetro ( $r$ ) de crescimento ou de divisão ( $1/r$ ) para as cópias de todos os objetos. Neste sentido, estes objetos fractais são considerados uniformes. Uma importante generalização deste caso é quando o fator de redução ( $1/r$ ) não é mais idêntico para as  $n$  cópias criadas. O fractal é produzido pela divisão de um objeto original, mas desta vez com fatores  $r_i > 1$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ ) não idênticos. Estes fractais, assim produzidos, são chamados de fractais determinísticos não uniformes [92].

A estrutura mostrada na figura 3.5, obtida a partir da figura 3.4b, com as posições das partes reduzidas trocadas representa uma simples (talvez a mais simples) versão de possíveis fractais randômicos. Também poderíamos ter mudado o número de tais unidades e/ou fazer o parâmetro de redução  $r_i$  flutuar em torno de seu valor médio. A dimensão fractal desta estrutura é coincidente com a dimensão da figura 3.5b, pois o número de "boxes" para cobrir ambas as estruturas são as mesmas. Mas, em geral, para determinar a dimensão fractal  $D$  de um objeto fractal randômico, não existe uma expressão geral ou uma lei como as apresentadas nas equações (3.4) e (3.6). Neste caso,  $D$  é calculado através de técnicas teóricas e numéricas, que iremos descrever mais adiante.

### 3.1.4.- Auto-afinidade fractal

Objetos fractais auto-similares são estruturas que podem ser reescaladas isotropicamente sob uma transformação que envolve mudança no comprimento de escala. Isto é, as mudanças de escala em qualquer direção são as mesmas ou estão afetadas por um mesmo fator. Para estas estruturas, a dimensão fractal  $D$ , como definida na seção anterior é única. No entanto, na maioria das vezes, isto não acontece, pois nem sempre as mudanças de escala são as mesmas. Pode acontecer que o escalonamento em uma direção esteja afetada por algum parâmetro diferente do escalonamento em outra direção, ou seja, a existência de uma certa anisotropia na estrutura do objeto fractal. Estes tipos de estruturas fractais geram os chamados fractais auto-afim, apresentam uma certa afinidade (preferencia) de crescimento ou escalonamento adequado. Grande parte dos objetos fractais na natureza pertencem a estruturas

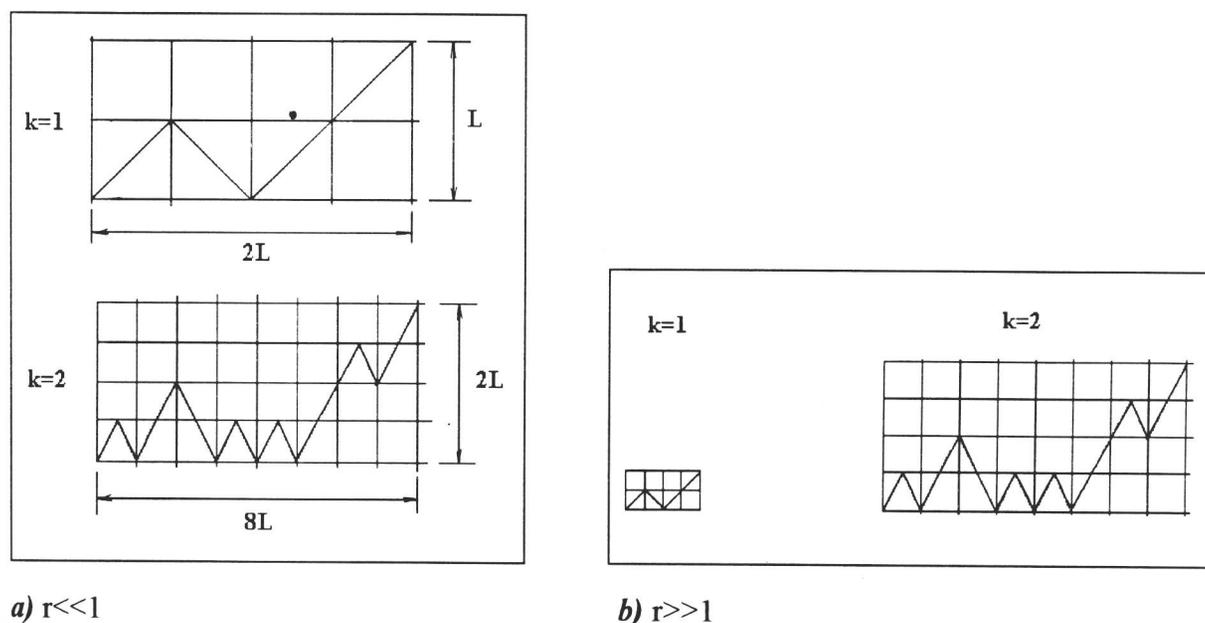
fractais auto-afim. Por exemplo, os fenômenos de corrosão, o deslocamento dos fluidos, através de um meio poroso, os fenômenos hidrodinâmicos, as superfícies rugosa, eletrodeposição e outros são processos fractais estatisticamente auto-afim [98].

A diferença entre os objetos fractais auto-similares, e os objetos fractais auto-afins é caracterizada por duas dimensões fractais. Uma dimensão fractal  $D_l$ , chamada de local e outra dimensão fractal  $D_g$ , chamada de global [92, 99, 39, 100, 101]. Um fenômeno interessante que envolve este contexto é o movimento Browniano. Por exemplo, o processo  $B(t)$  que descreve a distância deslocada por uma partícula browniana no tempo  $t$ , pode ser estatisticamente reescalada sobre si mesma pela transformação:  $B(t) \rightarrow b^{-H} B(bt)$ , onde  $H$  é um expoente,  $0 < H < 1$ , chamado de expoente de Hurst [39, 99, 102]. Nesta relação, observamos que o escalonamento nas coordenadas tempo  $t$  e distância são diferentes. Assim, para uma função que escala da forma [92]:

$$F(x) \approx b^{-H} F(bx) \quad (3.11)$$

esta função é auto-afim, onde  $H > 0$  é um expoente. Esta expressão de fato, será invariante sob o seguinte escalonamento: encolhendo ao longo do eixo- $x$  por um fator  $1/b$ , seguido por reescalamento do valor da função (perpendicular ao eixo- $x$ ) por um fator  $b^{-H}$ . Para alguma função determinística auto-afim, a relação (3.11) será dada exatamente, enquanto que para funções estatisticamente auto-afim (3.11) será dada em forma aproximada. A estrutura da figura 3.6 é um exemplo de um fractal auto-afim (determinístico), onde ele é rescalonado na direção do eixo- $y$  com fator  $2^n$  e, na direção do eixo- $x$ , é escalonado por um fator  $4^n$ . Para o caso de sua dimensão fractal local  $D_l$  da mesma estrutura ( $r \ll 1$ ), usando os argumentos do item anterior, temos:  $r = (1/4)^n$ ,  $N(r) = 4^n \cdot 2^{n-1}$ . Substituindo-a em (3.7),  $D_l = [\lim_{n \rightarrow \infty} \log(4^n \cdot 2^{n-1}) / \log(4^n)] = 1.5$ . Para o cálculo da dimensão fractal global  $D_g$ , usamos os mesmos argumentos, só que desta vez  $r \gg 1$ , então:  $r = 4^n$ ,  $N(r) = 4^{n-1}$  e  $D_g = [\lim_{n \rightarrow \infty} \log(4^{n-1}) / \log(4^n)] = 1$ . Em geral, para qualquer estrutura fractal auto-afim, a dimensão fractal local é relacionada com o parâmetro  $H$  como segue,  $D_l = d - H$ , e para a dimensão fractal

global  $D_g = d-1$ , sendo  $d$  a dimensão euclidiana onde o fractal está imerso. Na passagem do limite da dimensão do fractal local  $D_l$  para a global  $D_g$ , existe uma zona de transição chamada de "crossover", mas os resultados obtidos nesta região são um tanto ambíguos e de difícil interpretação [99]. Contudo, na região de dimensão fractal global, a estrutura é considerada não fractal [92].



**Fig. 3.6.** Esquema mostrando uma estrutura fractal auto-afim determinística. Dois estágios do processo de crescimento,  $k=1$  e  $k=2$  são apresentados: a) para  $r \ll 1$  e b) para  $r \gg 1$  [99].

As técnicas para calcular a dimensão fractal local  $D_l$  dos objetos fractais estatisticamente auto-afins são as mesmas usadas no cálculo da dimensão fractal dos objetos fractais estatisticamente auto-similares. Conforme descreveremos a seguir.

### 3.1.5.- Técnicas para o cálculo da dimensão fractal de uma estrutura

Existem várias técnicas para o cálculo da dimensão fractal "D" de estruturas estatisticamente auto-similares ou auto-afins. Estas podem ser teóricas, por exemplo usando a densidade de correlação [92, 103]; experimentais, por exemplo espalhamento de raios-X [88, 92] ou NMR [102] e numéricas com por exemplo o método de "box-counting", "sand-box", "compass-dimension" e outros [96, 97, 88, 105, 106]. Nesta tese, descreveremos brevemente o método de "box-counting" e "sand-box", que são as técnicas que iremos empregar na caracterização do fenômeno "fingering" em solos. Para um estudo detalhado das diferentes técnicas para o cálculo de "D", são recomendadas as leituras das referências: [88, 103, 92, 97, 106].

#### a) Método de "box-counting"

Na figura 3.7, ilustra-se o uso deste método. São apresentadas diferentes grades ou malhas construídas a partir do centro de gravidade da estrutura, cuja dimensão fractal se deseja conhecer. As malhas são desenhadas a partir de um quadrado original, cujo centro geométrico coincide com o centro de gravidade da estrutura. Em cada estágio da malha (L) (o número de partes iguais em que o lado do quadrado é dividido) são contados os quadrados que contêm parte da estrutura  $N(L)$ . Repetidamente, a partir dos dados encontrados, constrói-se o gráfico de  $\text{Log}L \times \text{Log}N(L)$ . Se o gráfico assim obtido for uma reta, então o comportamento da estrutura tem auto-similaridade ou auto-afinidade estatística ou fractal, cuja dimensão  $D$  é obtida pelo cálculo do coeficiente angular da reta [107, 108, 109]. Para estruturas mais compactas, é recomendável fazer uma estatística, isto é, repetir a contagem dos  $N(L)$  para diferentes quadrados construídos a partir do centro de gravidade da estrutura (quadrados com lados diferentes). Desta forma, obtém-se um conjunto de valores de  $N(L)$  para outro conjunto de valores de  $L$ . Estes dados são tratados estatisticamente para obter o valor da dimensão fractal "D" [110, 111].

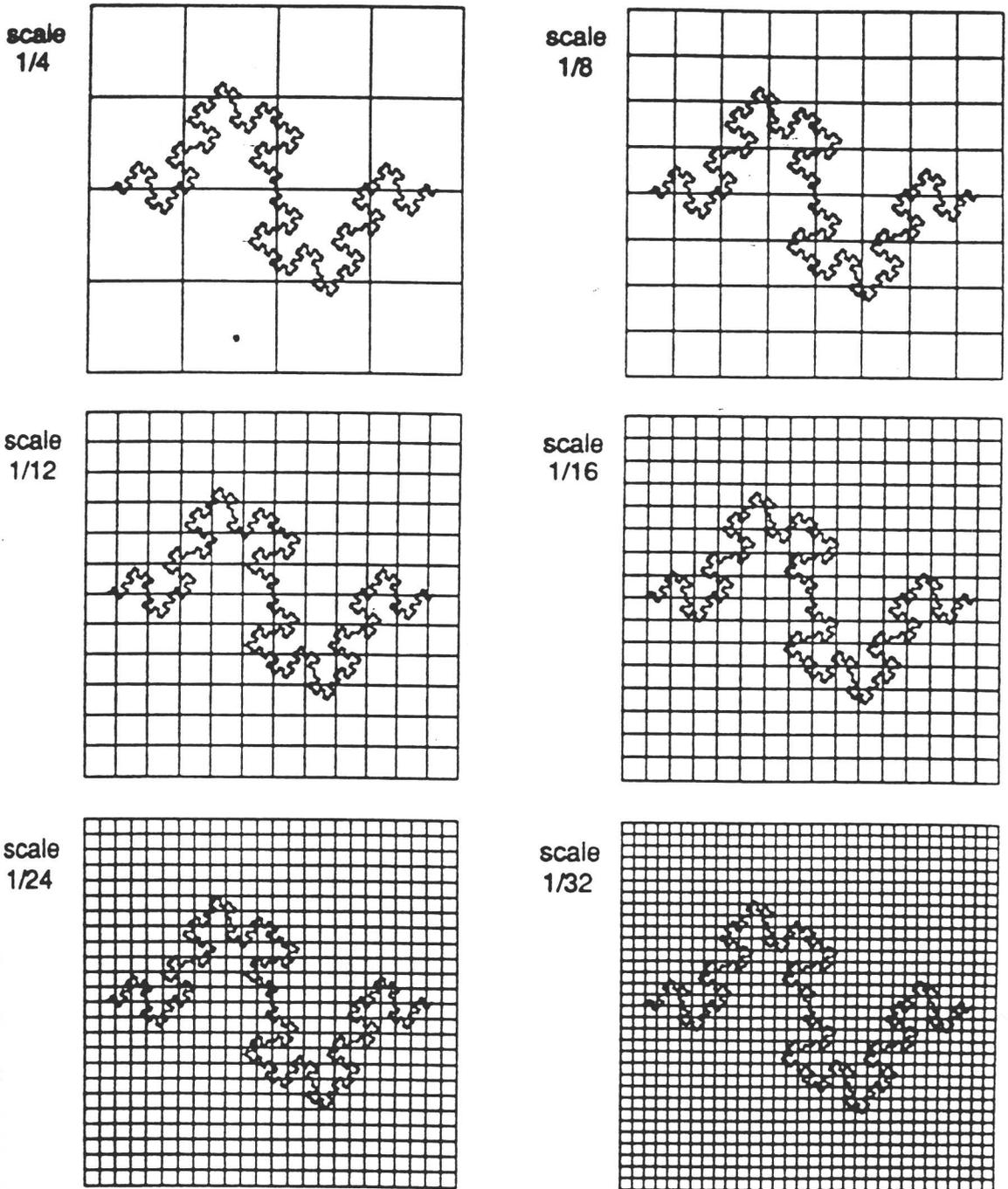


Fig. 3.7. Método de "box-counting" para o cálculo da dimensão fractal [97]. No caso deste exemplo, a dimensão fractal calculada foi  $D \cong 1.26$ .

## b) Método de "sand-box"

Este método é o mais recomendável a ser usado quando se quer calcular a dimensão fractal de estruturas compactas. A partir de um ponto (escolhido aleatoriamente) que pertence à estrutura fractal cuja dimensão se quer calcular, constrói-se um quadrado imaginário  $L_i \times L_i$  ( $i=1$ ). O número de pontos  $N(L_i)$  que pertencem à estrutura contidos dentro deste quadrado é contabilizado. Então o quadrado é deslocado para outro ponto dentro da estrutura e novamente é contabilizado o número de pontos  $N(L)$  que ficam dentro do quadrado. Assim por diante, toda a estrutura é varrida deslocando o quadrado  $L_i \times L_i$  e contabilizando os  $N_i(L_i)$  em cada estágio. Em seguida, é mudado o tamanho do quadrado  $L_i \times L_i$  ( $i=2$ ) e repetido todo o processo anterior. Finalmente tem-se um conjunto de valores  $N_i(L_i)$ , para diferentes valores dos quadrados  $L_i \times L_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) construídos imaginariamente. A partir destes dados, é feito um tratamento estatístico para o cálculo da dimensão fractal [107, 92, 112].

### 3.2.- "Fingering" viscoso

O problema do "fingering" viscoso em meios porosos é de vital importância na recuperação do petróleo [2, 6, 3]. Também é um problema interessante do ponto de vista hidrodinâmico e da física dos meios porosos, pois o "fingering" é um dos fenômenos de crescimento longe do equilíbrio termodinâmico e basicamente tridimensional. Neste aspecto, o "fingering" viscoso apresenta invariante de escala (autosimilaridade), sendo então, muito promissora, o uso de teorias como do grupo de renormalização (RG), "scaling" e, em geral, as teorias dos sistemas desordenados [38, 16].

#### 3.2.1.- Cella de "Hele-Shaw"

A cela Hele-Shaw consiste de duas placas paralelas transparentes de tamanho  $L$  separadas por uma distância  $b$ . Hele-Shaw (1898) estudou o fluxo de água através de vários objetos usados como cela. Ele observou as linhas de corrente de fluxo injetando substâncias

corantes que marcavam em cores estas linhas de corrente. Suas experiências mostraram que para uma cela Hele-Shaw com valor pequeno de  $b$  ( $b \ll 1$ ), o fluxo tinha características de um "potencial de fluxo" para um baixo número de Reynolds [113]. Quando  $b$  era aumentado, o fluido tornava-se turbulento com linhas de corrente confusas. Assim, considerando a cela de Hele-Shaw da figura 3.8, a equação da velocidade de fluxo  $\bar{V}$ , obtida a partir da equação de Navier-Stokes [113] que governa o fluxo é dada por [88]:

$$\bar{V} = -\frac{K}{\mu} \bar{\nabla}(p + \rho gz) \quad (3.12)$$

onde  $\bar{V}$  é a velocidade média sobre a espessura da cela,  $p$  a pressão,  $\rho$  a densidade do fluido,  $g$  a aceleração da gravidade,  $z$  a coordenada no eixo- $z$ ,  $\mu$  a viscosidade do fluido e  $K=b^2/12$  a permeabilidade da cela.

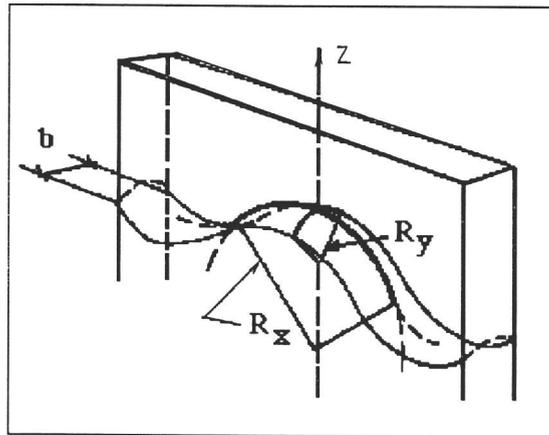


Fig. 3.8. Cela de Hele-Shaw, mostrando a geometria da interface fluido-fluido e os dois raios de curvatura  $R_x$  e  $R_y$  [88].

No caso de fluidos incompressíveis, usando a equação de continuidade, têm-se a equação de Laplace:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = -\frac{K}{\mu} \nabla^2 (p + \rho g z) = 0 \rightarrow \nabla^2 \phi = 0 \quad (3.13)$$

onde  $\phi = -K/\mu (p + \rho g z)$  é um potencial.

A equação (3.13) é característica de problemas de potencial encontrados em eletrostática, difusão e outros, estudados pela física. Por conseguinte, o fluxo controlado pela equação de Laplace (3.13) é chamado de potencial de fluxo [88].

A fim de encontrar uma solução para a velocidade de fluxo, deve-se especificar as condições de contorno do sistema. Por exemplo, uma pressão aplicada em ambos os extremos da cela e a velocidade do fluido igual a zero, quando em contato com as paredes do recipiente.

Também a interface entre dois fluidos (água e ar, por exemplo) quando estão em repouso, é controlada por forças capilares, sendo a diferença de pressão entre ambos expressa como:

$$\Delta p = (p_1 - p_2) = \gamma \left( \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad (3.14)$$

onde  $\gamma$  é a tensão superficial da interface entre os dois fluidos,  $R_x$  e  $R_y$  os dois principais raios de curvatura. Tipicamente  $R_x \gg R_y$ , quando  $b \ll 1$  [88].

Se injetamos um fluido (1) a uma taxa de velocidade constante  $V$  em  $z = -\infty$ , para extrair o fluido (2) na mesma taxa, em  $z = \infty$ , a interface entre os dois fluidos se deslocará com uma velocidade  $\vec{V} = (0,0,V)$  ao longo do eixo -  $z$ . Contudo, é observada uma instabilidade da interface, quando o fluido (1) tem uma viscosidade bem menor que do fluido (2). Engeberts e Klinkenberg [4] chamaram de "fingering" viscoso a esta instabilidade, que eles observaram quando usavam água para tirar petróleo de um meio poroso.

O fluxo em um meio poroso também é governado pela equação (3.12) e (3.13) e por conseguinte, o modelo de fluxo em uma cela de Hele-Shaw é geralmente usado para descrever a dinâmica do fluxo em um meio poroso. Devido a existir uma importante diferença nos processos físicos envolvidos a validade de usar a cela de Hele-Shaw, como um modelo de fluxo em um meio poroso, é questionada [88, 92].

A teoria acerca do "fingering" viscoso foi desenvolvida e comparada experimentalmente por Saffman e Taylor [9] e por Chuoke et al, [8], de modo independente. Nos anos mais recentes, pelo crescente interesse de se conhecer melhor o fenômeno, muitas teorias e experimentos foram desenvolvidos, sendo os mais relevantes: [38, 114, 115, 116].

Com a finalidade de testar a estabilidade do deslocamento da interface, Saffman & Taylor [9], Chuoke et al.[8], assumiram uma interface planar perturbada por uma função senoidal (comportamento ondulatório), sendo o deslocamento da interface em relação posição de referência planar expresso como:

$$\xi = \varepsilon \exp(2\pi n t + \frac{2\pi x}{\lambda} i) \quad (3.15)$$

onde  $\varepsilon$  é a amplitude da onda,  $n$  é o coeficiente de instabilidade,  $t$  é o tempo,  $\lambda$  é o comprimento de onda da perturbação,  $x$  é o eixo horizontal e  $i$  é o número complexo unitário. Se  $n < 0$ ,  $\xi$  decai com o tempo e a frente de deslocamento permanece estável; se  $n > 0$ , então  $\xi$  cresce exponencialmente tornando instável a frente de deslocamento.

Assumindo as equações (3.12) e (3.14) como válidas, e considerando somente termos lineares em  $\xi$ , na solução da equação de Laplace (3.13), resulta que a frente é instável para um comprimento de onda crítico  $\lambda_c$ , expresso como [88]:

$$\lambda > \lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{\left(\frac{\mu_2}{K_2} - \frac{\mu_1}{K_1}\right)(V - V_c)}} \quad (3.16)$$

onde  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  e  $V_c$  são a viscosidade, a condutividade hidráulica do fluido (1) e do fluido (2) e velocidade crítica respectivamente.

Perturbações com comprimentos de onda menores que  $\lambda_c$  serão estabilizadas pela tensão superficial. Assim, para todos os comprimentos de onda  $\lambda > \lambda_c$ , a frente de deslocamento será instável, sendo que perturbações com um comprimento de onda  $\lambda_{max}$  expresso como:

$$\lambda_{max.} = \sqrt{3} \lambda_c \quad (3.17)$$

apresentem a maior taxa de crescimento e dominem a dinâmica da frente de deslocamento [88].

Por outro lado, introduzindo a viscosidade  $\mu$  do fluido e para  $g \approx 0$  (desprezando os efeitos gravitacionais), encontra-se que [88]:

$$\lambda_{max.} \propto \sqrt{\frac{\gamma}{V \mu}} = \frac{1}{\sqrt{N_{ca}}} \quad (3.18)$$

onde o *número capilar*  $N_{ca}$ , é definido como:

$$N_{ca} = \frac{V \mu}{\gamma} \quad (3.19)$$

Este número capilar mede a relação entre as forças viscosas e as forças capilares. Se fixamos  $\mu$  e  $\gamma$ , então o número capilar  $N_{ca}$  governa a dinâmica de crescimento dos "fingers", já

que ele vai depender unicamente do módulo da velocidade  $\bar{V}$ . Se variarmos a velocidade  $\bar{V}$ , podemos controlar o número capilar  $N_{ca}$  e também controlar o domínio das forças viscosas ou capilares para o deslocamento da frente. Por exemplo, se a velocidade  $\bar{V}$  for grande, então as forças viscosas governarão o sistema. Ao contrário, se  $\bar{V}$  for pequena ou lenta, as forças capilares governarão o processo.

Estas teorias foram também demonstradas por Paterson, [117] e Maloy et al, [118], para diferentes valores do número capilar  $N_{ca}$ , usando uma cela Hele-Shaw circular com o líquido ejetado no centro da cela. Nittmann et al [6], usando também uma cela circular de Hele-Shaw e para um número capilar  $N_{ca} \gg 1$ , encontraram que as estruturas dos "fingers" gerados, tinha característica fractal, sendo medida a sua dimensão fractal  $D$  igual a 1.7, semelhante s estruturas obtidas através do modelo teórico de Agregação Limitada pela Difusão (DLA) [119].

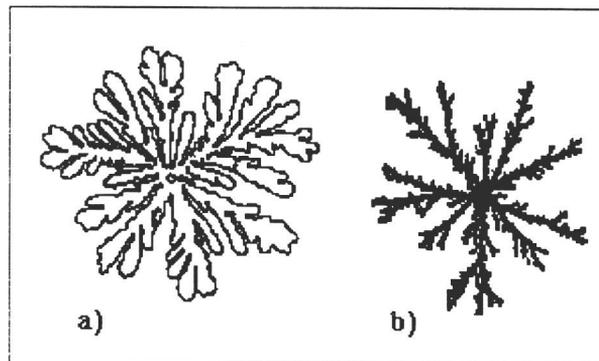


Fig. 3.9. "Fingering" viscoso gerado em uma cela radial de Hele-Shaw. Em (a) usou-se ar como fluido para deslocar o glicerol. O número capilar obtido foi  $N_{ca} = 0.1$ . A estrutura gerada é não fractal [41]. (b) Representa uma estrutura fractal. Neste caso usou-se água deslocando um fluido "não-Newtoniano" e altamente viscoso. A dimensão fractal desta estrutura foi  $D \cong 1.7$  [120].

A figura 3.9 apresenta duas experiências do fenômeno "fingering" viscoso em uma cela radial de Hele-Shaw: Em a) esta representada uma estrutura não fractal obtida usando-se o número capilar  $N_{ca} = 0.1$  [40, 41]. Em b) esta representada uma estrutura fractal, obtida usando-se um número capilar  $N_{ca} \gg 1$  [120]. Assim, o "fingering" viscoso, gerado através de uma cela de Hele-Shaw, pode ser de característica fractal somente sob certas condições físicas [92].

### 3.2.2.- "Fingering" viscoso em um meio poroso

O fluxo em um meio poroso também é controlado pelas mesmas equações (3.13) e (3.14) deduzidas para a cela de Hele-Shaw. Só que agora,  $K$  é a permeabilidade do meio poroso (não mais  $K=b/12$ ). Contudo, os experimentos mostraram que a dinâmica do "fingering" em um meio poroso é bastante diferente. Por exemplo, a figura 3.10 (objeto fractal) representa o "fingering" obtido em um meio poroso em condições semelhantes às obtidas na figura 3.9a [40, 41]. Ambas as figuras são completamente diferentes. A mais importante diferença entre a cela de Hele-Shaw e a cela contendo uma amostra porosa reside nas condições de contorno. Para um meio poroso, o fluxo é controlado por microscópicos comprimentos de escala (tamanho dos poros) em todas as direções do espaço. Na cela Hele-Shaw, o fluxo é controlado somente pelo parâmetro de escala  $b$  (separação entre as placas). A velocidade do fluxo  $V$  em um meio poroso, equação (3.13) continua sendo a mesma, só que agora leva o nome de equação de Darcy. Também a equação de Laplace (3.14) é válida para um meio poroso, mas com um sentido físico diferente. Na cela Hele-Shaw, o comprimento de escala, de fato é dado pelo comprimento da onda crítica  $\lambda_c$ , enquanto que no meio poroso, o comprimento de escala está associado ao tamanho dos poros. A dinâmica da frente de deslocamento do fluido também é diferente. Para a cela de Hele-Shaw, só é importante que a distribuição de pressão satisfaça às condições de contorno entre as duas placas (diferença absoluta de pressão entre os dois fluidos). Para um meio poroso, o deslocamento da frente está associado à pressão capilar da garganta do poro, que transmite o fluido de um poro para outro.

Isto introduz uma "randomicidade" no problema, desde que os diâmetros dos poros são distribuídos "randômicamente" no sistema poroso.

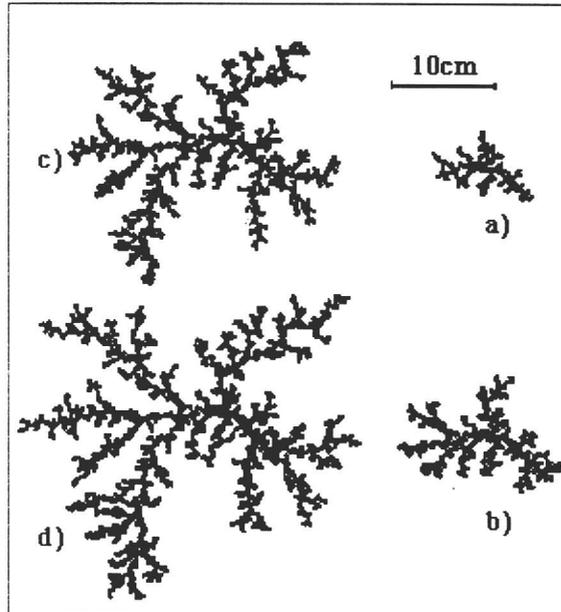


Fig. 3.10. Estrutura dos "fingers" gerados em uma cela radial de 40cm de diâmetro, contendo esferas de vidro como um meio poroso. As condições experimentais usadas foram as mesmas utilizadas no experimento da figura 3.9a. Esta estrutura têm característica fractal, como pode ser observada nos 4 estágios de seu crescimento [41].

Desta forma, a dinâmica da frente do "fingering" viscoso tem duas componentes : uma distribuição global (ou macroscópica) controlada pela lei de Darcy (através da equação de Laplace) e as flutuações locais a nível de poros (controlada pelo sistema de poros). Os resultados destes dois fatores fazem com que o crescimento do "fingering" em um meio poroso tenha característica fractal [122].

Assim, para um número capilar  $N_{ca} \gg 1$  a estrutura fractal dos "fingers" em um meio poroso ("fingering" viscoso) segue a lei do modelo de crescimento de Agregação Limitada

pela Difusão (DLA), com dimensão fractal  $D \approx 1.7$ . Para o número capilar  $N_{ca} \ll 1$  ("fingering" capilar), a estrutura do "fingering" observada tem características fractais do modelo de percolação por invasão [12, 123], com dimensão fractal  $D \approx 1.89$  [124].

Nos últimos anos, tem-se trabalhado intensamente, tanto do ponto de vista experimental como teórico, usando o modelo de DLA [21, 5, 3] nos estudos do fenômeno "fingering" viscoso e "fingering" capilar através do modelo de percolação por invasão [11, 12, 122, 13]. Estes trabalhos foram realizados basicamente em duas dimensões e consideram os efeitos gravitacionais desprezíveis. Em três dimensões, também tem-se trabalhado teoricamente [125] com alguns experimentos de validação. Porém, estes experimentos foram feitas em condições ideais e longe do que aconteceria em uma situação real [14]. A razão disto reside basicamente na dificuldade que o fenômeno apresenta em 3-D, onde os efeitos gravitacionais não podem ser mais desprezíveis. Soma-se ainda a carência de metodologias capazes de medir a dinâmica dos "fingers" em tempo real e observar o desenvolvimento dos "fingers" internamente ao material poroso. Contudo, alguns esforços tem-se realizado usando técnicas tomográficas, como imagens por RMN [15]), mas ainda em condições estáticas e usando materiais bastante idealizados, como esferas de vidro por exemplo. Assim, o fenômeno "fingering" em meios porosos, ainda representa um grande desafio para a pesquisa científica, tanto do ponto de vista experimental como teórica, sobretudo em três dimensões, onde os efeitos gravitacionais não podem ser desprezíveis e a dinâmica da interface ainda não é bem compreendida [16].

### 3.2.3.- "Fingering" em solos

O fenômeno "fingering" em solos, segundo a definição do número capilar  $N_{ca}$  (equação 3.20) é basicamente capilar [30]. Isto é, as forças capilares controlam a dinâmica do fenômeno. Todavia, deve-se lembrar que a relação (3.20) foi obtida para  $g \approx 0$  onde os efeitos gravitacionais foram desprezados. Os resultados experimentais do fenômeno "fingering" em solos mostram que a dinâmica do fenômeno é controlada pela força da gravidade [19, 28, 31,

24]. Desta maneira, o efeito da gravidade não pode ser desprezado quando estudamos o fenômeno "fingering" em solos, mesmo em duas dimensões.

Quando as forças gravitacionais são importantes, ao invés de usar o número capilar  $N_{Ca}$  é melhor introduzir um outro parâmetro que leve em consideração este efeito. Este parâmetro é chamado de "bond number" ou número de ligação  $B$ , que representa a relação entre a força gravitacional e a tensão superficial, sendo expressa como [126, 127, 128, 129]:

$$B = \frac{\Delta\rho g r^2}{\gamma} \quad (3.20)$$

onde  $\Delta\rho$  é a diferença de densidade entre os dois fluidos,  $g$  a aceleração da gravidade,  $r$  o raio médio do poro e  $\gamma$  a tensão superficial. Por exemplo, no caso típico de dois fluidos água e ar, e considerando um poro de raio médio  $r = 20\mu\text{m}$ ,  $\Delta\rho = 1\text{g/cm}^3$ ,  $g = 980\text{ cm/s}^2$  e  $\gamma = 72.25\text{ dina/cm}$  em (3.20), temos que  $B \sim 10^{-4}$ . Este valor é muito pequeno, indicando que, a nível microscópico, os efeitos gravitacionais são desprezíveis. Contudo, em amostras grandes, a pressão gravitacional pode ser da ordem ou maior que a pressão capilar. Por exemplo, para um sistema de  $N$  poros, estes poros contribuirão aditivamente, cada um com sua pressão gravitacional, dando uma contribuição total de pressão =  $NB$ . Assim, para um sistema que tenha 10cm de comprimento, nela caberão  $N = 5000$  poros, que multiplicados por  $B = 10^{-4}$  fornecem  $NB \sim 0.5$ . Este valor é da mesma ordem de grandeza das forças capilares. Então, a nível macroscópico, os efeitos gravitacionais são de grande importância para o desenvolvimento do fenômeno "fingering" capilar, que, para dado instante, poderiam dominar a dinâmica do fenômeno. É o que acontece, normalmente, no caso de solos. Também, é preciso mencionar que em solos, além da pressão gravitacional, atua a pressão hidráulica (parâmetro macroscópico). Desta forma, a pressão gravitacional e a pressão hidráulica serão os dois parâmetros macroscópicos que dominarão a dinâmica do fenômeno "fingering" em solos, sobretudo depois do transiente e em condições de injeção constante do fluido (irrigação,

por exemplo). Em condições de drenagem ou redistribuição do fluido na matriz do solo, a situação poderá ser diferente.

Como já foi dito no capítulo anterior, o fenômeno "fingering" em solos tem sido estudado intensamente pelos pesquisadores de Física de Solos. Por exemplo, Philip [33], baseado nos resultados de Saffman e Taylor [9] e Chuoke et al [8] determinou o comprimento de onda crítica  $\lambda_c$  para a ocorrência dos "fingers" (em duas dimensões) em solos, levando em consideração o efeito da gravidade e da umidade  $\theta$  da amostra de solo, sendo expressa esta relação como:

$$\lambda > \lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g (1 - \frac{\theta}{K} \bar{V})}} \quad (3.21)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $V$  a velocidade média do fluido,  $K$  a condutividade hidráulica do solo,  $g$  a aceleração da gravidade e  $\gamma$  a tensão superficial da interface fluido-ar.

A maioria dos trabalhos teóricos sobre o fenômeno "fingering" em solos, foi desenvolvido a partir do trabalho de Philip [33], com variantes para situações específicas para um determinado tipo de solo. Destacando-se os trabalhos de [22, 23, 24, 25].

O único relato na literatura, sobre o uso da teoria fractal para o estudo do fenômeno "fingering" em solos, foi introduzida por Chang [35]. Chang, caracteriza a dinâmica da frente dos "fingers" através da dimensão fractal  $D$  e tenta descrever o fenômeno introduzindo o conceito de tensão superficial efetiva. Define uma tensão superficial que depende da dinâmica da frente. Esta tensão superficial é relacionada com a dimensão fractal  $D$ , sendo expressa como [130]:

$$\gamma^* = \gamma \left(\frac{a}{L}\right) \varepsilon^{1-D} \quad (3.22)$$

onde  $\gamma^*$  é a tensão efetiva que depende da dinâmica da frente,  $\gamma$  a tensão superficial em condições estáticas,  $a$  e  $L$  são constantes conhecidas,  $\varepsilon$  é o comprimento de escala e  $D$  a dimensão fractal.

Se observarmos a equação (3.22), a tensão superficial efetiva  $\gamma^*$  além de depender da dimensão fractal  $D$ , também depende da escala  $\varepsilon$ , uma variável usada para determinar  $D$ . Quando Chang [35], tenta definir o valor de  $\varepsilon$  para calcular  $\gamma^*$ , ele acha um valor de  $\varepsilon$  da ordem do tamanho molecular, produzindo valores para  $\gamma^*$  da ordem de toneladas. Este fato não é explicado, além do que, seus resultados experimentais não validam convincentemente seus resultados teóricos.

### 3.3.-Teoria da Percolação

#### 3.3.1.- Percolação Clássica

As primeiras idéias sobre a teoria da percolação foram introduzida por Broadbent e Hammersley [131], para descrever um processo diferente dos processos de difusão envolvidos nos sistemas desordenados. Os processos difusivos basicamente dependem da concentração do fluido que se difunde através de um meio qualquer, além do que, a randomicidade definida no processo é dada pelas partículas que compõem o fluido. Neste caso, o meio desempenha um papel passivo. Na percolação, o processo depende basicamente da randomicidade atribuída ao meio. Isto é, a movimentação das partículas de fluido é dirigido pelo meio, que neste caso desempenha um papel ativo [132].

Um simples exemplo de percolação está apresentado na figura 3.11a. Suponhamos que uma extensa rede de comunicação como representada na figura 3.11a [133] é atacado por um sabotador que, armado de uma tesoura, pretende cortar as conexões randomicamente (obviamente, isto não dará certo em um cenário real. Mas, para o propósito deste exemplo, é preciso contar com um sabotador estocástico). O propósito do sabotador é cortar a conexão

existente entre os dois postes de comando, representada pelas duas marcas fortes na Fig. 3.11a que são as fronteiras da rede de conexão. Qual é a fração de cortes que o sabotador precisa realizar para isolar ambos os postes de comando?.

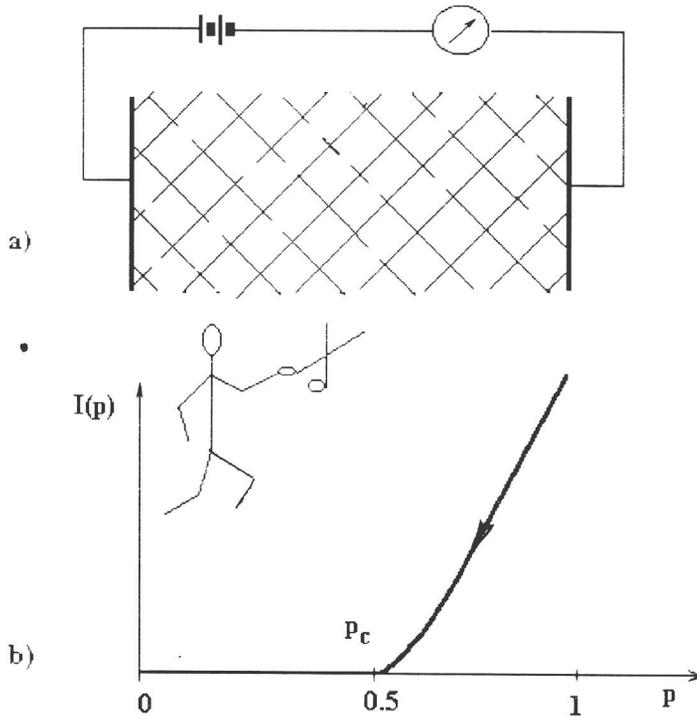


Fig. 3.11. Sabotador estocástico tentando cortar uma extensa rede de comunicação, como um exemplo de percolação ordinária (percolação por ligações).

Esta pergunta será respondida da mesma forma como é dado a resposta da definição do modelo de percolação, ilustrada na Fig. 3.11b. Nesta figura, observa-se um ponto crítico  $P_c$ , que representa a fração de cortes que deve ser feita para isolar os dois postes e fazer cair a corrente a zero ( no sentido contrario, podemos dizer que  $P_c$  é a fração necessária para o começo da passagem de corrente entre os dois postes). O gráfico da Fig. 3.11b, descreve muito bem a essência da teoria de percolação: começando de direita a esquerda, quando  $p = 1$ ,  $I(p) = 100\%$  (máxima condução). Quando o sabotador estocástico começa a cortar as redes de condução de corrente,  $I(p)$  irá diminuir linearmente, como indicado no gráfico pelo sentido da

seta. Assim que o sabotador atinge o valor crítico de corte  $p_c$ ,  $I(p)$  desaparece. Então, para todo valor  $p < p_c$ ,  $I(p) = 0$ . Por tanto, não existe ligação alguma capaz de transportar corrente entre os dois postes de carga.

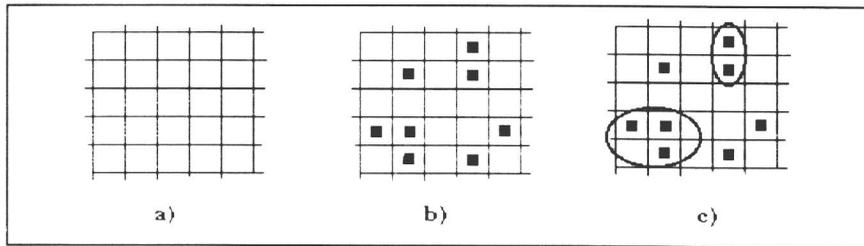


Fig. 3.12. Definição de percolação ordinária e seus "clusters": a) Parte de uma rede quadrada infinita; b) alguns destes quadrados são ocupados por pequenos quadrados pretos; c) definição de "clusters", grupo de vizinhos mais próximos ocupados, encerrados por um círculo.

Agora, consideremos uma rede quadrada como mostrada na Fig. 3.12a. Imaginemos que esta rede quadrada é tão grande que qualquer efeito de seus contornos sejam desprezíveis. Na Fig. 3.12b, uma certa porção destes quadrados é preenchida com pontos pretos (que chamaremos de ocupados) e o restante deixados vazios. Define-se o "cluster" de percolação ao grupo de quadrados vizinhos mais próximos ocupados e que tenham um lado comum, como apresentados na Fig.3.12c, circunscritos. Aqueles que só são tocados através de suas esquinas serão chamados de segundos vizinhos e não pertencem ao "cluster" de percolação. Assim, dentro de um "cluster" de percolação, todos os sítios ocupados estão conectados, formando uma cadeia aberta [134]. A teoria de percolação trata com o número e propriedades destes "clusters". Por exemplo, seja  $N$  o número total de quadrados, então a ocupação de um quadrado é feita randomicamente. Isto é, cada quadrado é ocupado ou deixado vazio, independentemente do estado de ocupação de seus vizinhos. Se chamamos  $p$  a probabilidade de ocupação de um sítio e se  $N$  é muito grande,  $pN$  destes quadrados estarão ocupados e o resto  $(1-pN)$  vazios [134]. Este tipo de percolação, como definido na Fig. 3.12, é chamada de

percolação por sítios. Também a percolação pode dar-se por "canais" ou "bond", como apresentado na Fig. 3.13. Nesta figura, cada "canal" tem uma probabilidade finita  $p$  de estar aberto ou conectado. Por exemplo, se estamos interessados no transporte de um fluido através da rede toda, a probabilidade de bloquear a passagem do fluido de um ponto a outro, dependerá de  $p$ . Assim, a percolação pode dar-se através de sítios e através de "bonds".

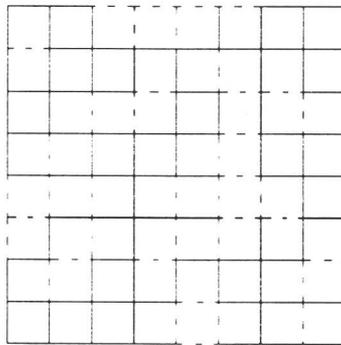


Fig. 3.13. Esquema mostrando o processo de percolação por "bond": canais abertos ou livres \_\_\_\_\_ e canais bloqueados -----.

A figura 3.14 apresenta três gráficos de percolação por sítios, onde observamos claramente o efeito, na estrutura dos "clusters", do aumento da probabilidade de ocupação  $p$  ( $p = 0.58, 0.60, 0.62$ ). Em cada uma destas três figuras, o maior "cluster" é mostrado em cinza claro e os sítios não ocupados em cinza escuro. Para  $p = 0.62$ , o maior "cluster" atravessa a rede de direita esquerda e até o fundo. Este "cluster" é chamado de "spanning cluster" ou "cluster" de percolação. Se a simulação é repetida, uma nova configuração será encontrada. Para uma rede quadrada, o "spanning cluster" começa a aparecer para um valor  $p = p_c \approx 0.593$ . Se a simulação é realizada sobre uma rede gigante de tamanho  $L$ , é encontrado que a probabilidade de se ter um "spanning cluster" desaparece, quando  $L \rightarrow \infty$  e  $p < p_c$ . Uma fração finita de sítios pertencem ao "spanning cluster" quando  $p > p_c$ . Assim, o valor de  $p_c$ , a

probabilidade crítica, para o surgimento do "spanning cluster", em uma rede quadrada de percolação por sítios é  $p_c = 0.59275 \pm 0.00003$  [135].

Por outro lado, considerando  $M(L)$  o número de sítios que pertencem ao maior "cluster" de uma rede  $L \times L$ , a probabilidade média  $P_N(p)$  de sítios pertencerem ao maior "cluster" é expressa como [88, 134]:

$$P_N(p) = \frac{M(L)}{L^2} \quad (3.23)$$

Então, a probabilidade de percolação é dada por:

$$P_\infty(p) = \lim_{N \rightarrow \infty} P_N(p) \quad (3.24)$$

Assim,  $P_\infty(p) = 0$ , para  $p < p_c$ . O processo de percolação passa de um estado de transição local de sítios não conectados para outro estado global, onde as conexões dos sítios se estenderão indefinidamente.

Extensas simulações e trabalhos teóricos têm demonstrado que a probabilidade de percolação desaparece próximo de  $p_c$ , seguindo uma lei de potência [136] expressa como:

$$P_\infty(p) \propto (p - p_c)^\beta, \text{ para } p > p_c \text{ e } p \rightarrow p_c \quad (3.25)$$

onde  $\beta$  é um parâmetro de universalidade, cujo valor é independente da rede em particular, dependendo só da dimensionalidade do sistema [134]. O gráfico da Fig. 3.15 representa esquematicamente o comportamento de  $P_\infty(p)$  em relação a  $p$ .

Essa característica da teoria de percolação é muito semelhante teoria dos fenômenos críticos [137], nos processos de transição de fase de segunda ordem [134]. Para um enfoque

mais detalhado e comparativo da teoria da percolação com os fenômenos críticos, as seguintes referências devem ser consultadas [134, 132, 133,136].

Os valores da probabilidade crítica  $p_c$ , também chamada de "percolation threshold", para cada tipo de percolação, estão resumidos na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1: "Percolation threshold" de sítios e "bond", para duas e três dimensões**

REDE	SÍTIOS	"BOND"
Honeycomb	0.6962	0.65271
Quadrada	0.59275	0.50000
Triangular	0.50000	0.34729
Diamante	0.42800	0.38800
Cúbica simples	0.31170	0.24920
BCC	0.24500	0.17850
FCC	0.19800	0.11900

Nos anos recentes, a teoria de percolação teve um grande desenvolvimento como um ramo da Mecânica Estatística, encontrando diversas aplicações nas diferentes áreas da ciência, como por exemplo, no desenho de materiais magnéticos e eletrônicos, melhor entendimento dos deslocamentos miscíveis e não-miscíveis em um sistema desordenado, melhor conhecimento da geometria e topologia dos sistemas porosos entre outros [134, 138].

Contudo, até agora, poucas aplicações da teoria de percolação foram realizadas no campo da hidrologia [139] e menos ainda em solos, mesmo reconhecendo-se a teoria de

percolação como uma ferramenta de grande potencial nos estudos hidrológicos e de transporte de fluido no subsolo [83].

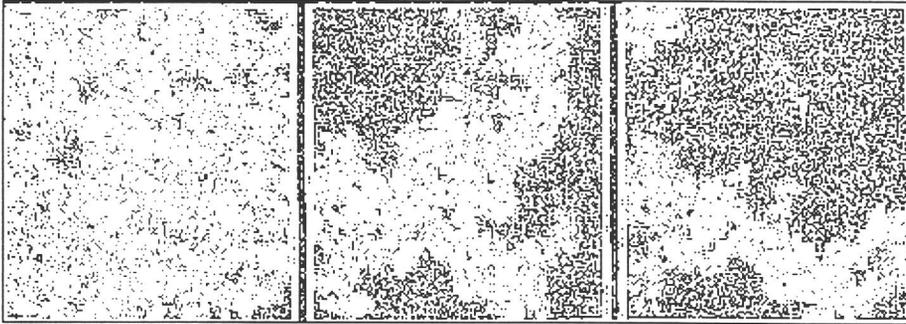


Fig. 3.14. Efeito da probabilidade de ocupação  $p$  sobre uma rede quadrada de  $160 \times 160$ . Da esquerda para direita, os "clusters" apresentados são para  $p=0.62$ ,  $0.6$  e  $0.58$ . O maior "cluster" é mostrado em claro, os menores em cinza escuro, e os sítios não ocupados, em preto [88].

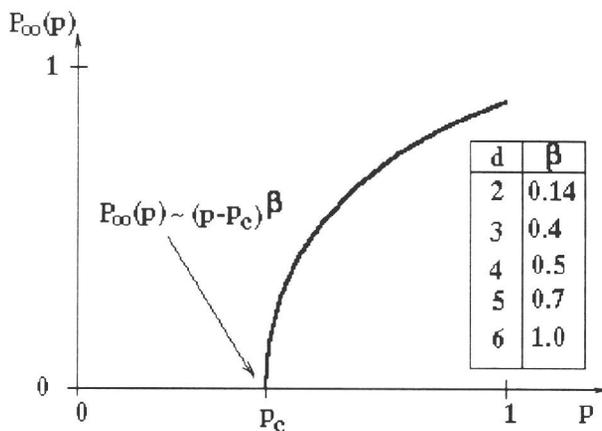


Fig. 3.15. Comportamento do processo de percolação  $P_{\infty}(p)$  em relação a  $p$  (perto de  $p_c$ ). Na tabela podem ser observados os valores do expoente crítico  $\beta$  em relação à dimensionalidade do sistema.

### 3.3.2.- Percolação por invasão (IP)

A percolação por invasão é um processo de percolação dinâmico introduzido por Wilkinson and Willemsen [12]. Esse modelo simula o deslocamento de dois fluidos não miscíveis em um meio poroso, quando as forças capilares dominam totalmente as forças viscosas (baixo número capilar), ou seja: a dinâmica do processo é determinada basicamente pela dimensão dos poros. Assim, o processo de deslocamento do fluido segue caminhos de mínima resistência: os poros de menor tamanho são preenchidos ou invadidos e, através, deles o fluido se desloca rapidamente. O algoritmo de IP, em duas dimensões, está sujeito s seguintes condições:

- a) números randômicos  $[0, 1]$  são atribuídos a cada sítio de uma rede  $L \times L$  (2-D),
- b) definem-se primeiros vizinhos (Fig.3.16),
- c) o fluido invasor ocupa sítios com menor número randômico (poros menores),
- d) o processo termina quando o fluido invasor atinge um sítio na fronteira da rede.

Podem acontecer situações, em que o fluido mais viscoso (incompressível) esteja rodeado completamente pelo fluido invasor (menos viscoso) (água e petróleo, por exemplo). Ou seja, tem-se a presença de armadilhas. Estes sítios, são geralmente eliminados. Mas, s vezes, pode ser interessante levar em consideração este fato, sobretudo nos processos de recuperação de petróleo [12].

Comparando a percolação ordinária e a percolação por invasão: na percolação ordinária, para uma determinada probabilidade de ocupação  $p$ ,  $0 \leq p \leq 1$ , o "cluster" cresce por ocupação de todos os possíveis sítios com número randômico  $r$ ,  $r \leq p$ . O processo termina quando tais números randômicos não são mais achados na fronteira do "cluster". Na percolação por invasão, o crescimento do "cluster" nunca termina, sempre cresce através dos menores números randômicos disponíveis, não importa a quantidade destes números. Contudo, uma vez

que um número  $r_0$  foi eleito, não é sempre verdade que o seguinte número  $r \leq r_0$  será eleito. Existe uma região de transição onde alguns números  $r \leq r_0$  serão aceitos ou rejeitados [12].

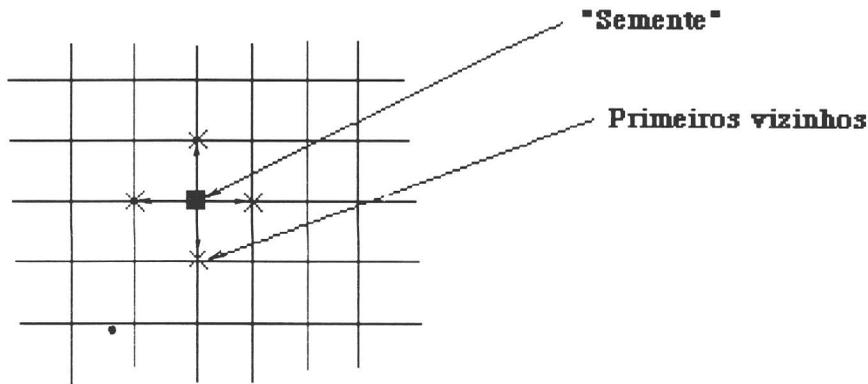


Fig. 3.16. Diagrama esquemático de uma rede quadrada 2-D, mostrando a "semente" (primeiro sítio invadido) e os primeiros vizinhos (indicados com "x"), designados como sítios perimetrais ou sítios de crescimento. Estes quatro vizinhos têm a mesma probabilidade de serem invadidos.

Também encontra-se a dimensão fractal dos "clusters" da percolação por invasão, sem armadilhas é  $D \approx 1.89$  o que significa um valor análogo ao "cluster" da percolação, ordinária quando  $p = p_c$ . Isto é uma evidência de que a percolação por invasão, de fato, é da mesma classe de universalidade que a percolação ordinária [124].

### 3.3.3.- Percolação por invasão modificada, para o caso do fenômeno "fingering" em solos

A percolação por invasão como descrita no item (3.7), foi modificada para o acompanhamento, em duas dimensões, do fenômeno "fingering" em solos. Esta modificação foi realizada, segundo as observações experimentais do fenômeno realizadas no laboratório. O

fenômeno "fingering" em solos, tem sido observado em duas dimensões, no laboratório através de experimentos realizados em colunas verticais planares, construídas de acrílico. Como exemplo para citar dimensões típicas temos, uma coluna de 100cm de altura, por 30cm de largura e 1cm de espessura, com vários furos praticados no seu fundo, para a saída do ar. Comumente, esta coluna é preenchida com solo em duas camadas de diferentes texturas: uma camada no topo de textura fina de altura  $h_1$ , seguida de outra camada grossa no fundo de altura  $h_2$ , com  $h_2 \gg h_1$ . Através da superfície superior externa desta coluna, é aplicado um fluxo contínuo de água, mantendo a altura do fluido constante [19, 31, 34, 30]. Pelo fato da coluna ser chata (espessura de 1cm), os efeitos tridimensionais podem ser considerados desprezíveis. Com isto força-se a ocorrência de "fingers" que se desenvolverão basicamente em duas dimensões.

Das observações realizadas nestes experimentos, podemos descrever as seguintes características mais importantes do desenvolvimento dos "fingers":

- a) o fluxo de água é aplicado na superfície da coluna, através de toda a largura do recipiente e não em um ponto em particular;
- b) a infiltração através da primeira camada é realizada uniformemente;
- c) depois do transiente (começo da infiltração na segunda camada), as forças gravitacionais conjuntamente com a pressão hidráulica dominam a dinâmica dos "fingers";
- d) o fluido preenche e se desloca com maior probabilidade através dos poros pequenos (segue o caminho de menor resistência);
- e) o deslocamento do fluido não é feito poro a poro, senão através de um conjunto de poros (vários poros são molhados ao mesmo tempo);
- f) a estrutura dos "fingers" são um tanto compactas, quase não existem bolhas e,
- g) para solos de granulometria fina, os "fingers" não começam a se desenvolver imediatamente após atravessarem a camada fina, como acontece com os solos de granulometria grossa, mas sim depois de uma certa zona de indução (abaixo da interface entre as duas camadas).

Desta forma, a percolação por invasão, como descrita no item (3.8), foi modificada para propósito deste trabalho introduzindo as seguintes mudanças:

A) Invasão direcionada: sítios de crescimento em cima de sítios invadidos são excluídos, segue o sentido da gravidade a partir de uma linha invasora (Fig. 3.17). A partir disto, foram introduzidos seis parâmetros, no intervalo  $[0, 1]$ ;

B) gravidade (F1): Parâmetro que simula a força da gravidade. Se um sítio de crescimento<sup>1</sup> estiver, em baixo de um sítio invadido (molhado), o valor numérico (randômico) deste sítio perimetral sera multiplicado por F1. Deste modo, ele terá maior chance de ser invadido que seus vizinhos da esquerda ou da direita (Fig. 3.18),

C) "Evaporadores de bolhas" (F2, F3): estes parâmetros tem a função de tornar a estrutura mais compacta, "evaporando as bolhas" ou invadindo os sítios que em uma percolação por invasão direcionada normal não seriam invadidas. Se um sítio de crescimento estiver cercado por dois vizinhos invadidos, então este sitio será multiplicado por F2, diminuindo seu número randômico inicial e aumentando sua probabilidade de ser invadido. Se este mesmo sítio depois de ser multiplicado por F2, aparecer cercado por três vizinhos invadidos, então ele será multiplicado por F3, diminuindo ainda mais seu número randômico e, portanto, aumentando sua probabilidade de invasão (Fig. 3.19a,b). F2 e F3 incorporam, por tanto, a probabilidade de sítios de crescimento cercados por vários sítios já invadidos,

D) Pressão hidráulica (F4): Este parâmetro simula a pressão hidráulica aplicada externamente. Um sítio de crescimento posicionado maior altura (em relação linha invasora ou superfície do solo) que seus vizinhos na mesma linha de crescimento, sera multiplicado por F4, diminuindo seu número randômico e aumentando sua probabilidade de invasão (Fig. 3.20);

---

<sup>1</sup>Um sítio de crescimento é um sítio que pertence ao perímetro e está em condições de ser invadido.

E) Invasão múltipla (fração de sítios do número de colunas da rede) (F5): Este parâmetro controla a porcentagem de invasão. A invasão não mais será de um poro de cada vez, senão, a cada passo da percolação, será invadido um conjunto de poros definidos por F5, no começo da invasão e

F) Parâmetro de espera (F6): Este parâmetro fará com que poros que inicialmente não tinham sido invadidos (molhados), mas que tinham ficado em contato com poros invadidos (molhados), por um longo tempo teriam maior probabilidade de serem ocupados.

Assim, o programa de percolação por invasão modificada com os parâmetros  $F_i$  ( $i=1,\dots,6$ ), será usado para simular morfologicamente e quantitativamente o fenômeno "fingering" em solos.

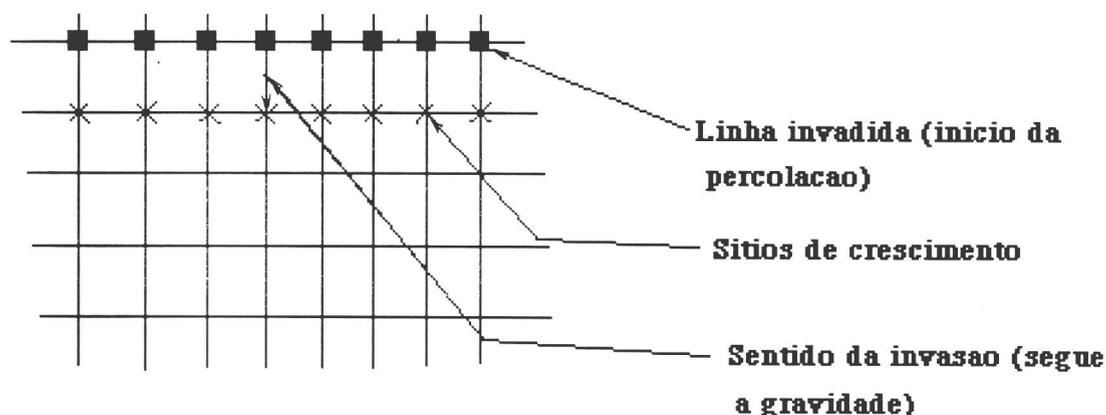


Fig.3.17. Percolação por invasão direcionada(em uma única direção) a partir de uma linha invasora. A invasão de um sítio de crescimento só pode ser para baixo (segundo a gravidade), esquerda ou direita.

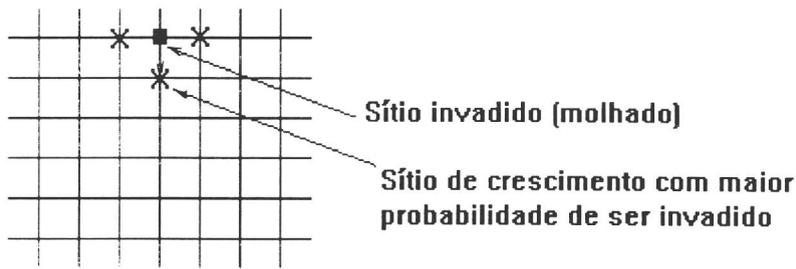


Fig. 3.18. Configuração que representa o parâmetro F1 ("sintonizador" da gravidade). Um sítio de crescimento, cujo vizinho acima é um sítio que já foi invadido, terá maior chance de ser ocupado (invadido) que os outros sítios da esquerda ou da direita. Isto é obtido multiplicando-se o número randômico deste sítio por F1.

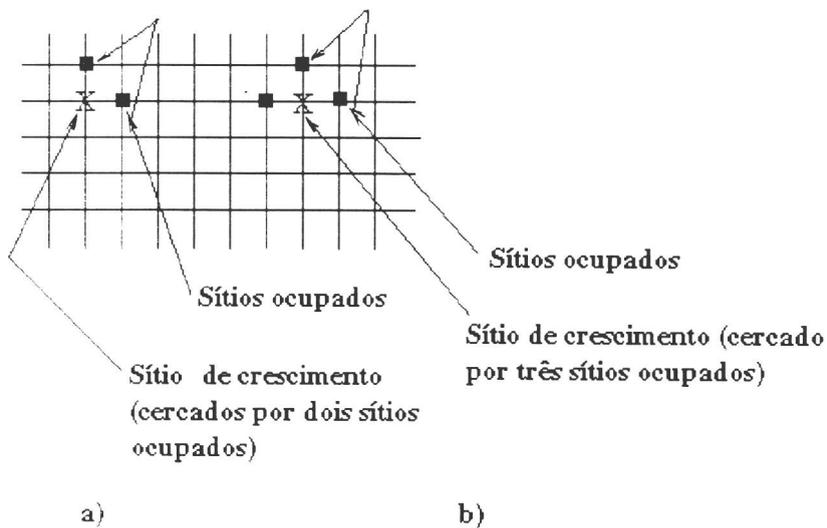


Fig. 3.19. Configurações que representam os parâmetros F2 e F3 ("evaporadores de bolhas"). No caso de um sítio de crescimento estar cercado por dois sítios invadidos, este será multiplicado por F2 para aumentar a chance de ser invadido. Se após esta operação ele aparecer cercado por três sítios invadidos, então ele será multiplicado por F3, aumentando mais ainda sua chance de ser invadido.

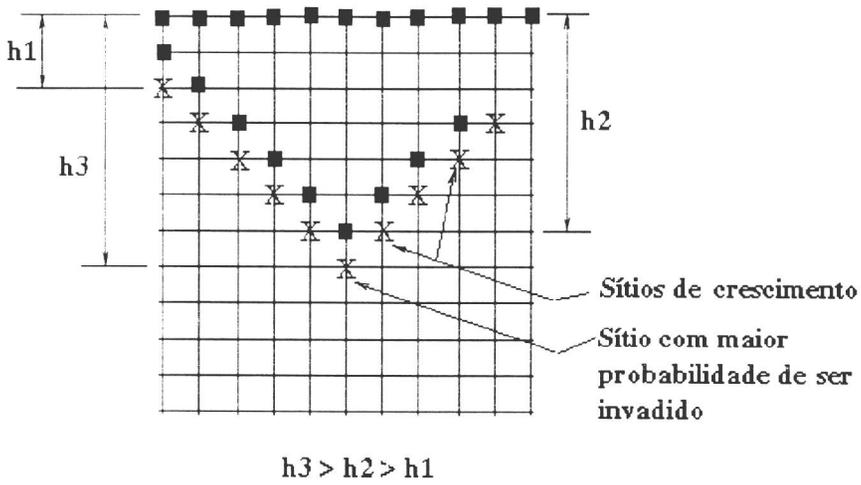


Fig. 3.20. Esboço que configura o parâmetro F4 (pressão hidráulica). O sítio de crescimento pertencente ao perímetro, que está submetido maior pressão (maior altura  $h$ ), terá maior chance de ser invadido.

## CAPITULO IV

### DESCRIÇÃO ABREVIADA DE TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS ATRAVÉS DE IMAGENS

Neste capítulo, iremos descrever as técnicas experimentais não destrutivas, utilizadas para a caracterização do fenômeno "fingering" em solos, em duas e três dimensões. Entre estas técnicas experimentais não-destrutivas descreveremos brevemente a digitalização e o processamento de imagens, a tomografia por ressonância magnética (TORM) e a tomografia por raios X.

#### 4.1.- Digitalização e processamento de imagens.

O processamento de imagens digitalizadas e a manipulação de imagens por computadores são técnicas de aplicação multidisciplinar, cobrindo quase todo o espectro eletromagnético (por exemplo raios X, raios  $\gamma$ , ultravioleta, visível, microondas ou infravermelho), que permite observar uma ampla escala que vai desde o nível atômico (por exemplo: imagens por microscópio de tunelamento-STM) até o nível do espaço exterior (por exemplo: imagens via satélite). Apesar de seu recente desenvolvimento, a técnica de imagens tem crescido enormemente, nos últimos anos e com muito sucesso nas diversas áreas onde está sendo aplicada. Isto, basicamente pela diminuição dos custos dos equipamentos de computação e também pelo surgimento de novas tecnologias como por exemplo o processamento paralelo; os dispositivos (sensores) semicondutores de aquisição tipo CCD ("charged coupled devices"); o armazenamento e a apresentação da imagem durante o processamento e o baixo custo nos arranjos de armazenamento da imagem [140].

A literatura sobre as técnicas de digitalização e processamento de imagens, que forma parte da moderna ciência da computação gráfica é muito vasta. Existindo variadas especialidades neste campo e também, segundo a área de aplicação. Assim, nesta secção,

faremos uma breve descrição e geral da técnica de digitalização e processamento de imagem. Para uma discussão mais profunda do tema podemos citar as seguintes referências: [140, 141, 142, 143].

#### 4.1.2.- Representação de uma imagem digital

Uma imagem pode ser representada por uma função matemática  $f$  de duas variáveis, onde  $f(x,y)$  - o valor da função no ponto de coordenadas espaciais  $(x,y)$  - é o brilho ou nível de cinza, no caso mais simples de uma imagem em preto e branco (Fig. 4.1).

Uma mesma cena pode ser reproduzida por sensores que respondem a diferentes intervalos de frequências ou bandas. Enquanto um deles é sensível, por exemplo, ao intervalo de 0.4 a 0.6 micrometros ( $\mu\text{m}$ ), o outro o será ao de 0.5 a 0.8  $\mu\text{m}$ . Nesse caso é necessária uma função  $f(x,y)$  para cada sensor [144].

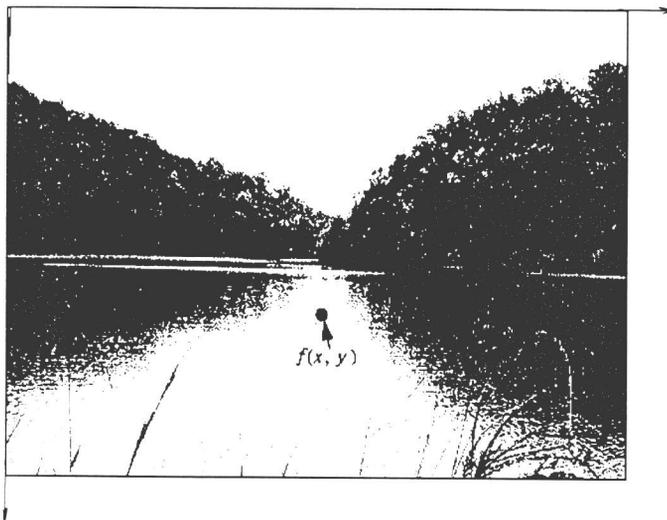


Fig. 4.1. Convenção dos eixos usados para a representação de uma imagem digital [140].

A imagem digital é representada por uma função  $f(x,y)$  discretizada (representada por valores inteiros) tanto no domínio espacial quanto no brilho. Pode-se também considerar uma imagem digital como uma matriz, cujos índices de linhas e colunas identificam espacialmente um ponto, e o valor inteiro do elemento correspondente, na matriz, identifica seu nível de cinza.

Os elementos dessa matriz são chamados elementos de imagens ou pixels (do inglês picture element) (Fig. 4.2). Embora o tamanho da matriz possa variar segundo o campo da aplicação (sensoramento remoto, medicina, robótica e outros), geralmente ela possui 512 linhas x 512 colunas. Cada elemento pode assumir 256 níveis de cinza. A visão humana não consegue distinguir mais de 512 pixels contidos linearmente em 30cm, ou numa tela de TV observada a um metro de distância. Desse ponto de vista, os pixels individuais não são distinguíveis e a imagem parece contínua.

Enquanto a visão humana só consegue perceber, no máximo, 32 níveis de iluminação, os sensores especiais podem ultrapassar, em muito, esse limite [144].

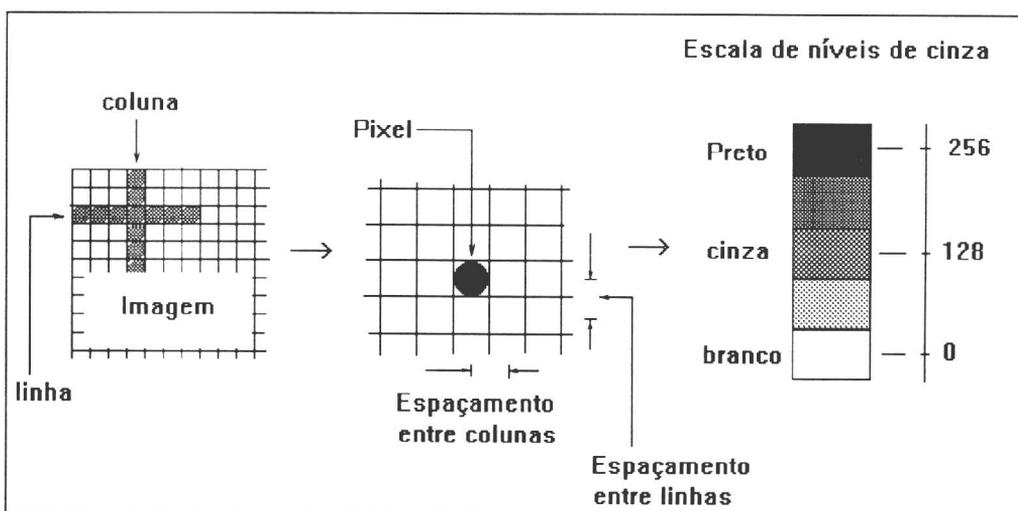


Fig. 4.2. Processo de representação de uma imagem digitalizada [140].

Nas análises por computador, é muito comum extrair alguns parâmetros que caracterizam a imagem a partir de seu histograma, gráfico cartesiano cujo eixo horizontal é o número correspondente aos níveis de cinza e cujo eixo vertical é o número de pixels com um determinado nível de cinza (Fig. 4.3).

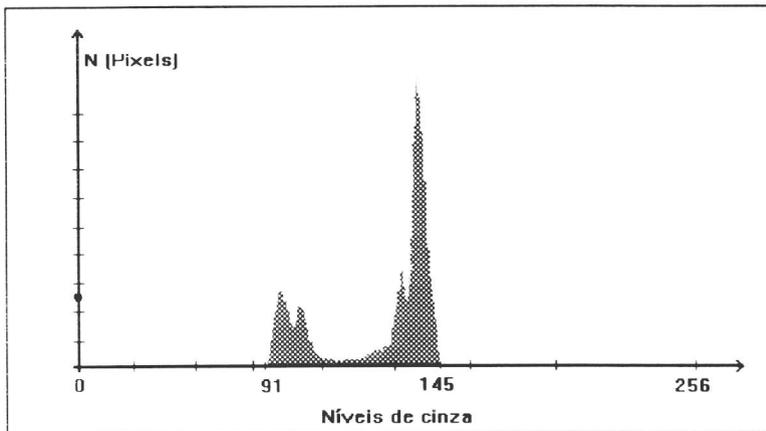


Fig. 4.3. Histograma de uma imagem. Trata-se de um gráfico que relaciona os níveis de cinza dos pixels com a frequência de sua ocorrência.

Os passos para o tratamento de uma imagem geralmente requerem a aquisição (digitalização da imagem); pré-processamento (por exemplo realçar o contraste, reduzir o ruído, correções geométricas, isolar as regiões não desejáveis); realçar (conjunto de técnicas destinadas a melhorar a discriminação visual dos objetos presentes nas cenas); classificação (associação a uma classe, tema ou padrão conhecido); análises (descrição morfológica e topológica das cenas: forma e posição dos objetos, identificação de grupo de objetos semelhantes, a posição relativa destes e outros) e compreensão [144, 141].

#### 4.1.3.- Elementos dos sistemas de processamento de uma imagem digital

Os elementos dos sistemas de propósito geral, capazes de representar os processos operacionais de uma imagem, como discutidos no item anterior, são amostrados na figura 4.4: (1) aquisição, (2) armazenamento, (3) processamento, (4) comunicação, e (5) a exposição.

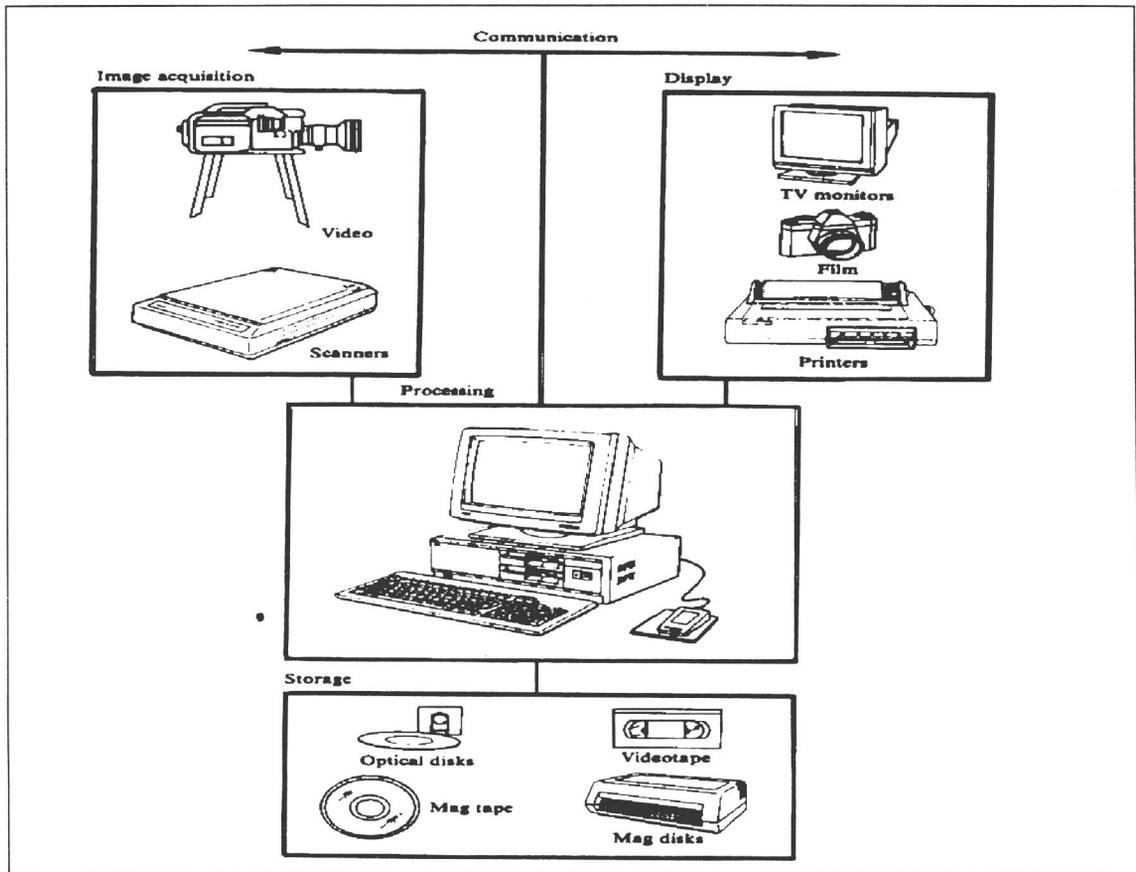


Fig. 4.4. Elementos básicos do sistema de processamento de uma imagem: aquisição, armazenamento, processamento, comunicação e exposição [141].

1) **Aquisição de uma imagem.**- Dois elementos são necessários para a aquisição de uma imagem digital. O primeiro é um dispositivo físico sensível a uma determinada banda de energia do espectro eletromagnético (como por exemplo raios X, ultravioleta, visível, ou infravermelho) que produz uma saída em forma de sinal elétrico proporcional ao nível de energia medida. O segundo é o digitalizador, dispositivo que converte o sinal elétrico da saída do sensor em uma forma digital.

Por exemplo, considerando o sistema de imagens obtido através de raios-x: a fonte de raios X é dirigida a um objeto material e um meio sensível aos raios X é colocado do outro lado do objeto. O meio adquire uma imagem do material (por exemplo os tecidos de um

orgão humano) havendo vários graus de absorção do raios-x. O meio pode ser um filme, uma câmera de TV combinada com um convesor de raios-x a fotons ou detetores discretos com saídas combinadas a um sistema de reconstrução para uma imagem digital.

Outros sensores de maior categoria serão sensíveis à luz visível e infravermelho. Os dispositivos com maior frequência usados para este propósito, são os microdensitômetros, dissectores de imagens, câmeras videocon e arranjos fotosensíveis de estado sólido [141].

Os dispositivos sensores de estado sólido podem ser organizados em sensores de exploração linear ou em sensores de área. Estes sensores possuem a vantagem de serem operados ("shuttered") a alta velocidade ( $\sim 10^{-4}$ s), sendo de uso ideal em situações onde o congelamento de uma cena é requerida. A tecnologia destes sensores é baseada principalmente em "charge-coupled devices" CCD [141]. Em dispositivos CCD, geralmente acoplados a outros instrumentos óticos, como microscópios ou telescópios, onde a coleta de luz é feita por semicondutores em que a liberação da carga elétrica é proporcional à intensidade de luz incidente. Estes sensores são usados nas câmeras de TV e nas modernas câmeras de vídeo tipo CCD por exemplo, utilizado em nossos experimentos de laboratório para o acompanhamento da dinâmica do fenômeno "fingering" em duas dimensões, como será descrito na próxima seção.

Outros equipamentos de aquisição podem ser mesas digitalizadores, sensores de RMN, de ultra-som, de raios- $\gamma$  e outros.

2) **Armazenamento.**- Uma imagem de 8-bits de tamanho 1024x1024 pixels, requer um milhão de bytes de memória para ser armazenada. Assim, providenciar um adequado armazenamento é usualmente um desafio nos desenhos dos sistemas de processamento de imagens. O armazenamento é medido em bytes (oito bits), Kbytes (mil bytes), Mbytes (um milhão de bytes), Gbytes (giga ou um bilhão de bytes), e Tbytes (téra ou um trilhão de bytes). Fitas magnéticas ou discos óticos são os meios mais utilizados de aplicações de

armazenamento. Por exemplo, as fitas magnéticas de alta densidade (6400 bytes/polegada), podem armazenar uma imagem de 1Mbytes em aproximadamente 4 metros de fita. Um disco ótico, pode armazenar imagens da ordem de 1Gbyte em 5 1/4 polegada de disco.

**3) Processamento.**- o processamento de uma imagem digital envolve procedimentos que são usualmente expressos em forma de algoritmos. Assim, com exceção da aquisição e exibição de uma imagem, a maioria das funções de processamento podem ser implementadas em software. Uma quantidade significativa de softwares de processamentos básicos de imagens podem ser obtidos comercialmente. Estes processamentos são caracterizados por soluções específicas. Assim, técnicas de processamento que para um determinado trabalho ou área funcionam bem, para outros, podem ser totalmente inadequados. A solução atual de um problema específico, geralmente ainda requer significativas pesquisas e desenvolvimentos.

Estes "softwares" também dependem do tipo de máquina utilizada ( IBM, MACINTOSH, estações tipo SUN ou SILICON GRAPHIC, computadores de grande porte, VAX, CRAY, IBM/360 e outros).

**4) Comunicação.**- a comunicação do processamento de uma imagem digital, primariamente envolve comunicação local entre os sistemas de processamento da imagem e a comunicação remota de um ponto a outro, tipicamente ligado à transmissão de dados da imagem. Hardware e software para a comunicação local já são de pronta disponibilidade na maioria dos computadores.

**5) Exibição.**- a exibição de uma imagem pode ser realizada através de monitores de TV monocromáticos ou a cores. Os sinais na saída do módulo de exibição podem também ser alimentados para um dispositivo de registro que produzirá um "hardcopy" ( slides, fotografias, transparências e outros). Outros dispositivos para exibir uma imagem incluem, tubos de raios catódicos (CTR) de acesso randômico e dispositivos de impressão.

Nas seguintes seções, faremos uma breve descrição dos dispositivos de aquisição de imagens por RMN e raios-x. Dispositivos utilizados em nossos estudos do fenômeno "fingering" em 3-D.

#### 4.2.- Tomografia por ressonância magnética (TORM)

Nesta seção, será descrito brevemente a obtenção de uma imagem através da técnica de TORM. Serão discutidos o fenômeno da ressonância, o espectro de RMN e a geração de imagens. Para uma discussão mais detalhada e profunda sobre a tomografia por RMN, as seguintes referências podem ser consultadas: [145, 146, 147, 148, 149, 150, 151].

Obter a imagem de um objeto significa produzir um "mapa" que registre, em função da posição, alguma de suas propriedades. No caso de imagens formadas por RMN, uma das propriedades que podem ser mapeadas é a densidade local de núcleos atômicos  $\rho_n(r)$ , por exemplo, o hidrogênio. Pelo fato do hidrogênio participar da molécula de água, presente na fase líquida e participante do transporte de fluxo em meios porosos, a densidade de núcleos pode ser associada diretamente à densidade de massa. Assim, variações de densidade que acompanham a anatomia interna de um sistema qualquer, são facilmente observáveis mediante a obtenção de  $\rho_n(r)$ . Esta é a principal propriedade analisada com a tomografia por RMN, mas, não é a única [149]. Contudo, para nosso interesse de estudar o fluxo preferencial em solos, a análise através da densidade de núcleos será suficiente.

##### 4.2.1.-Sinal de RMN

O fenômeno de ressonância magnética é próprio dos sistemas magnéticos que possuem tanto momento magnético como momentum angular. Uma das razões para o impacto da RMN, tanto na física, como nas diversas áreas do conhecimento, é sua capacidade de fornecer informação dos processos que estão acontecendo a nível atômico.

Assim, um sistema que possui momentum angular, tal como o núcleo atômico, consistente de muitas partículas acoplados em um determinado estado quântico, possui um momento magnético total  $\vec{\mu}$  e um momentum angular total  $\vec{J}$ . Considerando ambos os vetores paralelos, escrevemos:

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{J} \quad (4.1)$$

onde  $\gamma$  é o "fator giro magnético" do núcleo em questão.

Para protons  $J = \hbar I$ , sendo  $\hbar = h/2\pi$  a constante de Planck e  $I$  o momentum angular de spin nuclear, que pode tomar valores inteiros ou múltiplos de 1/2. Então (4.1) fica:

$$\vec{\mu} = \gamma \hbar \vec{I} \quad (4.2)$$

Se este núcleo é submetido a um campo magnético externo estático  $\vec{H}_0$ , suposto na direção z do sistema de coordenadas do laboratório [152], o hamiltoniano associado a esse sistema é :

$$H = -\vec{\mu} \cdot \vec{H}_0 = \gamma \hbar \vec{I} \cdot \vec{H}_0 = \gamma \hbar H_0 I_z \quad (4.3)$$

onde os autovalores deste hamiltoniano H, são simples  $(\gamma \hbar H_0)$  multiplicado polos autovalores de  $I_z$ . Assim, os valores permitidos para a energia são:

$$E = -\gamma \hbar H_0 m_I, \quad m_I = -I, -I+1, \dots, I \quad (4.4)$$

A grande maioria das espécies atômicas, que têm momentos magnéticos não nulos, estudadas nas técnicas de imagens, tem isótopos que apresentam spin 1/2 ( $H^1$ ,  $C^{13}$ ,  $P^{31}$ ,

$F^{19}$ ), exceto alguns, como o sódio ( $N^{23}$ ), que apresenta spin  $3/2$ . No caso particular de  $I=1/2$ ,  $m_I = \pm 1/2$  o que resulta no esquema de níveis mostrados na figura 4.5.

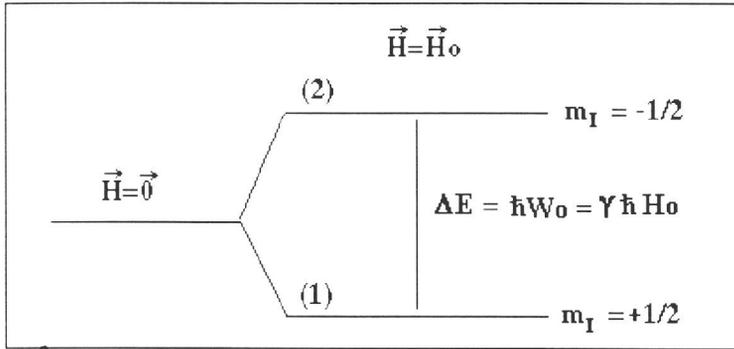


Fig. 4.5. Diagrama de níveis de energia de um sistema de núcleos com spin nuclear  $I=1/2$

A transição representada na figura 4.5, exige uma energia de radiação eletromagnética,

$$\Delta E = \hbar\omega = \hbar\gamma H_0 \quad (4.5)$$

o que dá para essa radiação uma frequência angular,  $\omega = \gamma H_0$ . Esta é a relação fundamental para as técnicas de imagens e espectroscopia, também chamada de frequência de Larmor [152]. Se um conjunto de spins de natureza diferente, determinada pelos seus valores de  $\gamma_i$  for colocado na presença de um campo magnético  $H_0$ , absorverão energia em frequências correspondentes  $\omega_i = \gamma_i H_0$ . Assim, o espectro de absorção deverá conter vários picos, correspondentes a cada ressonância  $\omega_i$ . Estas frequências situam-se na faixa de radiofrequência (RF).

A sintonia em uma dada frequência  $\omega_i$ , permite, então, observar a ressonância da espécie atômica  $\gamma_i$  correspondente.

No caso de colocarmos um material (amostra macroscópica) com magnetização  $\vec{M}$  na presença de um campo magnético (vide Fig. 4.6), vale a mesma representação que para o momento magnético  $\vec{\mu}$ , só que desta vez  $\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i$ , sendo  $V$  o volume da amostra.

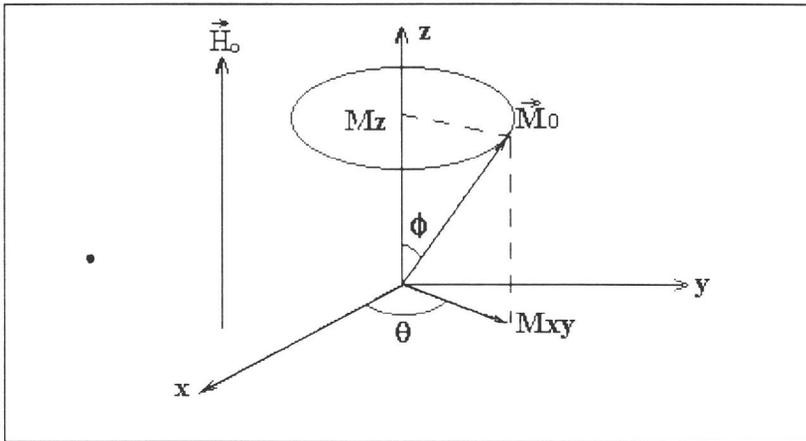


Fig. 4.6. Representação clássica do vetor magnetização  $\vec{M}$  submetido a um campo magnético estático uniforme  $\vec{H}_0$ .

Nesta situação, todos os spins tenderão a se alinhar com o campo magnético externo. Mas, este alinhamento não é total devido a interações internas e à agitação térmica. Embora, no equilíbrio o material atinja uma magnetização final residual na direção do campo estático  $\vec{H}_0$  e as componentes perpendiculares  $M_{xy}$ , torna-se nulas,  $\vec{M} = (0,0,M_0)$ . Contudo, quando um campo  $H_1(\omega)$  de RF circularmente polarizada, que cumpre com a condição de Larmor:  $\omega = \omega_0 = \gamma H_0$ , é aplicado em uma direção perpendicular a  $\vec{H}_0$ , a magnetização  $\vec{M}$  irá precessionar em torno de  $H_1$  com frequência angular  $\omega_1 = \gamma H_1$ , produzido uma magnetização transversal  $M_{xy} \neq 0$ . Uma vez desligado o campo ressonante  $H_1(\omega)$ , a magnetização decai a zero, e o sistema de núcleos retorna a seu estado de equilíbrio, precessionando em torno de  $\vec{H}_0$ , com velocidade angular  $\omega_0$ .

O retorno do sistema ao equilíbrio descrito pelas equações de Bloch [152, 153] fornece informações acerca da densidade do spin nuclear e o estado físico dos núclides: comprimento de ligação, identificação de compostos químicos e o ambiente eletrônico local.

Duas constantes de tempo caracterizam a evolução das duas componentes da magnetização depois da excitação da RF:

a) o tempo de relaxação  $T_1$  que descreve o retorno da componente longitudinal  $M_Z$  a seu valor de equilíbrio com uma lei de decaimento exponencial,

$$M_Z(t) = M_0(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (4.6)$$

Este processo é conhecido como de relaxação *spin-rede*.

b) o tempo de relaxação  $T_2$ , tempo de relaxação transversal que descreve o retorno de  $M_{xy}$  a seu valor de equilíbrio inicial  $M_{xy}=0$ , com uma lei de decaimento,

$$M_{xy}(t) = M_0 e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (4.7)$$

Este processo conhecido como relaxação transversal é produzido pela desfasagem da precessão do spin nuclear.  $T_2$  também é chamado de tempo de relaxação *spin-spin* por que ele representa o tempo necessário para a perda da coerência de fase entre os diferentes spins, quando é retirada a perturbação  $H_1$  de RF.

Estes mecanismos de relaxação são importantes para os experimentos com imagem. A relaxação *spin-rede*  $T_1$ , "controla" a rapidez com que o sistema vai se alinhar com o campo aplicado  $\vec{H}_0$ . Assim,  $T_1$  poderá "controlar" a rapidez da formação de uma imagem. A

relaxação spin-spin  $T_2$  está envolvida com a determinação do limite da resolução ou o comprimento de escala do sistema.

Com isto, as variações de  $M_Z$  e  $M_{xy}$  durante o tempo de relaxação, dão origem a flutuações do campo magnético com frequência  $\omega_0$  e intensidade proporcional à densidade de spins nucleares através de  $\vec{M}$ . Do ponto de vista prático o sinal destas flutuações (componente transversal e longitudinal de  $\vec{M}$ ) fisicamente podem ser detectados e registrados através da força eletromotriz (f.e.m) induzida, na frequência de Larmor, em uma bobina colocada no plano xy (com máxima sensibilidade), transversal ao campo  $\vec{H}_0$ . O sinal correspondente à magnetização transversal é chamado de "free induction decay" (F.I.D) ou precessão livre. A condição de máxima sensibilidade (máxima relação sinal/ruído) é conseguida aplicando um "pulso  $\pi/2$ "  $H_1$  de Rf, que leva toda a magnetização de equilíbrio para o plano transversal xy. [149, 154] (Figs. 4.7 e 4.8).

Depois de registrar o sinal como função do tempo, uma transformada de Fourier é aplicada a fim de obter a intensidade do sinal (espectro de RMN), como por exemplo a densidade de spins nucleares como função da frequência. Como uma espécie particular precessa em uma dada frequência de Larmor, diferentes núcleos podem ser estudados mudando a frequência do sistema de RMN.

#### 4.2.2.- Ressonância magnética nuclear pulsada

A resposta espectral do sistema de spins frente à excitação com um campo magnético de RF permite estudar e entender os mecanismos de interação entre os spins e o meio em que estão imersos, assim como interações entre os referidos spins.

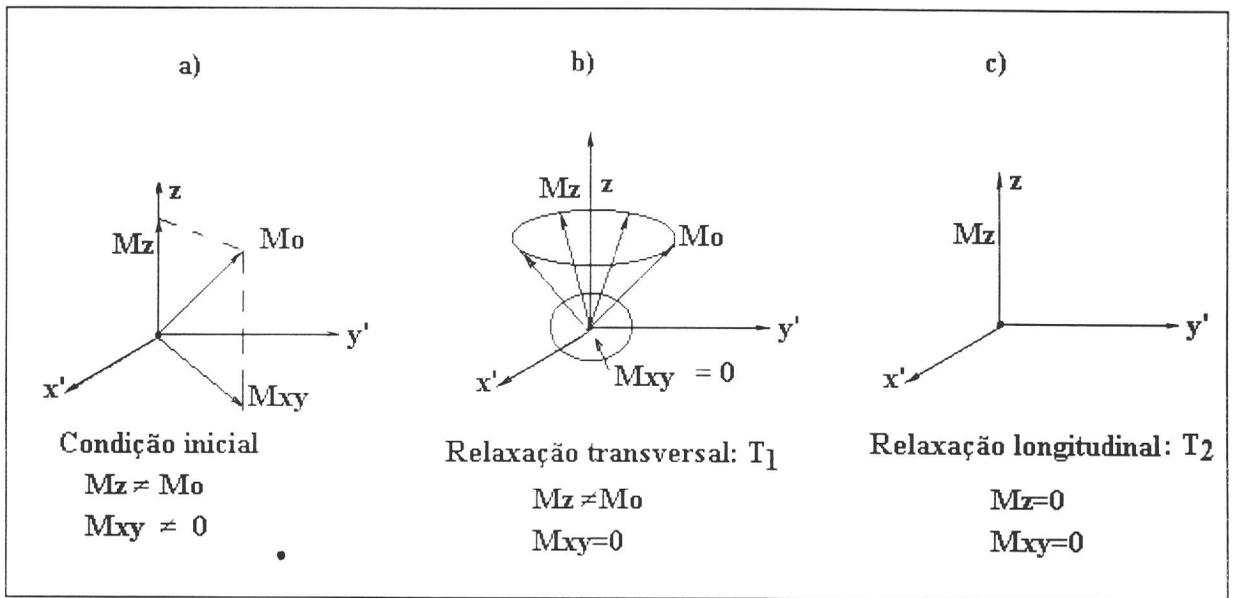


Fig. 4.7. Relaxação com  $T_1$  e  $T_2$ : em (a) condição após o pulso de excitação  $H_1$  de RF; (b) houve relaxação transversal, mas  $M_z \neq M_0$ ; (c) relaxação longitudinal.  $XYZ \rightarrow$  coordenadas do sistema laboratório (fixo);  $X'Y'Z' \rightarrow$  coordenadas do sistema rotante [149].

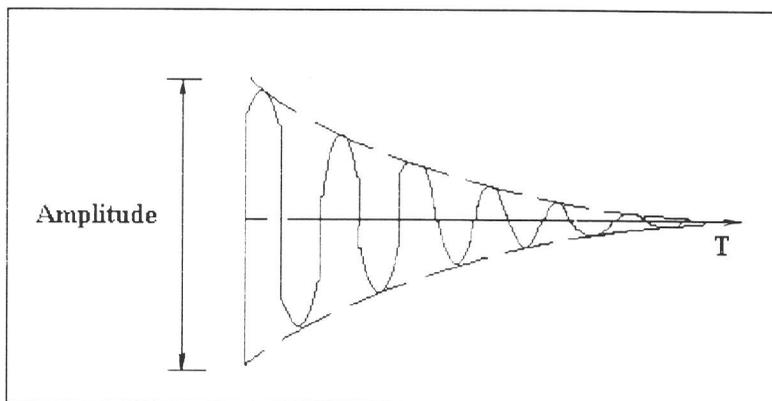


Fig. 4.8. Sinal de RMN ("free induction decay": FID)

Há duas principais variantes destas técnicas de medida:

a) aplicação de uma excitação de forma contínua, de baixa intensidade e de uma frequência única (excitação com largura de banda muito menor que a largura dos espectros observados). Variando-se a frequência, pode-se obter (em um tempo tal que a varredura entre duas frequências próximas  $\omega \rightarrow \omega + d\omega$  seja maior que  $T_1$ ) a resposta espectral da susceptibilidade complexa  $X(\omega)$ , que decorre da solução estacionária das equações de Bloch [152]. Essa técnica é denominada de  $C\omega$  (continues wave) e foi inicialmente utilizada na observação do fenômeno de RMN e

b) a outra técnica consiste em aplicar-se pulsos de rádio frequência bem mais curtos que  $T_1$  e  $T_2$ , pulsos esses com espectro de potência de largura comparável à varredura na técnica anterior. Garante-se dessa forma que todas as componentes de frequência da excitação estejam presentes com aproximadamente a mesma intensidade. A análise espectral da resposta do sistema de spins (que de certa forma contém superpostas as respostas a cada frequência), mediante as técnicas de transformada de Fourier [155, 153], permite obter a resposta espectral e avaliar suas consequências. Esta técnica é denominada de espectroscopia de Fourier de RMN pulsada, técnica que será usada em nossas medidas experimentais.

#### 4.2.3.- "Spin-echo"

A técnica de "spin-echo" é usada principalmente para estudar o comportamento transversal  $M_{xy}$  da magnetização e a relaxação  $T_2$ . Esta técnica consiste na aplicação de uma seqüência de "pulsos  $\pi$ " (depois da aplicação do primeiro pulso  $\pi/2$ ) em um intervalo constante de tempo (Fig. 4.9). Os diferentes pulsos  $\pi$  que dão a reversão da fase (ECO) são usados para restaurar a coerência da fase no plano OXY e, assim, o retorno do sistema ao equilíbrio. Como consequência, uma série de sinais de relaxação é obtido de onde o tempo  $T_2$  é calculado.

#### 4.2.4.- Geração de uma imagem por RMN

Uma imagem por RMN poder ser obtida pela aplicação direta da relação (4.5). Para ilustrar as ideias básicas do método, vamos considerar um objeto homogêneo com distribuição uniforme de núcleos colocado em um campo magnético estático uniforme  $H_0$  (ver Fig. 4.10a). O espectro normal deste objeto (como até agora descrito) consiste em um simples pico na frequência de Larmor, não fornecendo informação acerca do tamanho do objeto na direção x.

A informação espacial através de imagens de RMN é obtida aplicando um gradiente de campo magnético definido como :

$$\vec{G} = \vec{\nabla}(\vec{H} \cdot \vec{e}_z) = \frac{\partial H}{\partial X} \vec{e}_x + \frac{\partial H}{\partial Y} \vec{e}_y + \frac{\partial H}{\partial Z} \vec{e}_z \quad (4.8)$$

onde o campo magnético  $\vec{H}$ , para qualquer ponto  $\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z$  é dado por:

$$\vec{H}(\vec{r}) = [\vec{H}_0 + (\vec{r} \cdot \vec{G})]\vec{e}_z \quad (4.9)$$

Utilizando a relação de Larmor (4.5), para este caso temos:

$$W = \gamma H = \gamma H_0 + \gamma(\vec{r} \cdot \vec{G})e_z \quad (4.10)$$

onde agora a frequência de Larmor depende da posição dentro da amostra.

Assim, observando diferenças na frequência de Larmor  $\Delta\omega$ , podemos determinar a informação espacial através da relação:

$$\Delta\omega = \gamma(\Delta\vec{r} \cdot \vec{G}) \quad (4.11)$$

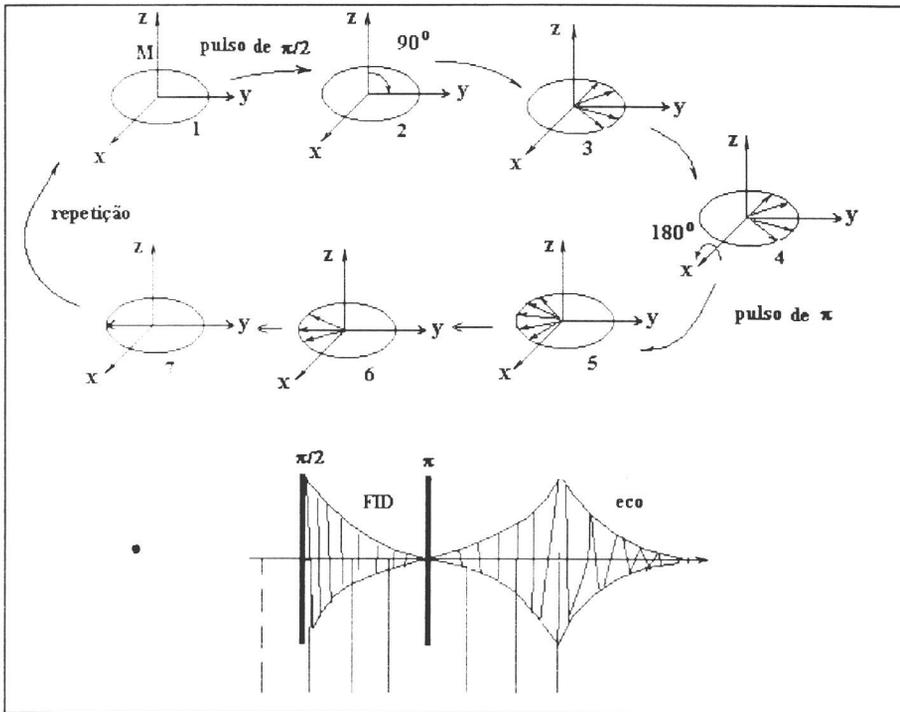


Fig. 4.9. A formação de um eco de spin. Quando aplicado um pulso de  $\pi/2$ , a magnetização  $\bar{M}$  inicialmente em sua condição de equilíbrio, ao longo do eixo Z(1) sofre um deslocamento de 90 graus, ficando na direção Y(2). Por causa da ausência de uniformidade do campo magnético aplicado sobre a amostra, aparece uma distribuição de frequências de precessão (3), com a conseqüente perda de coerência do estado inicial (4). Essa defasagem pode ser revertida pela aplicação de um pulso de  $\pi$ , que provoca uma rotação de 180 graus dos spins dos núcleos individuais em torno do eixo x (5), um refasamento (6) e a regeneração de um sinal, chamado eco de spin (7). Na parte inferior da figura, vemos a evolução temporal do sinal.

Na figura 4.10b é mostrada uma situação onde o gradiente é aplicado na direção do campo estático  $H_0$ . O gradiente de campo magnético permite separações dos sinais de cada plano perpendicular ao eixo-x e, assim, estimar o tamanho do objeto e quantificar a densidade nuclear, nestes planos.

Com uma seletiva irradiação de um ponto, uma linha ou uma fatia de um objeto, por um campo de RF de forma apropriada, é possível obter informações em uma, duas ou três dimensões do objeto.

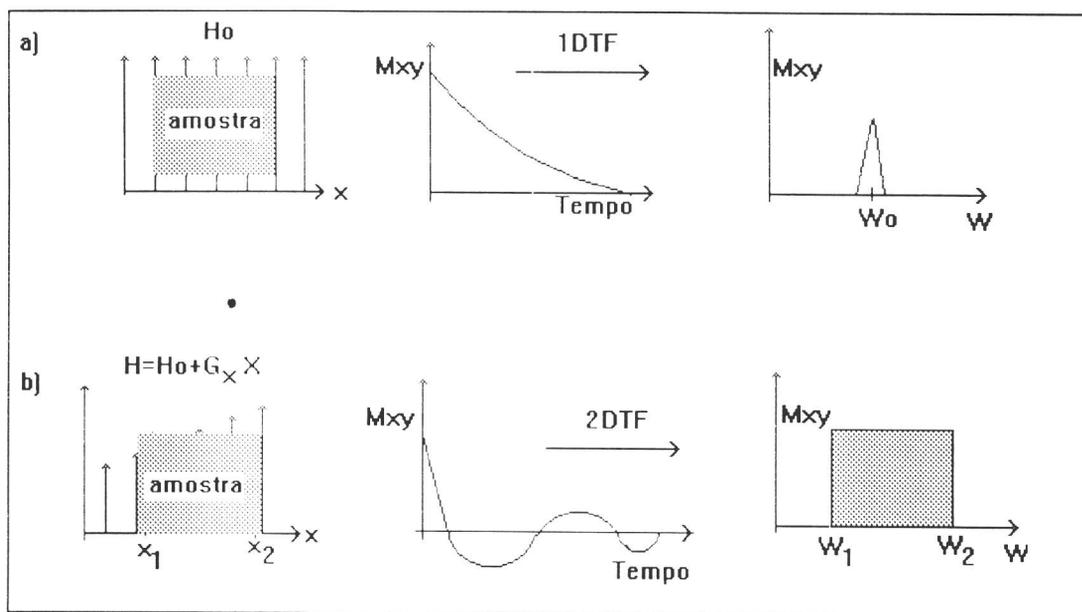


Fig. 4.10. Princípio básico da obtenção de uma imagem por RMN. a) Um simples bico na frequência de Larmor (não há informação acerca do tamanho da amostra) e b) o gradiente de campo  $G_x$  permite separações dos sinais de cada plano perpendicular ao eixo  $x$ , estimando assim o tamanho da amostra.

Assim, torna-se necessário aplicar sucessivamente gradientes de campo ao longo de diferentes direções, para que se obtenha uma codificação completa da distribuição de prótons da área que se deseja analisar. Desta forma, cada uma das muitas técnicas propostas para produzir imagens por RMN consiste numa forma de implementar essa codificação.

Os diferentes métodos atualmente existentes apresentam, em geral, duas etapas. Na primeira, realiza-se a experiência propriamente dita, ou seja, obtém-se um número suficiente

de sinais independentes. Na segunda, esses sinais são processados, de modo a reconstruir a imagem do objeto. Um grupo composto de  $L \times N \times M$  sinais independentes pode ser usado para gerar uma imagem com  $L \times N \times M$  pontos de um objeto tridimensional. Ora, cada sinal pode registrar informações provenientes de um ponto, de uma linha, de um plano ou de volume. Os melhores resultados em termos de relação sinal-ruído são obtidos com as técnicas de volume, justamente as que exigem processamento mais complexo e computadores dotados de mais capacidade de memória. Os mais usuais são os métodos planares, também chamados de tomográficos, nos quais se obtém a imagem de apenas um plano do objeto de cada vez. Entre eles, dois se destacam: o método de reconstruir a partir das projeções (PR) e o método da transformada de Fourier bidimensional direta (2DFT). Esta última é a técnica usada no laboratório de imagens por RMN do Departamento de Física e Ciências dos Materiais do IFQSC-USP., que descreveremos brevemente a seguir.

#### 4.2.5.- Obtenção de Imagens pelo método da transformada de Fourier bidimensional direta (2DFT)

O primeiro problema para a aplicação do método é a eleição do plano que se deseja analisar no interior de um objeto qualquer. Para tal, usa-se chamada técnica de excitação seletiva [149] com aplicações de um gradiente de campo magnético, ao longo de um eixo em uma dada direção. Consegue-se, assim, que as frequências de precessão dos núcleos variem linearmente ao longo desse eixo. Em seguida, aplica-se um pulso de rádio frequência cujo espectro de frequência não ultrapasse um intervalo estreito. Dessa forma, a excitação ficará confinada a um determinado plano (ou "fatia"), de espessura limitada, perpendicular ao eixo escolhido (Fig. 4.11). A espessura desta fatia está dada pela seguinte expressão [149]:

$$\delta_z = \frac{I}{\gamma G_z \tau} \quad (4.12)$$

onde  $\delta_z$  é a espessura da fatia,  $\gamma$  o fator giromagnético,  $G_z$  o gradiente de campo e  $\tau$  o tempo que demora o pulso (largura do pulso). Por exemplo, seja um pulso seletivo de frequência  $W_0$ , com envoltório  $\text{Sen}(x)/x$ , de "largura" (distância entre os primeiros zeros) de 1ms. A "largura" do espectro de potência da tal pulso (de forma retangular), é de 1KHz. Se o gradiente ao qual está submetido o objeto for de 1 Gauss/cm, e estivermos sintonizando os protons, com  $\gamma = 4.257$  KHz/Graus, de (4.12) obtemos uma fatia do objeto de 0.24cm de espessura. Desta forma, apenas os núcleos nele contidos responderão às frequências do pulso (Fig. 4.11).

Uma vez selecionada a fatia relevante (supondo que pertença ao plano x-y) é criada uma situação em que em um dado instante, todos os núcleos atômicos nela situados precessionam em fase e com a mesma frequência. Aplica-se, em seguida, por um breve instante, um gradiente  $G_y$ , chamado codificador de fase, para produzir uma discriminação de frequência na direção y da fatia. Após tal aplicação, cada isocromata de  $G_y$  terá evoluído para uma fase diferente, determinada pela duração e amplitude de gradiente na coordenada y da fatia. Para que os dados possam ser processados, ainda é necessário aplicar um gradiente  $G_x$ , cuja função é gerar isocromatas em coordenadas x da fatia, ou seja, criar linhas perpendiculares a  $G_x$  nas quais os núcleos possuam uma mesma frequência de ressonância. No entanto, a ação previa de  $G_y$  já produziu uma codificação de fase ao longo dessas isocromatas, como se mostra na figura 4.11. Como consequência, haverá contribuições de diferentes isocromatas na composição do sinal de RMN, cujas amplitudes e fases ficam dependentes da codificação precedente. Para conseguir dados suficientes à reconstrução de uma imagem, todo esse processo precisa ser repetido, mudando-se de cada vez a codificação de fase, isto é, aumentando-se a intensidade do gradiente  $G_y$  [147].

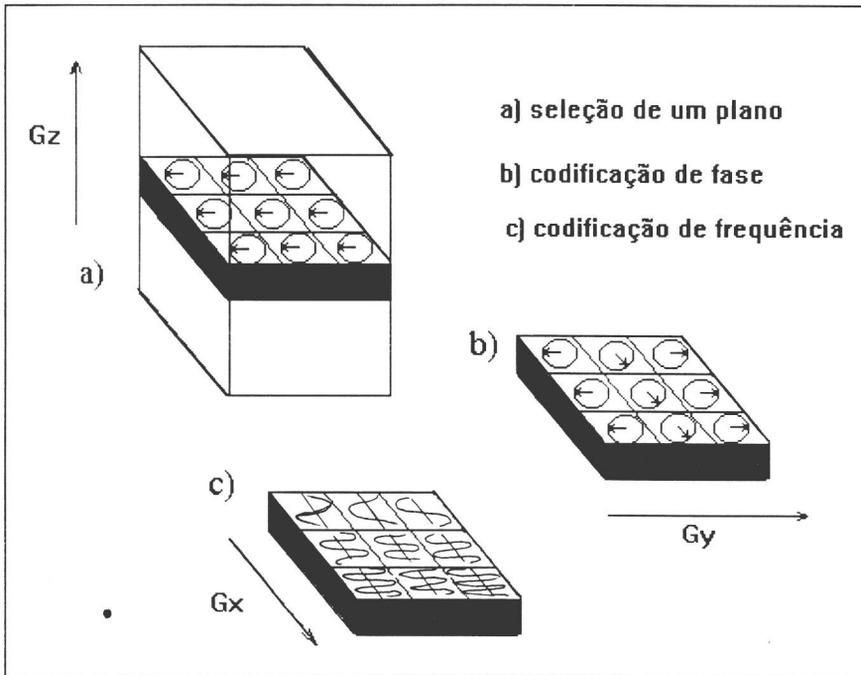


Fig. 4.11. Método de transformada de Fourier bidimensional direta. Neste caso, a identificação dos sinais provenientes de cada região do corpo exige três etapas, anteriores à formação da imagem: (a) com o gradiente  $G_z$  e o pulso seletivo de RF, selecionamos a fatia do corpo que desejamos analisar; (b) aplicamos em seguida, um gradiente  $G_y$ , chamado codificador de fase e (c) aplicamos um gradiente  $G_x$ , que dá lugar a um aumento no valor do campo magnético ao longo da direção  $x$ , fazendo com que a frequência de precessão dos spins passe a ser proporcional à sua ordenada  $x$  [147].

Para compor a imagem, os dados obtidos são submetidos a uma transformada de Fourier bidimensional direta, com relação às variáveis  $t$  (tempo) e  $G_y$ , e a imagem é obtida graficando-se a densidade nuclear como função da posição nas direções  $x, y$ .

O principal fator limitante na velocidade de aquisição, para a obtenção de uma imagem de aquisição de RMN, é o tempo de relaxação longitudinal  $T_1$ . Como vimos, entre cada dois ecos adquiridos com diferentes codificações de fase (2DFT) é necessário esperar um tempo de ordem de  $T_1$  para que a maior parte dos núcleos tenham chance de retornar à condição de

equilíbrio ( $M_z$  máximo) e possam ser reexcitados. Por exemplo, nos tecidos orgânicos, o valor de  $T_1$  é por volta de 1s. Portanto, se necessitarmos de uma resolução na direção da codificação de fase de 256 pontos, a duração da aquisição de dados será de aproximadamente 4 minutos. Tempo muito grande frente às técnicas convencionais de ultrassonografia e CT. Contudo, muitos esforços estão sendo feitos para superar estas desvantagens na tentativa de buscar técnicas alternativas mais rápidas de aquisição [149, 145, 148].

#### 4.3.- Tomografia computadorizada (TC) por raios X

A tomografia computadorizada (TC) por raios X é uma técnica que usa um avançado processamento computacional de sinais, capaz de gerar amostragens em seções transversais do corpo explorado. Isto é, de fato, a origem da evolução da tomografia computadorizada por raios X, cujos primeiros dias vem dos anos 70.

O princípio básico da TC de raios X envolve a geração do raios X, detecção, digitalização, processamento e reconstrução computacional da imagem. Como o raios X passa através do corpo explorado, eles são atenuados em taxas diferentes pelos diferentes materiais que compõem o corpo. Assim, as atenuações dos raios X são coletadas por detetores e convertidas em impulsos digitais ou dados por um sistema ADC (conversor analógico digital). Estes dados digitais são fornecidos a um sistema de computação para sua correspondente reconstrução.

Por simplicidade, o feixe de raios X é explorado ao longo de uma linha, em uma dada direção. Para executar diferentes ângulos ou perspectivas, esta exploração é repetida para cada ângulo de visão, simplesmente ao rotacionar o tubo de raios X e os detetores.

As técnicas, tanto de aquisição como de reconstrução de imagens usando fontes de raios X, são bastante conhecidas e divulgadas na literatura. Por exemplo, Crestana [51]; Cho [156]; Ahluwalia [157]. Assim, nesta seção, faremos só uma breve introdução ao fundamento físico da TC por raios X e uma comparação entre as diferentes formas de aquisição classificadas por gerações.

#### 4.3.1.- Princípio físico da TC por raios X

Se um feixe de ftons de raios X, monoenergéticos de intensidade  $I$  atravessa um material homogêneo de espessura " $x$ ", a densidade dos ftons de energia  $E$  emergentes  $I_0$  está dada pela seguinte relação:

$$I = I_0 \exp\{-\mu[\rho, Z, E]x\} \quad (4.13)$$

onde  $\mu$ ,  $\rho$  e  $Z$  são o coeficiente de atenuação linear, a densidade e a composição atômica do material respectivamente e  $I_0$ ,  $I$ , o feixe incidente e o feixe emergente, respectivamente.

Na região de energia, onde a maioria dos sistemas convencionais de tomografia por raios X está sendo empregado para fins médicos ( $\sim 70$  KeV), há dois tipos de interação dos ftons de raios X com os componentes do material: absorção fotoelétrica e espalhamento (coerente e não-coerente).

Na absorção fotoelétrica, os ftons de raios X são completamente absorvidos pela transferência de toda sua energia a um elétron. O espalhamento é subdividido em dois componentes: Rayleigh (coerente) e Compton (não-coerente). No espalhamento Rayleigh, a direção dos ftons de raios X é trocada, mas a energia é conservada. Por outro lado, com espalhamento Compton, tanto a energia como a direção são trocadas. A figura 4.12, apresenta as interações do raios X com a água.

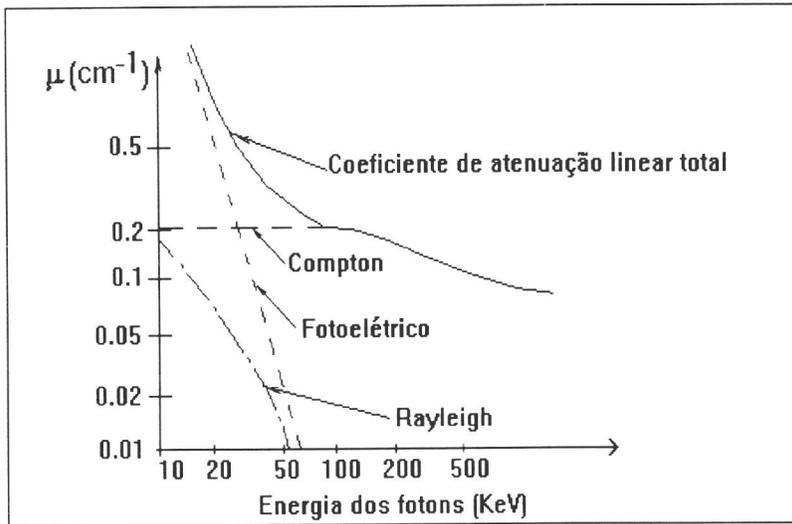


Fig. 4.12. Coeficiente de atenuação linear da água e as contribuições em cada interação atenuação do raios X como função da energia [156].

Se o material irradiado for não homogêneo,  $\mu(\rho, Z)$  dependerá da posição no material. Para um feixe de raios X monocromático, na direção  $y$ , a intensidade do raios X emergente  $I(x)$  será:

$$I(x) = I_0(x) \exp\left\{-\int \mu(x, y) dy\right\} \quad (4.14)$$

onde  $I_0(x)$  e  $\mu(x, y)$  são a intensidade do raio incidente e o coeficiente de atenuação do raios X, respectivamente.

Os feixes de raios X emergentes são coletados através de detectores de radiação de variado tipo. Por exemplo, cristais de cintilação acoplados a uma fotomultiplicadora (PMT) [156]. Em geral, a saída dos detectores consiste de sinais elétricos proporcionais energia do raio incidente. Os parâmetros mais importantes a serem considerados para os detectores de raios X, usados na TC são: eficiência, relacionado absorção e conversão do raios X incidente em sinal elétrico; linearidade, com relação faixa dinâmica da resposta do detector e

a resposta no tempo ( velocidade do detector para coletar os ftons de raios X e recuperar-se para coletar os próximos ftons).

Para cada perfil, os sinais do sistema de detetores são convertidos em pulsos digitais por um ADC. Estes sinais são coletadas pelo computador via processamento eletrônico de sinais, para a reconstrução da imagem. Os passos de ângulo de visão, entre sucessivos perfis, são normalmente de  $\sim 1^\circ$  ou menor, e algumas centenas de perfis são geralmente necessários para cada fatia tomográfica (Fig. 4.13). O tempo necessário para a reconstrução de uma imagem pode ser relativamente grande comparado com o tempo da aquisição de dados. Daí a necessidade de uso de periféricos computacionais de propósito específico.

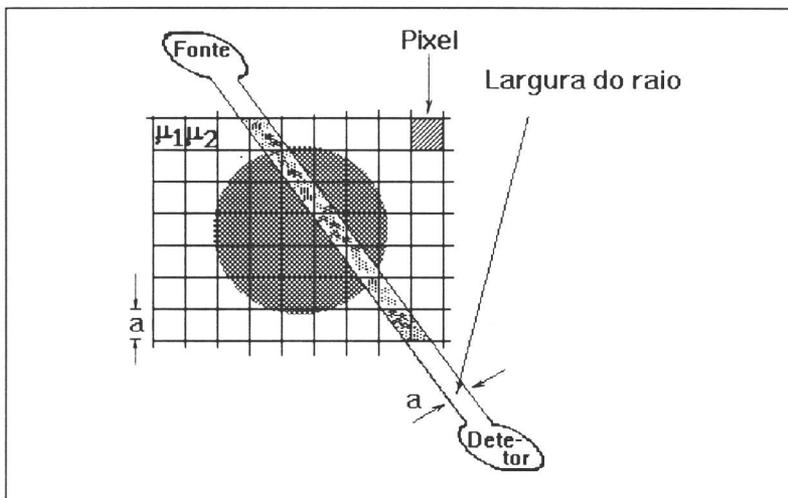


Fig. 4.13. Esta figura mostra esquematicamente um plano de um corte tomográfico. Mostra-se a sua divisão em uma malha de células quadradas de lado "a", que coincide com a largura do raio (ângulo de visão). Os valores dos coeficientes de atenuação lineares  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  são calculados em pontos discretos. Tais pontos são chamados de células ou pixels [51].

A maneira como é realizada a detecção dos ftons de raios X emergentes é usado para classificar o sistema de TC em gerações. Estas gerações representam a evolução dos sistemas

TC, que, principalmente, é baseada na disposição do sistema de detectores, de forma a minimizar o tempo de geração de uma imagem tomográfica.

Assim, os sistemas de TC por raios X, se classificam em [156]:

a) **primeira geração.**- Desenvolvida no ano de 1970 por Hounsfield [158]. A exploração é feita através de um simples feixe de raios X e somente um detector, ambas, detector e fonte rotacionando e deslocando-se sincronizadamente (Fig. 4.14a). O tempo de coleta de dados necessário para a correspondente reconstrução da imagem tomográfica de uma fatia leva alguns minutos,

b) **segunda geração.**- Esta geração incorpora um estreito ângulo do feixe de raios X (feixe em forma de leque) e um arranjo de múltiplos detectores. O tempo de exploração para a obtenção da imagem nesta geração é reduzido substancialmente, sendo de aproximadamente 20s (Fig. 4.14b).

c) **terceira geração.**- Nesta geração o ângulo do feixe de raios-x é ampliado, com o feixe enforma de leque cobrindo todo o objeto a ser explorado (Fig. 4.14c). O tempo de exploração completa, nesta geração, é reduzido a menos de 3s.

d) **quarta geração.**- A construção de um anel circular fixo para a disposição dos detectores é provavelmente a melhor escolha, de forma a rotacionar só a fonte de raios X, permitindo maior velocidade e eficiência na coleta de dados. O ângulo largo do leque do feixe de raios X envolve o corpo inteiro a ser analisado, onde mais de 600 detectores fixos estão dispostos em um anel circular. Esta disposição permite superar os efeitos "dispersivos" na resposta ao tempo de detecção, ocorridos nas outras gerações. Devido a velocidade de rotação dos detectores, aparecerá um tempo de resposta na detecção de um foton e o sistema recuperar-se para detectar o próximo foton. Este efeito introduz incertezas ou "ruídos" no sinal detectado. Pela disposição circular dos detectores na quarta geração, este efeito é eliminado (Fig. 4.14c)

Este último tomógrafo, disponível no laboratório de tomografia do Hospital das Clínicas da Universidade Estadual de Campinas, foi usado na obtenção dos resultados experimentais do acompanhamento da dinâmica do fenômeno "fingering", no interior do sistema de amostra de solo arenoso utilizado a ser descrito na próximo capítulo.

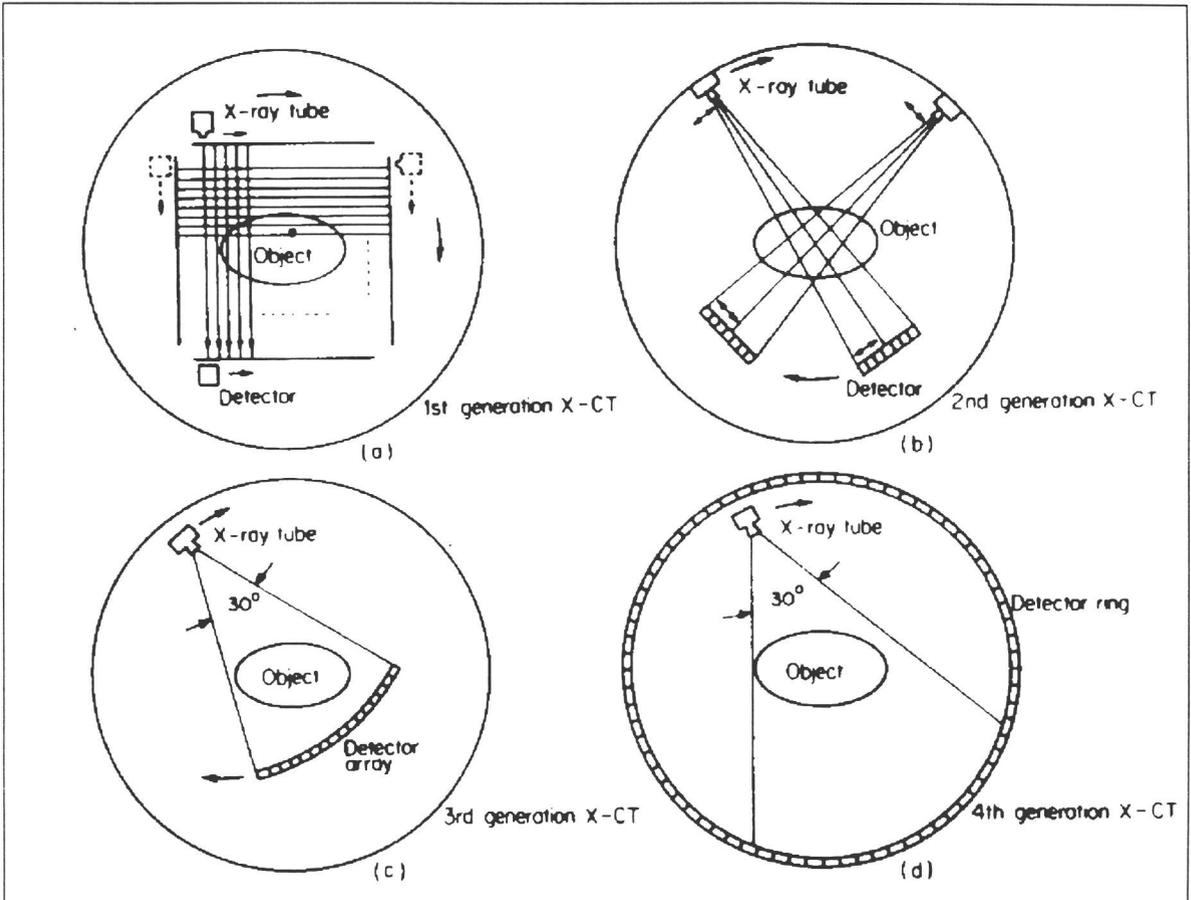


Fig. 4.14. Esquema mostrando a evolução das quatro gerações de tomógrafos computadorizados por raios X. a) Primeira geração; b) segunda geração; c) terceira geração e d) quarta geração [156].

## CAPITULO V

### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descreveremos os diferentes experimentos realizados, tanto em duas como em três dimensões, no laboratório, para a caracterização do fenômeno "fingering" usando técnicas não invasivas. Também, descreveremos as técnicas de porosimetria de mercúrio, "permeamtria" e gravimetria utilizadas na medida de perfis dos poros, a condutividade hidráulica em saturação e a umidade respectivamente, das amostras de solo arenoso usados nos diferentes experimentos. Após, utilizando a teoria da geometria fractal, caracterizaremos as estruturas dos "fingers" em 2-D geradas no laboratório, tanto em situações dinâmicas como estáticas. Isto será feito através do cálculo de sua dimensão fractal  $D$ , utilizando os métodos de "box-counting" e "sand-box". Finalmente, serão descritas as simulações realizadas, em 2-D, utilizando a teoria de percolação por invasão modificada para o acompanhamento do fenômeno, morfologicamente.

#### 5.1.- Preparação e seleção das amostras de solo

Para os experimentos do fenômeno "fingering" em duas dimensões (2-D), foram selecionadas seis amostras de areia usadas em construção. A escolha destas amostras foi feita, de forma a obter amostras com maior porcentagem de sílica (areia limpa) ou areia quartzosa. A seleção foi realizada baseada no seu tamanho granulométrico. Para tal, utilizamos peneiras do tipo USA de números: 10, 18, 35, 50, 70, 100 e 140 correspondentes em diâmetro de aberturas de seu espaço 2.00, 1.00, 0.50, 0.297, 0.212, 0.149 e 0.106 mm, respectivamente. A análise granulométrica das seis amostras de areia selecionadas, estão mostradas na tabela 5.1.

As amostras assim selecionadas, foram previamente caracterizadas, medindo suas condutividades hidráulicas em saturação ( $K$ ), suas porosidades totais ( $\Phi$ ) e o perfil de distribuição de poros ( frequência de distribuição de poros).

*Tabela 5.1. Amostras de solo arenoso selecionadas para os experimentos do fenômeno "fingeirng", em 2-D*

<i>Número da amostra de solo arenoso</i>	<i>Diâmetro partícula: d (mm)</i>	<i>Diâmetro de peneira</i>	<i>Descrição</i>
1	$0.149 < d < 0.106$	$100 < d < 140$	areia fina
2	$0.212 < d < 0.500$	$70 < d < 35$	areia semi-fina
3	$0.297 < d < 0.500$	$50 < d < 35$	areia semi-fina
4	$0.500 < d < 1.000$	$35 < d < 18$	areia semi-grossa
5	$1.000 < d < 2.000$	$18 < d < 10$	areia grossa
6	$0.149 < d < 1.000$	$100 < d < 18$	areia semi-grossa

### *5.1.2.- Medida da condutividade hidráulica K, em saturação*

A condutividade hidráulica  $K$ , que reproduz a capacidade do solo para transportar o fluido, é definida como a relação em módulo, do fluxo  $\bar{q}$  ao gradiente hidráulico  $\bar{\nabla}H$  ou também como a tangente à curva do fluxo versus o gradiente (Fig. 5.1), como já introduzido no capítulo II, relação (2.15).

A condutividade hidráulica, além de depender das propriedades do solo, depende também do tipo de fluido (densidade e viscosidade), compostos químicos, dos processos físicos e biológicos, das características geométricas do solo, da porosidade total, do perfil de poros, da tortuosidade e em menor grau da geometria dos poros do solo e da temperatura

[47]. Assim, para medir-se a condutividade hidráulica de um determinado solo no laboratório, é necessário levar em consideração as condições experimentais de medida, de forma a minimizar a influência dos parâmetros acima mencionados.

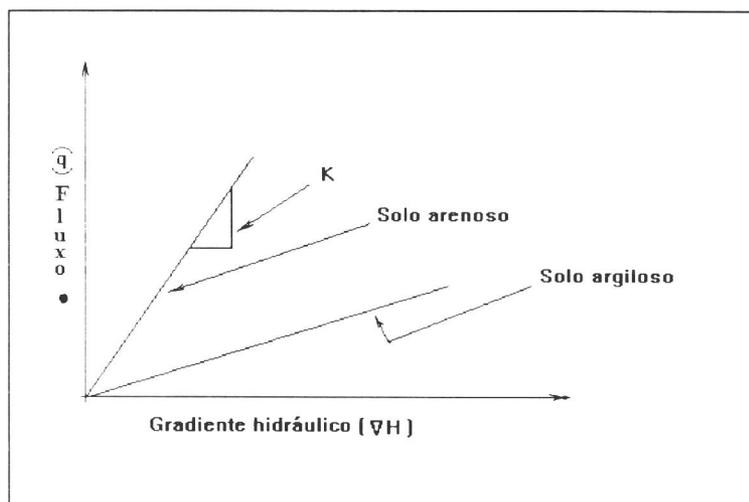


Fig. 5.1. Dependência linear do fluxo, em relação ao gradiente hidráulico, onde a condutividade hidráulica  $K$  é a tangente à curva.

Nas medidas da condutividade hidráulica, no laboratório, são usados permeâmetros (Fig. 5.2). Nestes aparelhos, são colocadas as amostras de solo, de forma a preencher homogêneamente o recipiente. Para minimizar a influência da distribuição geométrica (grau de empacotamento) na medida de  $K$ , é introduzido o parâmetro físico de densidade global ou aparente  $\rho_b$ , definido no capítulo II, relação (2.4).

Tal parâmetro relaciona de forma aproximada o grau de empacotamento (arranjo geométrico) do material no recipiente. Deste modo, para a medida da condutividade hidráulica no laboratório, levando em consideração, por exemplo, o tipo de solo (composição, granulometria, densidade de partícula), a porosidade total, a densidade global, o tipo de fluido (composição química) e o perfil de poros, é possível otimizar os resultados de medida.

A figura (5.2) mostra o esquema do permeâmetro utilizado, na medida da condutividade hidráulica das seis amostras de solo enumeradas na tabela 5.1. Este sistema de medida encontra-se instalado no laboratório de análises de materiais do Departamento de Geotecnia da EESC - USP, São Carlos, SP.

Para o cálculo da condutividade hidráulica, usamos a seguinte relação [47]:

$$K = \frac{Q L}{A h t} \quad (5.1)$$

onde K é a condutividade hidráulica de saturação (cm/s), Q o volume do líquido que passa por unidade de tempo pela unidade de área de secção (perpendicular ao movimento)(cm<sup>3</sup>), L a altura da amostra de solo no recipiente (cm), a área da secção transversal do permeâmetro (cm<sup>2</sup>), h a altura do nível do fluido, em relação ao fundo do permeâmetro (ponto B da figura 5.1) e t o tempo (s).

Os resultados destas medidas, para as seis amostras de solo arenoso consideradas, serão apresentadas na secção de resultados, no próximo capítulo.

### 5.1.3.- Medida da porosidade total ( $\Phi$ )

Para se medir a porosidade total ( $\Phi$ ), das seis amostras de solo selecionadas, foi usado o método conhecido como de "método gravimétrico", descrito como segue: inicialmente pesa-se a amostra de solo seco (secado em uma estufa a 105 °C de temperatura, durante 24 horas). Em seguida, satura-se com água [43] e pesa-o novamente. Por diferença de peso, entre o solo molhado e o solo seco, obtém-se o peso de água contida na amostra de solo. Assim, usando-se a relação (2.1) definida no capítulo II, calcula-se a porosidade total das 6 amostras selecionadas, a serem apresentadas no próximo capítulo.

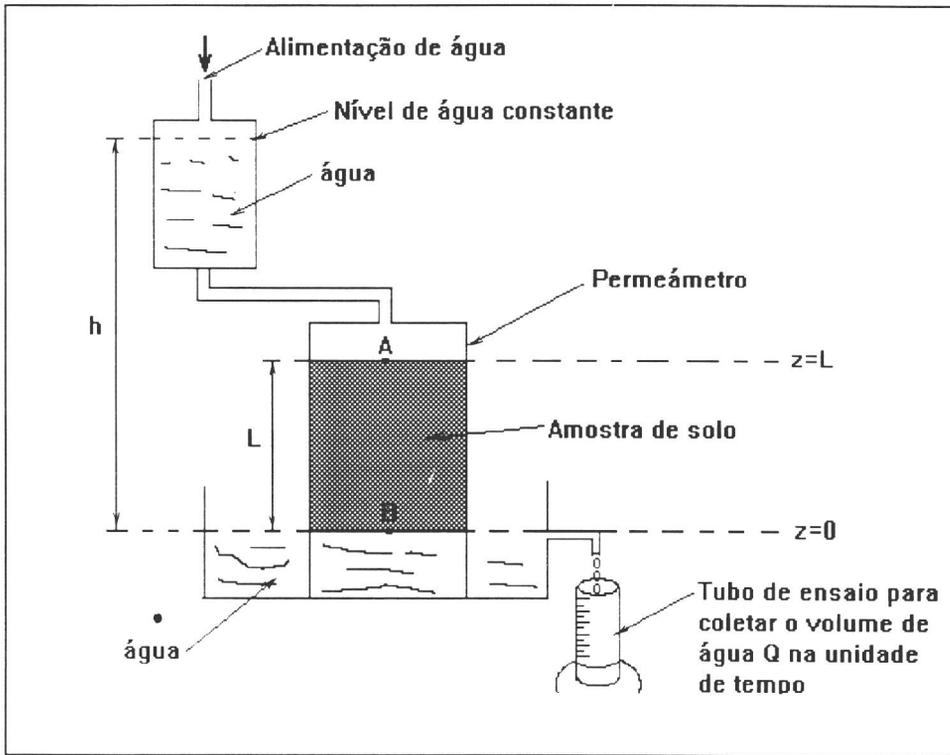


Fig. 5.2. Esquema mostrando o sistema de permeâmetro, utilizado para a medida da condutividade hidráulica  $K$  em saturação, das seis amostras de solo selecionadas.

#### 5.1.4.- Medida da distribuição de poros ou perfil de poros das amostras selecionadas

Antes de descrever o método experimental de medida de distribuição de poros, será feita uma breve introdução da técnica do porosímetro de mercúrio, utilizada nas medidas realizadas neste trabalho.

A técnica do porosímetro do mercúrio é baseada na lei da capilaridade que governa a penetração do líquido no interior de um poro (ver capítulo II, item 2.2.2). Esta lei, para o caso de líquidos que não molham o meio (líquidos "non-wetting"), como é o caso do mercúrio, e, assumindo poros de forma cilíndrica, é expressa pela equação de Washburn [159]:

$$D = - \frac{4 \gamma \cos \alpha}{p} \quad (5.2)$$

onde  $D$  é o diâmetro do poro (em  $\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$ ),  $\gamma$  a tensão superficial (dinas/cm),  $\alpha$  o ângulo de contato e  $p$  a pressão aplicada ( em PSI,  $1\text{PSI} = 6.8848 \cdot 10^4 \text{ dinas/cm}^2$ ). O sinal negativo é para compensar o sinal negativo do  $\cos\alpha$ , pois para o mercúrio  $\alpha > 90^\circ$  e  $\cos\alpha < 0$ .

Assim, o volume  $V$  de mercúrio que penetra diretamente nos poros é medido como uma função da pressão  $p$  aplicada. A informação  $p$ - $V$  será a única caracterização da estrutura dos poros. Por exemplo, baixa pressão, o mercúrio penetra nos poros grandes. Em alta pressão os poros menores são sucessivamente preenchidos.

A técnica do porosímetro de mercúrio, ou também chamada de intrusão de mercúrio, para a medida da distribuição de poros em solos é conveniente e de rápida obtenção, comparada com outras técnicas [160, 161, 162], embora várias fontes de erro deverão ser observadas na discussão dos resultados obtidos. Por exemplo, raramente os poros serão de forma cilíndrica (nesta situação a relação (5.2) constitui um modelo muito especial e simples, mas, de outro ponto de vista, o problema resultaria muito complexo); o ângulo de contacto  $\alpha$ , pode variar entre  $112$  a  $150^\circ$  dependendo do material, não havendo consenso na definição do ângulo a ser usado no caso de solos [160]. A tensão superficial do mercúrio também varia com a pureza deste e o material de contacto, entre  $0.43$  a  $0.52 \text{ Joule/m}^2$ , aproximadamente. Outra fonte de erro, também pode estar associada a uma distribuição não uniforme da pressão aplicada para a penetração do mercúrio, devido a impurezas no mercúrio e existência de armadilhas de ar dentro dos poros (após fazer o vácuo no sistema poroso). Também pode acontecer o rompimento dos poros durante a aplicação de pressões altas para a medida dos microporos.

O aparelho utilizado, para a medida do perfil de poros das seis amostras de solo selecionadas, foi o sistema "Pore Sizer 9320 System", instalado no laboratório de porosimetria do Departamento de Física e Ciências dos Materiais do IFQSC-USP, São Carlos-SP. Este aparelho tem a capacidade de medir a baixa pressão: de 0 a 30 PSI, correspondendo a tamanho de poros (em diâmetro) compreendidos entre 360 e  $6\mu\text{m}$  e a alta pressão: de 0 a 30.000 PSI, correspondendo a tamanho de poros compreendidos entre 6 e  $0.006\mu\text{m}$ . Os resultados para as medidas desta tese foram obtidas considerando uma tensão superficial de  $\gamma = 485$  dinas/cm e o ângulo de contato  $\alpha = 130^\circ$  (valores sugeridos pelo manual de utilização do aparelho), dando o valor de diâmetro dos poros em  $\mu\text{m}$  (micras), como apresentados na seção resultados.

## 5.2.- Experimentos do fenômeno "fingering" em 2-D

### 5.2.1.- Montagem do experimento de dupla camada (solo estratificado)

O experimento de infiltração de água em solos de dupla camada foi montado no laboratório do CNPDIA-EMBRAPA de São Carlos-SP. Para isto, foi construída uma caixa de acrílico de 100cm de altura, 30cm de largura e 1cm de espessura, com a finalidade de comparar resultados deste trabalho com aqueles obtidos por Glass et al [22, 23] e Chang [35]. No fundo da caixa, foram realizados dez furos de 0.5cm de diâmetro para a saída do ar. A parte superior da caixa foi mantida aberta ao ar livre (Fig. 5.3). O material usado constituiu-se das seis amostras de areia quartzosa listadas na tabela 5.1, realizando-se cinco experimentos diferentes, cada uma repetida cinco vezes nas mesmas condições físicas. O preenchimento da coluna de acrílico com cada amostra de solo utilizado foi realizado da seguinte maneira [30]: foi colocada a amostra de solo em duas camadas no interior da caixa, para a primeira camada, de aproximadamente 10cm de altura, foi utilizada a amostra de areia No. 1 da tabela 5.1 (descrita como areia fina). Para a segunda, camada de aproximadamente 80cm de altura (denominada como camada grossa em relação primeira camada fina), foram utilizadas as amostras Nos.2, 3, 4, 5 e 6 da tabela 5.1, cada uma independentemente. Ambas

as camadas foram preenchidas no recipiente, de forma que cada uma atingisse a distribuição mais homogênea possível. Isto foi conseguido utilizando um funil de vidro e colocando o solo no recipiente em camadas de aproximadamente 2 cm em cada processo. Se durante o preenchimento da coluna de acrílico, era observada a presença de estrias ou interfaces que poderiam influenciar o deslocamento do fluido, a amostra era removida e iniciado o processo de preenchimento novamente, até conseguir a homogeneidade desejada. Através de um tubo na parte superior da coluna sem solo, 45 ml de água foram aplicados durante três segundos na superfície do solo (nesta superfície, foi colocada uma placa de acrílico com furos de 1mm de diâmetro, de forma a espalhar a água uniformemente em toda a superfície e evitar concentrações de fluidos localizados que afetassem o deslocamento normal do fluxo). Uma vez iniciada a infiltração, a pressão da água foi mantida constante (de altura igual a 1.5 cm, mantida através de um ladrão praticado a 1.5 cm da superfície do solo) durante todo o experimento. Nesta situação, o desenvolvimento dos "fingers" foi observado através da coluna (Fig. 5.4).

#### **a) Filmagem do experimento e digitalização das imagens**

Assim que começou a infiltração de água através da coluna de dupla camada, iniciou-se a aquisição das imagens, utilizando-se uma câmera de vídeo CCD-TR50BR, da Sony. A filmagem foi realizada até o fim do experimento (instante em que o "fingering" mais rápido atingiu o fundo da caixa). As imagens, assim obtidas, foram digitalizadas para diferentes instantes de tempo durante o processo de infiltração. Empregou-se um microcomputador IBM-AT, provido de uma placa digitalizadora com 256 níveis de cinza e resolução de 512x512 pixels. As imagens, após digitalizadas e processadas adequadamente utilizando o pacote de processamento de imagens Khoros, instalada na estação de trabalho Silcon Graphics do laboratório de processamento de imagens do CNPDIA, foram usadas para quantificar o processo.

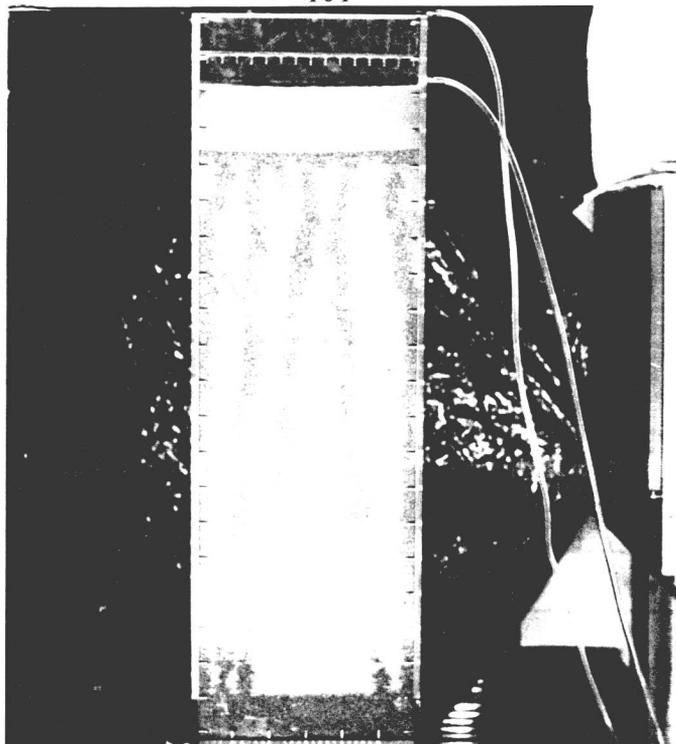


Fig. 5.3. Montagem do experimento (caixa de acrílico de 1cm de espessura, 30cm de largura e 100cm de altura) para o estudo em duas dimensões do fenômeno "fingering": coluna de solo estratificado.



Fig. 5.4. Imagem digitalizada mostrando um instante particular (após decorridos 17 minutos do início da infiltração da água no topo da coluna) do deslocamento dos "fingers" (em cinza claro) através da coluna estratificada de solo arenoso.

Assim, das 25 experiências realizadas (5 repetições para cada tipo de solo), foram filmadas 15 experiências (três para cada amostra usada). As outras 10, observadas visualmente, foram anotados os acontecimentos mais relevantes durante o seu desenvolvimento. Observou-se, na repetição das experiências de um tipo de solo (solos onde a formação dos "fingers" foi observada), um padrão na ocorrência do fenômeno "fingering". O número deles, a velocidade e a largura permaneciam aproximadamente constantes, embora os "fingers" aparecessem em regiões diferentes do espaço (mostrando o caráter estocástico do fenômeno).

Em cada experiência, uma vez gerados os "fingers" ao longo da coluna de solo, foram mudadas as condições de entrada do fluxo de água na superfície do solo. Por exemplo, foi aumentada a altura da pressão hidráulica ou feito com que a entrada do fluxo de água, ocorresse em pulsos periódicos (abrindo e fechando a torneira). Isto foi realizado, com a finalidade de observar os efeitos causados sobre o deslocamento da frente de molhamento, na presença dos caminhos preferenciais gerados ("fingers").

Para cada experiência, onde o fenômeno "fingering" foi observado, foi quantificado o número de "fingers", as suas larguras, suas velocidades e seus comprimentos. Estes parâmetros foram correlacionados com a granulometria e o perfil de poros de cada amostra, assim como com as condições iniciais impostas.

Através da teoria fractal, discutida no capítulo III, foi caracterizado a dinâmica do fenômeno pelo cálculo de sua dimensão fractal ( $D_p$ ) [109] através da frente de molhamento ou perfil de deslocamento do fluxo de água [30, 164, 166]. A dimensão fractal também foi correlacionada com a granulometria das amostras onde o "fingering" foi observado. Para o cálculo da dimensão fractal  $D_p$  foi utilizado o método de "box-counting" e "sand-box" (comparação de métodos), como já descrito no capítulo III.

## b).- Simulação dos "fingers" através do algoritmo de percolação por invasão modificada

Como já foi discutido na secção 3.8 do capítulo III, o algoritmo de percolação por invasão (percolação por sítios) foi modificado com a finalidade de simular morfologicamente o fenômeno "fingering" em solos, em 2-D. Esta modificação, através da introdução dos parâmetros F1, F2, F3, F4, F5 e F6 ( que será correlacionado com os parâmetros "F's") foi colocada no algoritmo original de percolação (construído em Linguagem Fortran). O que foi rodado, utilizando o computador VAX do IFQSC-USP como também as estações de trabalho SUN do IFQSC-USP e Silicon Graphics do CNPDIA da EMBRAPA. Foram usadas redes retangulares proporcionais à coluna de areia de dupla camada, considerada a partir da interface da segunda camada (camada grossa), onde os "fingers" foram desenvolvidos (80cm de altura por 30cm de largura). Com isto, a rede padrão usada foi uma rede retangular de 320 colunas por 800 linhas (800x320), dando uma matriz total de 256,000 sítios (cada sítio representando um poro). É oportuno esclarecer que, para efeitos da simulação através da percolação por invasão por sítios, onde cada sítio representa um poro, foi assumida a existência de poros de forma esférica. No caso de solo arenoso, esta hipótese é mais realista do que considerar poros de forma cilíndrica (como no caso da técnica de pososimetria de mercúrio).

Assim, com esta rede, com 256.000 "poros" distribuídos randômicamente (diâmetro de poros variando entre [0, 1]) e uniformemente em todo o espaço reticular, foi rodado o algoritmo de simulação considerando 20 ensaios para cada tipo de solo simulado. Com este número de ensaios o erro estatístico foi reduzido a menos de 1%. O tempo de CPU empregado, rodando no computador VAX, foi de aproximadamente 3Hrs. Este tempo foi reduzido quando foram simulados solos de granulometria grossa.

O ajuste dos parâmetros "F's", para cada tipo de simulação (cada tipo de solo), foi realizado através da densidade de ocupação da água em relação à área da coluna de solo

considerada (área de ocupação dos "fingers" / área da coluna considerada a partir da interface (80cm x 30cm)). No caso da simulação, esta densidade é dada pela "massa" de ocupação da rede toda (número total de sítios invadidos) em relação à dimensão da rede total (no caso, matriz de 800X320).

A visualização das estruturas morfológicas simuladas ("clusters" da invasão) foi possível através dos programas "PostScript" e "XVIEW" das estações SUN do IFQSC e o formato "portable bitmap" (Pbm) para imagens monocromáticas de estrutura binária [142], do programa "Khoros" da estação Silicon Graphic do CNPDIA, como serão apresentados na secção resultados do próximo capítulo.

### **5.2.2.- Montagem do experimento de solo homogêneo (não estratificado)**

Com a finalidade de estudar a formação de "fingers" em solos homogêneos ou seja não-estratificados, foram montados experimentos semelhantes aos de dupla camada, com os solos de granulometria semi-fina, semi-grossa e grossa (Nos. 2, 3, 4 e 5 da tabela 5.1). A aplicação da água na superfície da coluna foi feita bem devagar, de forma a gerar um fluxo de entrada com velocidade menor que a condutividade hidráulica em saturação do solo usado. Em alguns dos experimentos, apareceram "fingers", em outros não, dependendo da granulometria do solo. Como nos solos de granulometria menor ("fina"), a condutividade hidráulica em saturação é menor que nos solos de granulometria grossa, controlar a entrada de fluxo na superfície com velocidades menores que a respectiva condutividade hidráulica foi difícil. Particularmente nestes solos não foi observada a formação de "fingers". Nos solos de granulometria semi-grossa e grossa (Nos. 4 e 5), pelo contrário, a formação de "fingers" foi muito semelhante a dos experimentos de dupla camada. Isto nos mostra que a taxa de fluxo aplicada à superfície do solo é um dos parâmetros determinantes para a formação dos "fingers". Assim, nos experimentos de dupla camada, o papel que desempenha a camada fina é justamente regular o fluxo transmitido no interior da camada grossa.

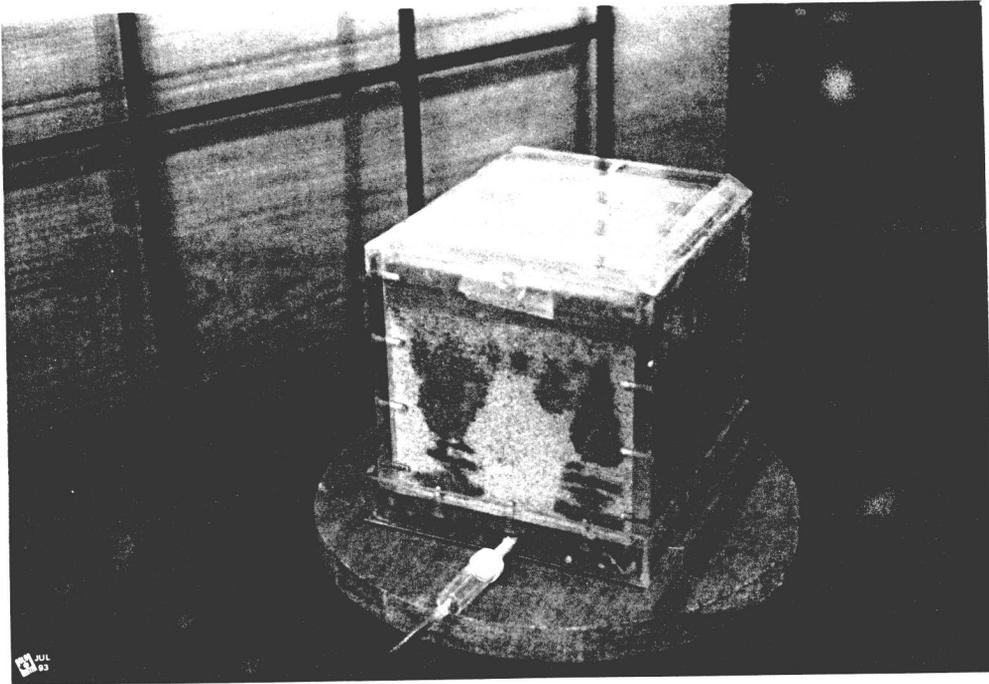
### 5.3.- Experimentos do fenômeno "fingering" em três dimensões (3-D)

Para o estudo do fenômeno "fingering", em três dimensões, usando as técnicas de tomografia médica de raios-X e NMR, foi projetado e montado um outro experimento, utilizando uma caixa cúbica de acrílico de  $15 \times 15 \times 15 \text{cm}^3$ , dimensões estas escolhidas baseadas nas disposições experimentais dos aparelhos utilizados. Nesta coluna, testamos diferentes amostras de solo arenoso (com diferente granulometria) de forma a gerar "fingers" com velocidades muito lentas, compatíveis com os tempos de resposta dos aparelhos acima citados e assim, acompanhar, a dinâmica do processo de deslocamento dos "fingers".

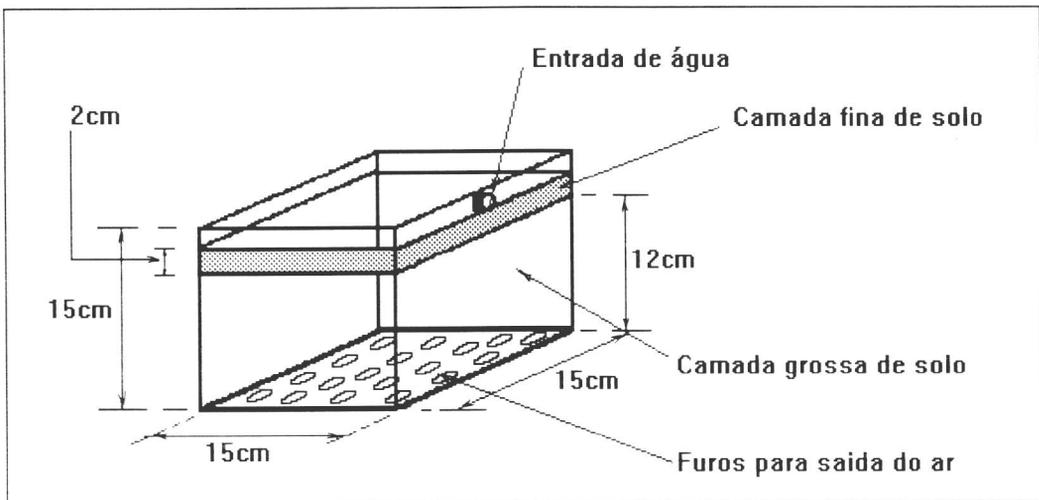
O tipo de solo arenoso, escolhido (que melhor respondeu a nossas expectativas) foi o de No. 2 da tabela 5.1, usando como primeira camada a amostra No.1 (areia fina) em todas as experiências realizadas em 3-D.

#### 5.3.1.- Experimentos com o tomógrafo médico de raios-X

Usando a caixa cúbica de acrílico de  $15 \times 15 \times 15 \text{cm}^3$  (conforme descrito no item anterior) foi construída no Laboratório de Análises de Escoamento Poroso, do Centro de Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP, uma coluna com uma camada de areia "grossa" (No.2) de altura igual a 12cm e uma camada de areia fina (No.1) de 2.0cm de altura (Fig.5.5). O preenchimento da caixa cúbica foi feito de forma a obter um empacotamento do solo, o mais homogêneo possível. Montada a coluna cúbica de solo, esta foi transportada ao laboratório de tomografia médica de raios-X do Hospital das Clínicas da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. O aparelho usado foi um tomógrafo médico de raios-X de quarta geração da "General Electric", provido de uma mesa móvel para posicionamento do paciente com deslocamento horizontal e vertical e um conjunto de detetores fixos colocados em um plano vertical circular de 50cm de raio (Fig. 5.6). Com esta disposição foi possível fazer imagens do plano vertical mantendo a amostra do



a)



b)

Fig. 5.5. a) Sistema de coluna cúbica de acrílico de  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ , utilizado nos experimentos do fenômeno "fingering" em 3-D. b) Disposição das camadas de solo arenoso.

teste fixa. Para imagens de outros planos seria necessário movimentar a amostra. Por exemplo, para obter imagens do plano horizontal, a amostra deveria permanecer deitada.

Deste modo, a amostra de solo montada na caixa cúbica de acrílico foi introduzida na parte interna central da cavidade do tomógrafo, colocada sobre um suporte horizontal de acrílico, construído para este fim, de forma a manter o alinhamento horizontal do sistema. A colocação da amostra no centro da cavidade foi feita usando a movimentação vertical e horizontal da mesa e a luz de raios laser do próprio tomógrafo. Esta luz era espalhada ao redor da circunferência onde estavam localizados o conjunto de detetores. Em seguida, foi instalado o conjunto de alimentação de água para a amostra de solo de forma a fazer o acompanhamento dinâmico do fluxo (formação dos "fingers") no interior da amostra, através das imagens tomográficas. O sistema de alimentação contínua de água foi montado usando o dispositivo de aplicação de soro para pacientes comumente empregado nos hospitais (Fig. 5.6). Este sistema foi previamente ajustado de forma a suprir um fluxo mínimo de saída, que no caso foi de 250 ml/min. A aplicação deste fluxo de água na superfície do solo foi feita através de um "chuveiro" de acrílico com furos de 1mm de diâmetro e espaçados a cada 0.5 cm. Além do mais, foi colocado na superfície do solo uma placa quadrada de acrílico, 15x15cm<sup>3</sup>, com furos de 1.5mm de diâmetro espaçados de 3mm e montada sobre um papel de filtro, de forma a obter uma distribuição homogênea e contínua de água em toda a superfície da amostra.

Uma vez instalado o sistema experimental como relatado acima, começamos a obter as imagens tomográficas seguindo a dinâmica do fluxo. Previamente, foi feito um teste com a amostra seca, sem alimentação de água, de forma a otimizar o tempo mínimo de aquisição de uma imagem seguida de outra, usando a programação automática que possui o tomógrafo. Usando o tempo mínimo que o tomógrafo possui de 2s, para a aquisição de uma imagem, foi encontrado que o sistema podia em média fazer uma imagem seguida de outra em 20s., para uma única seção de teste. Assim, decidiu-se fixar a parte central da amostra (Fig. 5.7) como única seção sagital de teste, através da qual foi feita a aquisição das imagens a cada 20s.

seguindo a dinâmica do fluxo. Desta forma, uma vez aberta a chave de alimentação do fluxo e controlando o tempo com um cronômetro, foram obtidas 9 tomografias a cada 20seg., usando a programação automática do tomógrafo em um tempo de 3 minutos e 13 segundos. O feixe de raios-X usado foi de 1.5mm de espessura, que foi a melhor colimação encontrada para nossas necessidades de estudo da interface sólido-líquido (frente de deslocamento dos "fingers"), com uma potência da fonte de 140KV (kilovolts) e 170mA (miliAmperes). O tamanho da matriz usado foi de 512x512 pixels e o círculo de reconstrução das imagens foi de 22cm de raio ("field of view") [90].

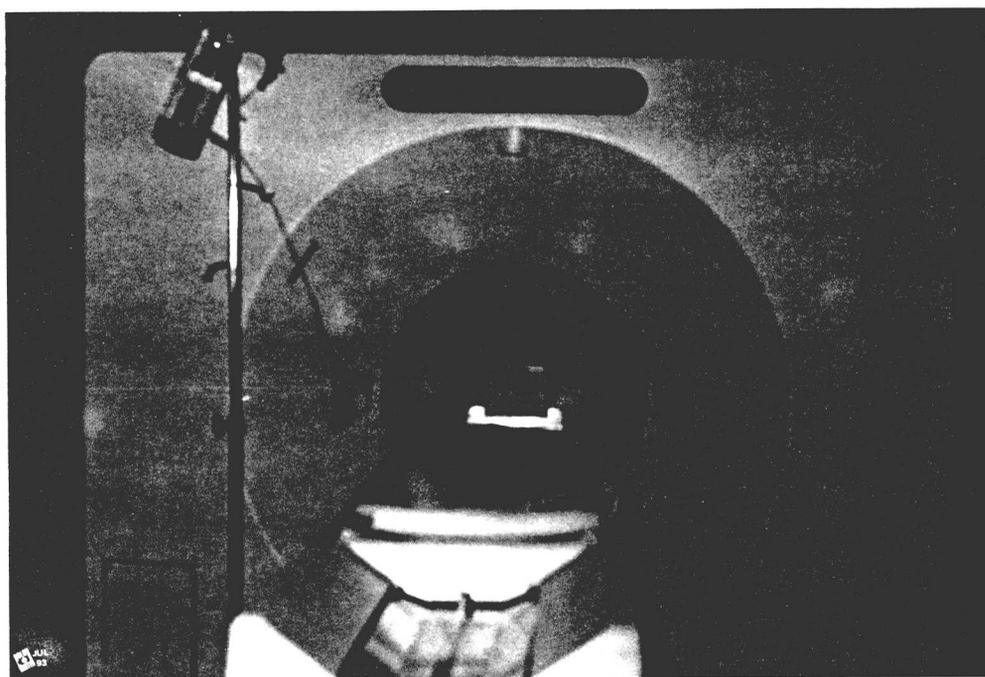


Fig. 5.6. Tomógrafo médico de raios-X de quarta geração, do Hospital das Clínicas da UNICAMP - Campinas - SP., utilizado nos experimentos em 3-D do fenômeno "fingering". Podem ser observados a disposição da coluna cúbica do solo e o sistema de alimentação de água usado.

Foram rodados mais dois experimentos semelhantes ao descrito acima, com o objetivo de estudar a distribuição espacial dos "fingers", no interior da coluna cúbica. Nestes experimentos, usando a programação automática do tomógrafo e o deslocamento horizontal

da mesa, foram obtidas imagens de diferentes seções sagitais da amostra. Foi escolhida a partir da seção central da amostra, uma seção com 3mm frente e outra seção 3mm atrás do centro, respectivamente. Estas seções, assim definidas, foram "tomografadas" repetidamente (em forma automática) durante 6 minutos, obtendo 15 tomografias. No outro experimento, também foram escolhidas três seções, uma seção no centro da amostra e as outras duas a 1cm adiante e 1cm atrás da seção central, respectivamente, fornecendo 12 tomografias em 4 minutos.

As imagens, assim obtidas, foram armazenadas em uma fita de rolo, usadas comumente no computador VAX. A leitura destes dados (imagens) foi feita no Departamento de Engenharia Elétrica da UNICAMP, com a colaboração do Prof. Dr. Roberto A. Lotufo. Tais imagens foram armazenadas em uma fita usada pela estação de trabalho do tipo "Silicon Graphic Inc." do CNPDIA-EMBRAPA de São Carlos ou do tipo "SUN" do IFQSC-USP e transportadas a estes laboratórios. Em seguida, foram processadas e analisadas através do programa "Khoros" da estação de trabalho "Silicon Graphics" do CNPDIA ou SUN do IFQSC, como serão apresentadas na seção resultados.

### **5.3.2.- Experimento com o tomógrafo de Ressonância Magnética Nuclear**

Com a finalidade de estudar a distribuição espacial dos "fingers" no interior da amostra cúbica de solo foram realizadas medidas com o tomógrafo de imagens por ressonância magnética nuclear (IRMN) do laboratório de imagens por RMN do IFQSC-USP. O aparelho usado foi um espectrômetro de 500 Gauss de campo magnético desenvolvido para fins médicos (Fig. 5.8). Foi utilizado o mesmo sistema de coluna de solo empregado nos experimentos de tomografia de raios-X; só que desta vez a alimentação de água não foi contínua. Foi um estudo basicamente de redistribuição do líquido ao logo da coluna de solo. Isto pelo fato do sistema IRMN ser mais lento na aquisição das imagens que o tomógrafo médico por raios-X.

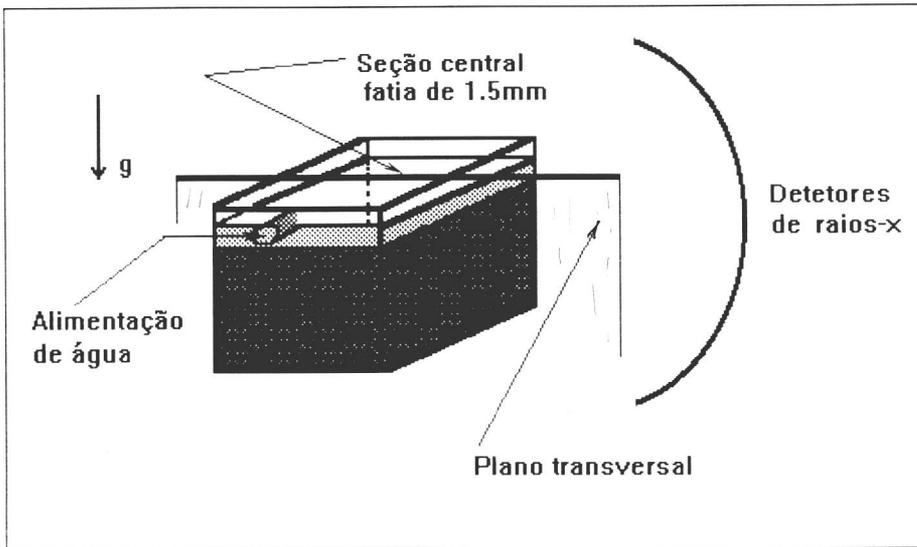


Fig. 5.7. Disposição da coluna cúbica de solo, para o experimento com o tomógrafo de raios-X. O plano transversal (central) escolhido para o acompanhamento da dinâmica do fluxo de água, ao longo da coluna, é mostrado.

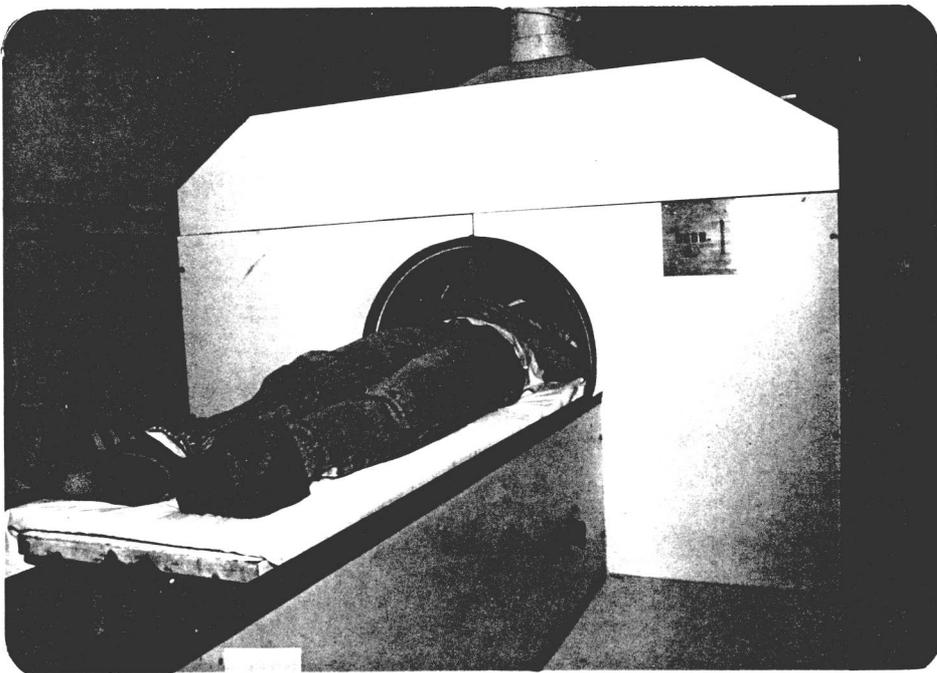


Fig. 5.8. Tomógrafo de imagens por ressonância magnética nuclear (IRMN), do laboratório de imagens por RMN do Departamento de Física e Ciências dos Materiais do IFQSC-USP, São Carlos-SP, usado para os experimentos do fenômeno "fingering" em 3-D. Observa-se também a disposição da coluna cúbica de solo e a alimentação de água utilizada.

Assim, usando o mesmo sistema de alimentação de água usado no laboratório de tomografia médica de raios-X, foi montada a coluna cúbica de solo de dupla camada no laboratório do CNPDIA-EMBRAPA. A primeira camada de 2.5cm de altura, foi preenchida com areia de textura fina (No. 1) e a camada inferior de 12cm de altura, foi preenchida com areia de textura "grossa" (No. 2). A coluna assim montada foi deslocada para o laboratório de imagens por ressonância magnética nuclear do IFQSC-USP. Nesta, foi aplicado um fluxo de água contínua de 200 ml/min, durante 3 minutos (600ml). Assim que o fluxo atingiu o regime estacionário de infiltração, foi introduzida (colocando previamente dentro de uma bobina cilíndrica de 20cm de diâmetro) no centro do eletroímã do tomógrafo de RMN (Fig. 5.8). Nesta situação, várias imagens tomográficas foram obtidas dos planos: coronal, transversal e sagital da coluna (Fig. 5.9). Para cada situação foram coletadas 7 fatias de 1.8cm de espessura espaçadas 2cm entre seus centros. Cada fatia foi reconstruída em uma matriz de 256x256 pixels, com 25mm de "field of view", produzindo imagens de resolução volumétrica ("voxels") de 0.098x0.098x18mm<sup>3</sup>. O tempo entre cada codificação de fase foi de 250ms (repetição do tempo[TR]); o tempo do spin-echo [TE] foi de 27ms e considerando 8 médias; o tempo total para a completa reconstrução das 7 fatias foi de 4.16 minutos.

Várias experiências semelhantes às descritas acima, foram realizadas com o tomógrafo de RMN. Por exemplo, experiências bastante demoradas, com a finalidade de estudar as mudanças devido aos efeitos de redistribuição da água dentro do material. Para tal, as medidas foram coletadas em intervalos maiores de tempo. No primeiro dia de experiência, foram feitas 3 aquisições de duas em duas horas e, no dia seguinte (24 hrs. depois), foram coletadas mais duas aquisições nos mesmos intervalos de tempo.

As outras experiências foram feitas para estudar os efeitos da gravidade no desenvolvimento tridimensional do fenômeno "fingering". Estas aquisições foram realizadas basicamente no plano coronal, pois neste plano, os efeitos gravitacionais são mais notórios. Devido a isto, foram coletadas inicialmente 7 fatias coronais, com o centro da amostra coincidindo com o centro do eletroímã do sistema de imagens por RMN. Outras sete

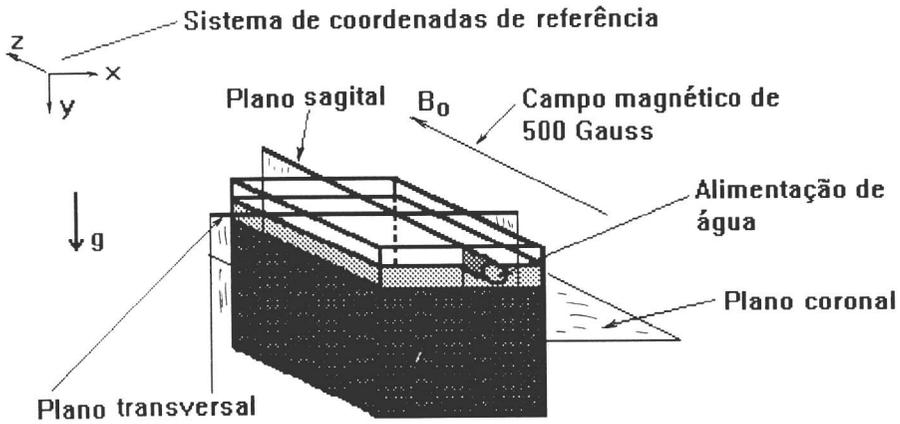


Fig. 5.9. Esquema mostrando a coluna cúbica de solo utilizado para o experimento de imagens por RMN, definindo os planos coronal, transversal e sagital.

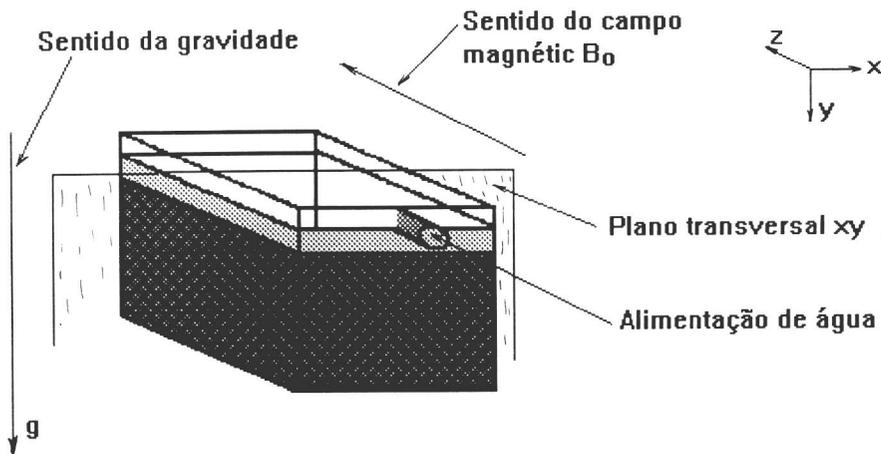


Fig. 5.10. Disposição da coluna cúbica de solo, para o experimento de "spin-echo", onde observamos o plano transversal xy que contém a frente de deslocamento do fluxo, seguindo a gravidade  $g$ . Através deste plano (sentido da "codificação de fase" no eixo (-y)) foram feitas as aquisições do sinal de NMR, seguindo a dinâmica do fluxo.

aquisições, do mesmo plano coronal, foram coletadas deslocando o centro da amostra do centro do sistema de eletroímã. Como resultado foram obtidas informações das imagens em fatias de 2cm de espessura, da separação entre centros das fatias inicialmente coletadas.

Também foram realizadas experiências repetitivas, mantendo as mesmas condições físicas de estabilidade hidrodinâmica (semelhante aquelas de duas dimensões), com a finalidade de observar mudanças no desenvolvimento do fenômeno.

A partir destas experiências, foi possível contabilizar o número de "fingers", os seus diâmetros e os seus percursos através da coluna. Também a grande variabilidade espacial do fenômeno e o caráter dominante da gravidade, ficaram evidentes.

#### **a) Reconstrução tridimensional a partir das imagens de RMN**

Usando os resultados das 7 imagens coronais, coletados com o tomógrafo de RMN, foi possível fazer uma reconstrução tridimensional do fenômeno "fingering", em condições de equilíbrio hidrodinâmico. Para tal fim, foi usado um algoritmo desenvolvido com base no método de interpolação, no Departamento de Engenharia Elétrica da UNICAMP- SP, pelo grupo de pesquisa em processamento de imagens, liderado pelo Prof. Dr. Roberto A. Lotufo. Este algoritmo foi instalado e executado, no pacote de processamento de imagens KHOROS da estação de trabalho Silicon Graphics, do CNPDIA-EMBRAPA.

#### **b) Estudo da dinâmica do fenômeno "fingering" através de medidas de "spin-echo"**

Um dos objetivos desta tese era observar a dinâmica do fenômeno "fingering" espacialmente (em 3D), no laboratório. No entanto, isto não foi possível com as técnicas de imagens usadas (IRMN e raios X). Com o tomógrafo de raios X só foi possível fazer um acompanhamento da dinâmica dos "fingers" através de fatias fixas do interior da amostra, mas não de forma global. Assim, foi planejado um outro tipo de experimento usando a técnica de

NMR. Sob a hipótese de que a força gravitacional é o parâmetro físico que governa o deslocamento dos "fingers", foi acompanhada a dinâmica destes através de observações só da frente de molhamento (sem obter imagens). Isto foi conseguido fazendo-se aquisições do sinal de spin-eco (sinal de NMR) através do tempo, usando uma "codificação de fase" ao longo do eixo y (Fig. 5.10), na direção da gravidade. O sinal de NMR ia aumentando com o decorrer do tempo, conforme a infiltração da água ia ocorrendo ao longo da coluna cúbica. Foram feitas 16 aquisições (16 "codificações de fase") em 7 fatias transversais de 2cm de espessura cada uma e espaçadas 1mm entre bordas, em um tempo de 3min. Este tempo era suficiente para que a frente de molhamento atingisse o fundo da caixa. O espectro do sinal de NMR assim obtido, para cada fatia e para cada instante de tempo, foi tratado através da transformada de Fourier unidimensional (1DTF). Com isto, foram obtidas as intensidades relativas do sinal, proporcionais a frente de deslocamento e posição espacial no plano transversal (xy) (Fig.5.10), para cada instante de tempo medido da infiltração. Através do pacote de processamento de imagens KHOROS, foi possível fazer um tratamento adequado destas intensidades do sinal, permitindo obter uma composição espacial em forma de imagens da frente de molhamento ao longo da coluna cúbica e através do tempo. Isto permitiu fazer animação gráfica da dinâmica espacial (3-D) da frente de deslocamento dos "fingers" como também de suas projeções (2-D) no plano transversal xy. Também, normalizando as intensidade do sinal com as dimensões da coluna cúbica de solo, foi possível quantificar em cada fatia e para cada instante de tempo o número de "fingers", suas larguras médias, a velocidade média relativa da frente de deslocamento e a forma da distribuição espacial da frente de deslocamento ao longo da coluna. Desta forma, foi possível acompanhar a dinâmica espacial do fenômeno, como será discutido na seção de resultados.

## CAPITULO VI

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 6.1.- Resultados das medidas de condutividade hidráulica $K$ e porosidade $\Phi$

Como apresentado no capítulo anterior (capítulo V, item 5.1.2), para a medida da condutividade hidráulica  $K$  (em saturação) utilizamos o sistema de permeâmetro instalado no laboratório de análise de materiais do Departamento de Geotecnia da EESC-USP (Fig. 5.2).

•

As seis amostras descritas no capítulo V, item 5.1 (tabela 5.1), foram previamente secadas através de um forno elétrico a 105 °C durante 24 Hrs. [47]. Em seguida, cada tipo de amostra (Nos. 1 a 6) foi colocada em permeâmetros diferentes com as mesmas características geométricas. O preenchimento de cada amostra, no permeâmetro, foi realizado de forma que ela atingisse a distribuição mais homogênea possível. Em cada caso, foi medida a massa de solo arenoso colocado no permeâmetro e sua densidade global  $\rho_b$  (usando a relação 2.4) respectiva.

Depois de aberta a torneira para a circulação de água através da amostra, e esperar um tempo de aproximadamente 2 Hs. até que o sistema alcance o equilíbrio hidrodinâmico de circulação, em cada amostra, foram realizadas 10 coletas (através de um tubo de ensaio) do volume  $Q_i$  (cm<sup>3</sup>) do líquido que atravessava a amostra de prova. A medida do tempo de coleta de cada volume  $Q_i$  foi realizada através de um cronômetro. Assim, usando a relação (5.1), foi calculada a condutividade hidráulica  $K$ , para cada amostra, cujos valores médios estão sendo apresentados na tabela 6.1.

Após, foram retiradas amostras de solo de cada permeâmetro, de diferentes regiões do permeâmetro (parte superior, parte central e parte inferior) e pesadas. Em seguida, estas amostras foram secadas em um forno a 105 °C durante 24 Hs. e pesadas novamente. Por

diferença de ambos os pesos (solo seco e solo molhado) foi calculada a quantidade média de água contida nas amostras de solo. Através da relação (2.1), calculamos a porosidade total  $\Phi$ , de cada amostra ensaiada, conforme apresentadas na tabela 6.1.

Nesta tabela podemos observar o aumento da condutividade hidráulica com o tamanho das partículas (No. 1 a No. 5) e a diminuição da porosidade total  $\Phi$ , com a densidade global  $\rho_b$ , mantida quase constante. A amostra No. 6, foi especialmente preparada, onde existe uma distribuição bem larga de partículas. Isto faz com que a condutividade hidráulica nesta seja menor que nas outras amostras (No.1 a No. 5).

**Tabela 6.1. Resultado das medidas da condutividade hidráulica em saturação K, da porosidade total  $\Phi$  e da densidade global ou aparente  $\rho_b$**

No. de amostra de solo arenoso	Condutividade hidráulica K (cm/s) $\times 10^{-3}$	Porosidade total $\Phi$ (%)	Densidade global $\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	$06.3 \pm 0.5$	$44.8 \pm 3.0$	$1.60 \pm 0.08$
2	$26.7 \pm 1.5$	$31.2 \pm 3.0$	$1.60 \pm 0.08$
3	$30.5 \pm 2.0$	$32.4 \pm 1.6$	$1.60 \pm 0.08$
4	$47.8 \pm 3.5$	$18.2 \pm 4.0$	$1.62 \pm 0.10$
5	$52.7 \pm 3.7$	$16.0 \pm 3.0$	$1.60 \pm 0.10$
6	$14.2 \pm 1.5$	$19.0 \pm 3.0$	$1.60 \pm 0.08$

## 6.2.- Resultados das medidas do perfil de distribuição de poros

Nas figuras 6.1 a 6.6 estão sendo apresentados os resultados da frequência de distribuição de poros obtidos com o porosímetro de mercúrio do laboratório de porosimetria

do Departamento de Física e Ciências dos Materiais do IFQSC-USP. São apresentados 6 gráficos, correspondentes as seis amostras de solo arenoso usadas nos diversos experimentos.

Estes resultados foram obtidos mantendo constante os seguintes parâmetros físicos de cada amostra: ângulo de contato  $\alpha = 130^\circ$ ; tensão superficial  $\gamma = 485$  dinas/cm; densidade do mercúrio  $\rho_{\text{Hg}} \approx 13.5$  g/ml; densidade global  $\rho_b \approx 1.62$  g/ml e peso de amostra utilizado  $w \approx 2.5$  g. Isto será posteriormente correlacionado com a ocorrência do fenômeno "fingering" nos experimentos de coluna de solo de dupla camada (2-D), na próxima seção.

Para um melhor esclarecimento destes resultados, vamos dividi-los em dois grupos, segundo a ocorrência e não ocorrência do fenômeno "fingering": As amostras No.1, No.3 e No.6, onde o desenvolvimento dos "fingers" não foi observado, vamos chamá-lo de GRUPO 1 e as outras, No.2, No.4 e No.5, onde houve "fingers", chamaremos de GRUPO 2. Os gráficos dos perfis de distribuição de poros destas amostras, obtidas no laboratório, foram substituídos, de forma a construir o histograma com passos de  $50\mu\text{m}$ , para um melhor entendimento e confronto, com os perfis obtidos com a simulação. Tais gráficos estão apresentados nas figuras 6.1 a 6.6. Os resultados obtidos diretamente no laboratório estão apresentados no apêndice.

**GRUPO 1.-** Neste grupo, podemos observar, por exemplo, na figura 6.1, a curva de distribuição de poros, que é bastante simétrica e curta. Isto é, o tamanho de poros varia entre  $0.00\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$ , com uma concentração maior entre  $0.00\mu\text{m}$  e  $50\mu\text{m}$  (95%) e um tamanho médio de poros de  $31\mu\text{m}$ . Apenas 5% dos poros estão fora deste intervalo.

Assim, a curva da Fig. 6.1. apresenta uma certa homogeneidade na distribuição dos poros (tipo gaussiana) e de largura estreita (vide Fig. A1, no apêndice). Esta forma de distribuição terá importante papel para a não formação de "fingers".

As figuras 6.3 e 6.6, ao contrário do que a Fig. 6.1, apresentam uma distribuição de poros bastante larga com distribuições um tanto assimétricas. A figura 6.3 apresenta uma faixa

de poros que varia entre  $0.006\mu\text{m}$  e  $250\mu\text{m}$ , com uma maior concentração de poros entre  $50\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$  (85%), e um valor médio do tamanho de poros de  $100\mu\text{m}$ . Neste gráfico, apenas 15% dos poros estão fora desta faixa. A figura 6.6 também apresenta uma distribuição de poros larga, variando de  $0.006\mu\text{m}$  a  $250\mu\text{m}$ , com a maior concentração na faixa de  $0.006\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$  (86%) onde 14% dos poros estão fora deste intervalo. Ambas as curvas mostradas nas Figs. 6.3 e 6.6 mantêm certa semelhança, com distribuição larga de poros (vide Figs. A3 e A6 no apêndice).

**GRUPO 2.-** Este grupo está caracterizado pela observação do fenômeno "fingering", nos experimentos de coluna de areia de dupla camada, realizados no laboratório, como serão descritos na seção seguinte. A figura 6.2, distribuição de poros para amostra de areia "semi-fina" (No. 2 da tabela 5.1) apresenta uma curva um tanto assimétrica, mas com uma distribuição larga de tamanho de poros, que vão de  $0.006\mu\text{m}$  a  $250\mu\text{m}$ , sendo que a maior concentração fica entre  $50\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$  (90%) e um tamanho médio de diâmetro dos poros de  $84\mu\text{m}$ . Assim, apenas 10% da concentração de poros está fora deste intervalo.

A figura 6.4 (amostra No.4), apresenta uma curva assimétrica de distribuição de poros, com uma faixa de poros compreendidos entre  $0.006\mu\text{m}$  e  $200\mu\text{m}$ , com uma maior concentração entre  $100\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$  (48%) e um valor médio no tamanho dos poros de  $102\mu\text{m}$ . Nesta curva, a concentração de poros fora da faixa de maior concentração é alta (52%), comparada com aquela da figura 6.2.

A figura 6.5 (amostra No. 5) apresenta uma curva de distribuição de poros quase constante e larga. O tamanho dos poros, nesta amostra, está compreendido entre  $0.006\mu\text{m}$  e  $250\mu\text{m}$ , onde a maior concentração está dada na faixa de  $0.006\mu\text{m}$  a  $50\mu\text{m}$  e  $100$  a  $200\mu\text{m}$  (60%), com uma média de tamanho de poros de  $130\mu\text{m}$ . Nesta distribuição, 40% dos poros estão fora da faixa de maior concentração.

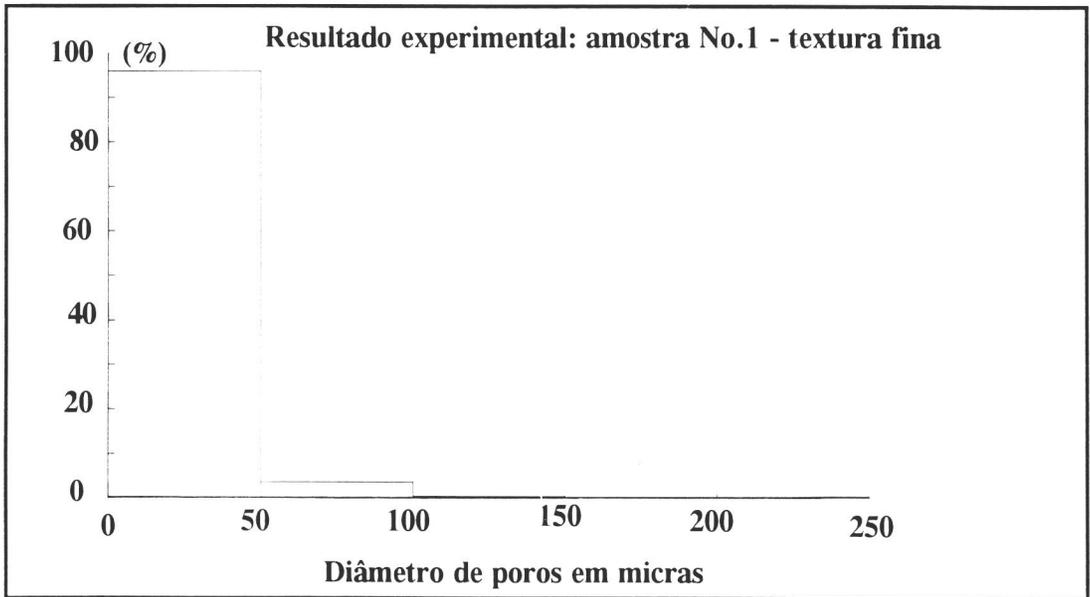


Fig. 6.1. Perfil de poros da amostra No.1, com tamanhos de grãos de areia de diâmetros compreendidos entre 0.106 mm e 0.149 mm (solo arenoso de textura fina). O diâmetro médio de poros para esta distribuição é de 31.4  $\mu\text{m}$ .

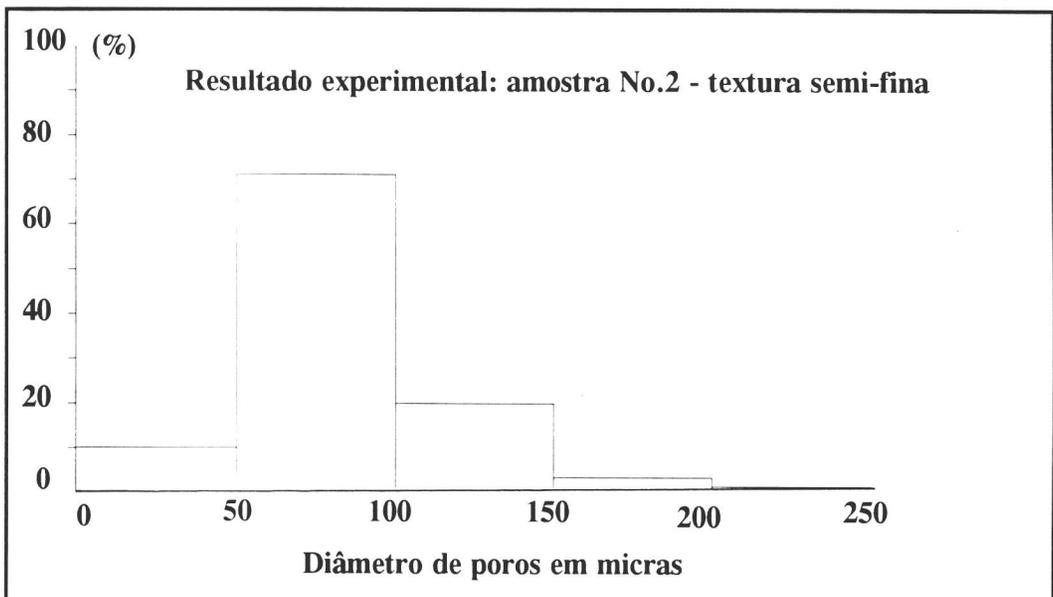


Fig. 6.2. Perfil de poros para a amostra No.2 (solo de textura semi-fina), com tamanhos de grãos de areia compreendidos entre 0.212 mm e 0.500 mm. O diâmetro médio de poros para esta distribuição é de 90.0  $\mu\text{m}$ .

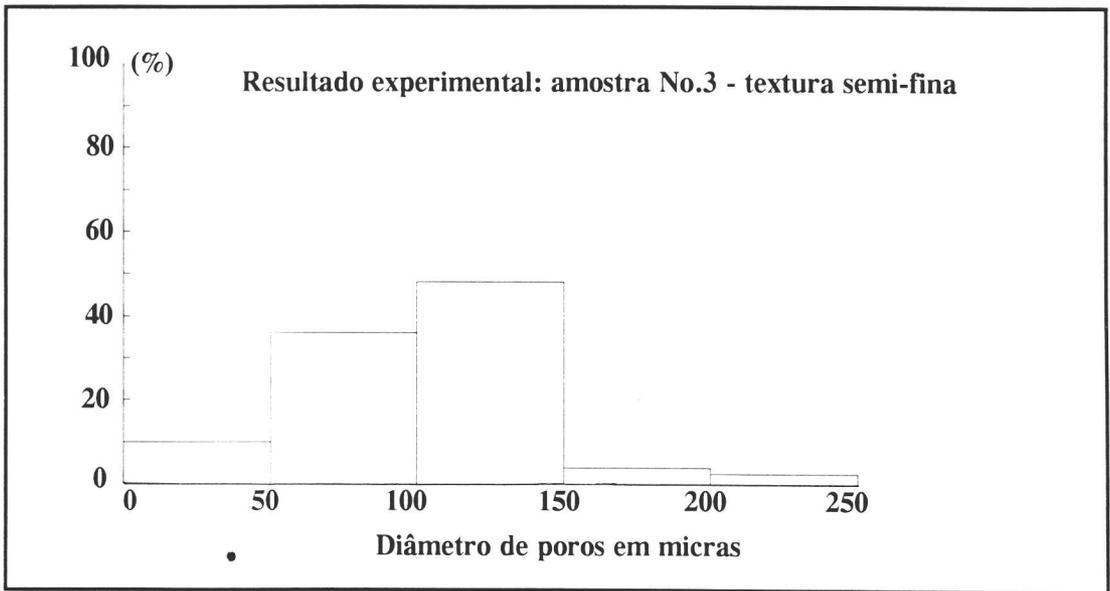


Fig. 6.3. Perfil de poros da amostra No.3 (solo de textura semi-fina), com tamanhos de grãos de areia de diâmetros compreendidos entre 0.297 mm e 0.500mm. O diâmetro médio de poros é de 100.0  $\mu\text{m}$ .

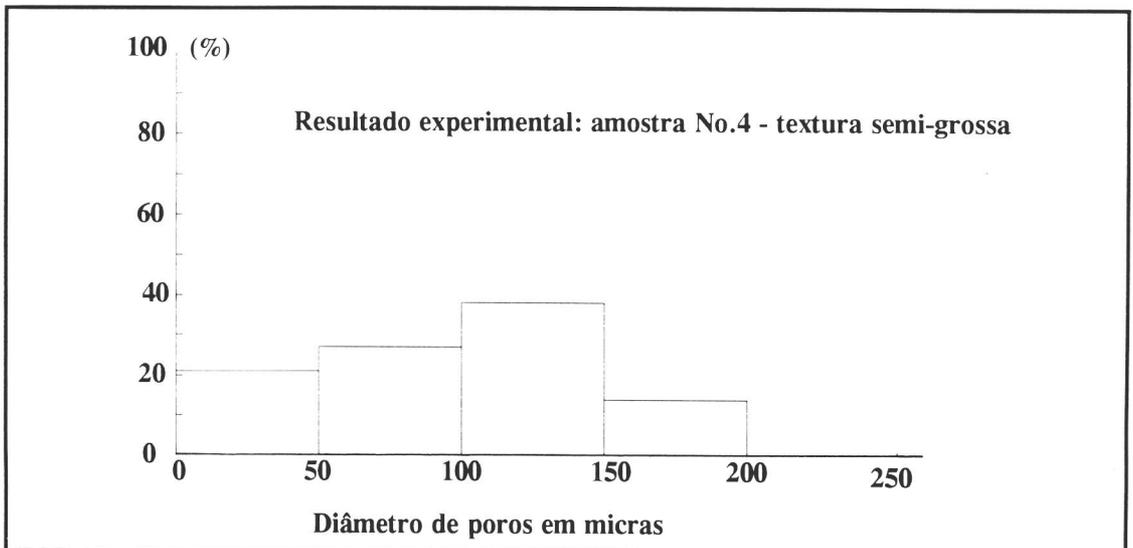


Fig. 6.4. Perfil de poros da amostra No.4 (solo de textura semi-grossa), com tamanhos de grãos de areia de diâmetros compreendidos entre 0.500 mm e 1.00 mm. Nesta distribuição, o diâmetro médio de poros é de 102.8  $\mu\text{m}$ .

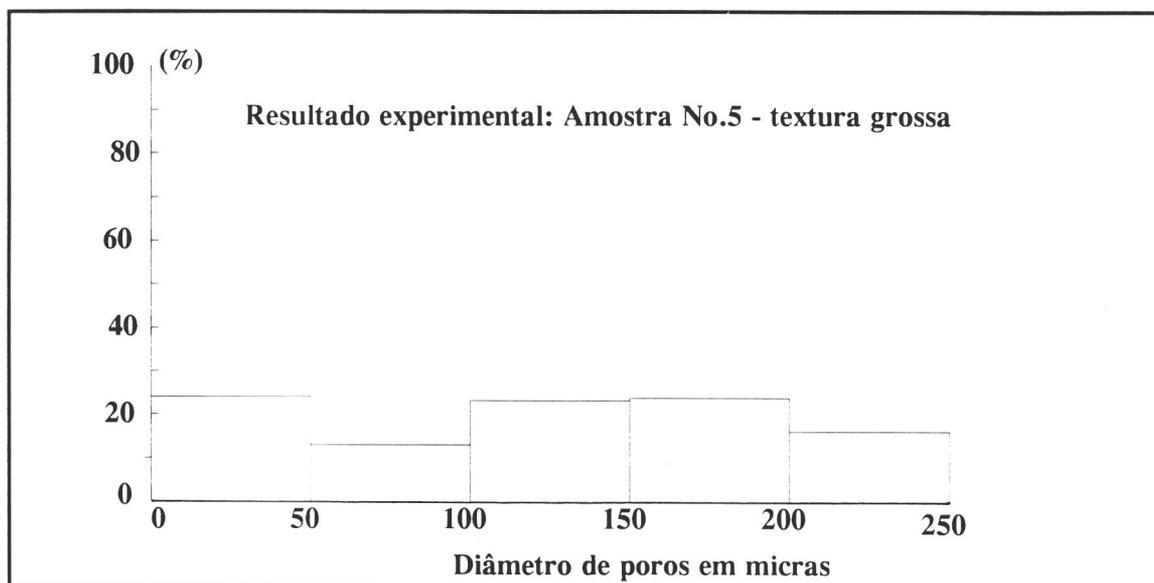


Fig. 6.5. Perfil de poros da amostra No.5 (solo de textura grossa), com tamanhos de grãos de areia de diâmetros compreendidos entre 1.00 mm e 2.00 mm e diâmetro médio de poros de 127.7  $\mu\text{m}$ .

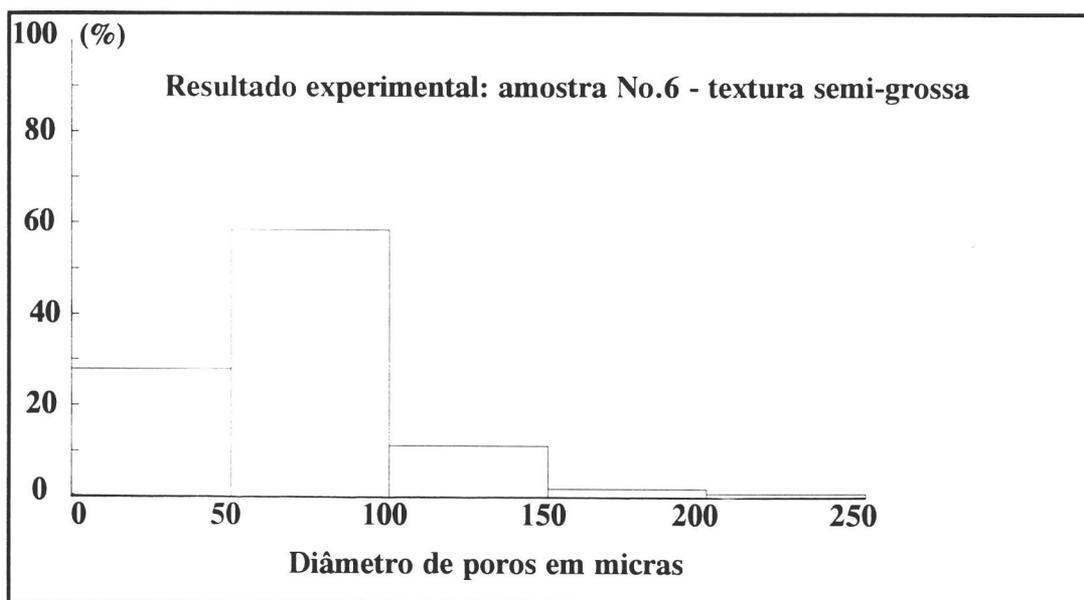


Fig. 6.6. Perfil de poros da amostra No.6 (solo de textura semi-grossa), com tamanhos de grãos de areia de diâmetros compreendidos entre 0.149 mm e 1.00 mm e tamanho médio de poros em diâmetro de 58.8  $\mu\text{m}$ .

### 6.3.- Resultados dos experimentos do fenômeno "fingering", em 2-D

#### 6.3.1.- Coluna de areia de dupla camada (solo estratificado)

Como já descrito no capítulo anterior, foram realizados 5 tipos de experimentos, com cada amostra de solo indicados na tabela 5.1 (No.2 a 6). Todos os experimentos foram realizados nas mesmas condições físicas. O solo arenoso No.1, areia fina, foi usado em todos os experimentos, como sendo a primeira camada colocada na coluna de acrílico ( $100 \times 30 \times 2 \text{cm}^3$ ). Em todos os experimentos, a altura desta camada foi mantida constante, com altura  $h_1 \approx 10 \text{cm}$ . A altura da camada inferior, que chamaremos de camada "grossa", também foi mantida constante, com altura  $h_2 \approx 80 \text{cm}$ . Cada experimento foi repetido 5 vezes, nas mesmas condições experimentais.

Das cinco amostras utilizadas como camada "grossa", em três foi observado o desenvolvimento de "fingers". Nas outras duas, o deslocamento do fluxo manteve-se estável, sem aparecimento de "fingers" ou caminhos preferenciais em todas as repetições realizadas.

As figuras 6.7 a 6.12 mostram os resultados das experiências onde o fenômeno "fingering" foi observado. As imagens digitalizadas representam o desenvolvimento dos "fingers" ao final do experimento (o experimento foi interrompido quando o primeiro "finger" atingiu o fundo da coluna de acrílico), para cada tipo de amostra utilizada. Por exemplo, a Fig. 6.7 representa o desenvolvimento dos "fingers" quando a amostra de solo No.2 (semi-fina) foi empregado. Pode-se apreciar a formação de três "fingers" bastante compactos e largos. Também é notória uma região de transição na interface entre as duas camadas, de aproximadamente 7cm de altura, até onde o fluxo se deslocou em forma uniforme. Depois de superada esta zona de transição, começou o desequilíbrio hidrodinâmico do fluxo, e os "fingers" começaram a se desenvolver. Esta zona de transição, observada também por Hil e Parlange [19] e Glass et al [31] é chamada de zona de indução. A figura 6.8 representa um outro resultado de outro ensaio para a mesma amostra (No. 2). Este ensaio foi repetido em

condições semelhantes ao primeiro. Nesta figura, observa-se o desenvolvimento de dois "fingers" até o final do experimento, sendo que o terceiro juntou-se ao "finger" da esquerda quase na metade do percurso. Estes "fingers" são semelhantes aos do primeiro ensaio (Fig.6.7), sendo um tanto compactos e largos, mas desta vez, a zona de indução é menos notória do que a anterior. Neste experimento, foi colocado um papel de filtro na interface entre as duas camadas, de forma a evitar que partículas pequenas procedentes da camada fina penetrassem na segunda camada, procedimento que não foi feito no primeiro experimento. Assim, as partículas pequenas existentes abaixo da interface da camada fina (que bloquearam os poros grandes da camada grossa) seria um dos fatores para a formação da zona de indução.

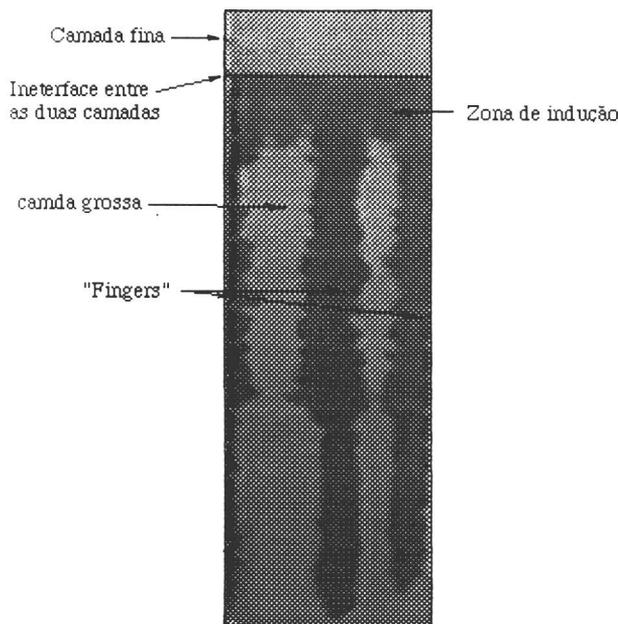


Fig. 6.7. Imagem digitalizada sem pré-processamento. Esta figura representa a formação dos "fingers" para amostra de solo arenoso No. 2 (areia semi-fina). Três "fingers" podem ser observados (em cinza escuro) como sendo bastante compactos e largos. Observa-se também a zona de indução. A camada fina refere-se ao solo arenoso de textura fina e a camda grossa ao solo arenoso de textura grossa.

Nos outros ensaios repetidos com este mesmo solo, os resultados mostraram semelhança com os que estão sendo apresentados (Figs. 6.7 e 6.8). Em média apareceram três "fingers" com características geométricas semelhantes, como resumidas na tabela 6.2. Sempre que foi colocado o papel de filtro na interface entre as duas camadas, a zona de indução era reduzida; caso contrário, esta zona ficou ampliada.

Embora os "fingers" desenvolvidos tivessem características geométricas semelhantes, suas localizações espaciais eram aleatórias em cada experimento repetido, como mostram as figuras 6.7 e 6.8. Na figura 6.7, dois "fingers" se deslocaram pelas bordas da coluna e um pelo meio, enquanto que na Fig. 6.8, os dois "fingers" que chegaram ao fundo da coluna deslocaram-se pelo meio. O tempo que demorou o "finger" mais rápido para atingir o fundo da caixa foi de aproximadamente 15 minutos, em média. Este tempo é semelhante, ao tempo que levaria o fluxo em percorrer a mesma altura, em condições de saturação, como será abordado mais adiante.

A figura 6.9 apresenta o desenvolvimento dos "fingers" para a amostra de solo No. 4 (amostra semi-grossa). Nesta figura, pode-se observar a geração de 6 "fingers" bastante delgados com diâmetros aproximadamente constante. Também pode ser observada a ausência da zona de indução neste experimento, começando o desenvolvimento dos "fingers" imediatamente na interface entre as duas camadas, embora tenha sido observado um tempo de parada da ordem de alguns segundos, do fluxo na interface, antes de penetrar na segunda camada.

O tempo que demorou o "finger" mais rápido em atingir o fundo da caixa foi de aproximadamente 7 minutos, bem mais rápido que no experimento com a amostra No. 2 (Figs. 6.7 e 6.8). Este tempo é comparável ao tempo que levaria o fluxo em percorrer a mesma altura em condições saturadas.

A figura 6.10 representa uma variante nos resultados deste mesmo solo, experiência realizada nas mesmas condições que o da Fig. 6.9. Só que desta vez, não foi colocado o papel de filtro na interface entre as duas camadas. Podemos observar a aparição de uma pequena zona de indução, quase não perceptível. O número de "fingers" desenvolvido nesta oportunidade foi de 5, com características geométricas semelhantes às da figura 6.9. Também é observado o caráter estocástico da formação dos "fingers", pois espacialmente estão localizados em regiões diferentes ao mostrado na figura 6.9. Nos outros ensaios repetidos com esta amostra, a característica morfológica dos "fingers" foi semelhante, aparecendo em média 6 "fingers".

A figura No. 6.11 apresenta o desenvolvimento dos "fingers" para a amostra No. 5 (solo de textura grossa). Podemos observar 5 "fingers" bem definidos, com características semelhantes a aquelas das Figs. 6.9 e 6.10, embora a largura (diâmetro) destes "fingers" seja um pouco menor. Pode-se observar também uma pequena zona de indução e uma certa tortuosidade no percurso dos "fingers". Isto é, uma consequência da existência de regiões não homogêneas, surgidas no processo de preenchimento da camada grossa. Com estas amostras de solo, de textura grossa, foi difícil perceber o aparecimento de regiões não homogêneas durante o preenchimento, justamente devido ao tamanho das partículas ser grande.

A figura No. 6.12 mostra o resultado para um outro ensaio desta mesma amostra. O número de "fingers" desenvolvido é a mesma (5 "fingers") e com características geométricas semelhantes. Nesta figura, também é observada uma pequena zona de indução e o percurso dos "fingers" é menos tortuoso do que a da Fig. 6.11. O tempo que o "finger" mais rápido demorou em atingir o fundo da coluna de acrílico, foi em média, de 4.30 min., tempo semelhante, que levaria o fluxo, em percorrer a mesma altura, se o solo estivesse saturado. Nas outras experiências repetidas, nas mesmas condições, os resultados foram semelhantes, aparecendo em média 6 "fingers" com características geométricas parecidas.

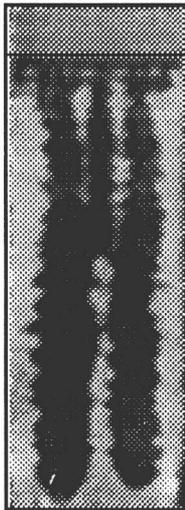


Fig. 6.8. Esta imagem representa o segundo ensaio para a mesma amostra No.2. Pode-se observar dois "fingers" bastante largos e compactos, semelhantes as do primeiro ensaio, só que desta vez o terceiro "finger", o do meio, se juntou com o "finger" da esquerda na metade do seu percurso.

Em todas as experiências, verificou-se que os "fingers" uma vez gerados, suas velocidades de deslocamento iam aumentando, a partir da interface entre as duas camadas, até atingir uma velocidade máxima. Logo após, as suas velocidades de deslocamento mantinham-se constantes. Tal velocidade máxima, para todas as amostras, mostrou-se ser a mesma que a velocidade do fluxo em condições de saturação.

Nas experiências com as amostras de solo No. 4 e No. 5 (solo semi-grosso e grosso), observou-se também que a geração de cada "finger" é independente uma da outra. Isto é, um "finger" pode aparecer, no instante que o outro já atingiu o fundo da coluna. No entanto, uma vez gerados todos os "fingers", estes permanecem fixos, definindo, assim, os caminhos preferenciais para o fluxo de água. Nesta situação, mudando as condições iniciais, por exemplo, aumentando a pressão da entrada do fluxo de água na superfície ou tornando-a intermitente (fechando e abrindo a torneira), observa-se que o padrão dos "fingers", gerados

inicialmente, mantem-se constante. Desta forma, os "fingers" gerados, tem o papel de "by-pass" ou de curtocircuitar o processo de infiltração da água no solo..

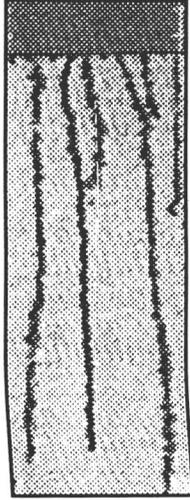


Fig. 6.9. Imagem digitalizada mostrando o desenvolvimento dos "fingers" para a amostra de solo No. 4. O desenvolvimento de 6 "fingers" de larguras quase constantes e delgadas pode ser observado.

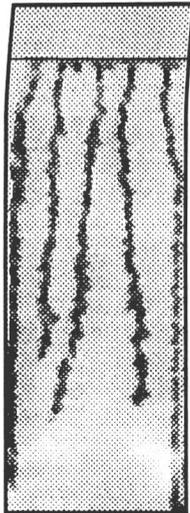


Fig. 6.10. Desenvolvimento dos "fingers" para um outro ensaio da amostra No. 4. Os "fingers" têm características geométricas semelhantes às da Fig. 6.9, mas eles aparecem em regiões diferentes mostrando o carácter estocástico do fenómeno.

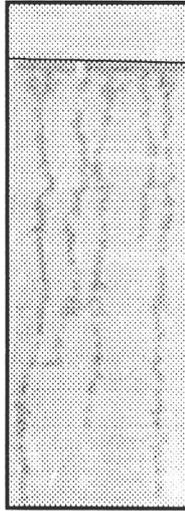


Fig. 6.11. Imagem digitalizada da amostra de solo No.5 (areia grossa). Cinco "fingers" desenvolvidos ao longo da coluna, de larguras ligeiramente menores que os apresentados nas Figs. 6.9 e 6.10 podem ser vistos. Também, nota-se o aparecimento de um sexto "finger", mas que se juntou ao "finger" do meio logo no início do experimento.

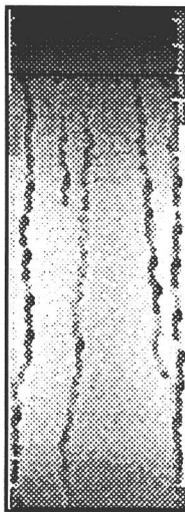


Fig. 6.12. Esta figura representa o desenvolvimento dos "fingers" para um outro ensaio da amostra de solo No. 5. Observamos 5 "fingers" delgados, com características geométricas semelhantes aquelas da Fig. 6.11.

Uma coluna de solo permaneceu durante 24 horas ao ar livre, com a finalidade de se estudar o comportamento dos "fingers", nas etapas de redistribuição do fluido (reproduzindo uma situação após desligamento do sistema de irrigação). Logo após foi realizado a mesma experiência descrita anteriormente (Fig. 6.12). O resultado apresentado na figura 6.13 indica que o caminho seguido pelo líquido foi o mesmo "traçado" no experimento inicial (Fig.6.12), só que, desta vez, foi observado um "finger" a mais. Contudo, este "finger" extra foi gerado depois de cortada a alimentação do líquido na superfície do solo. Isto significa que os "fingers" também podem aparecer nos processos de redistribuição do líquido no solo.

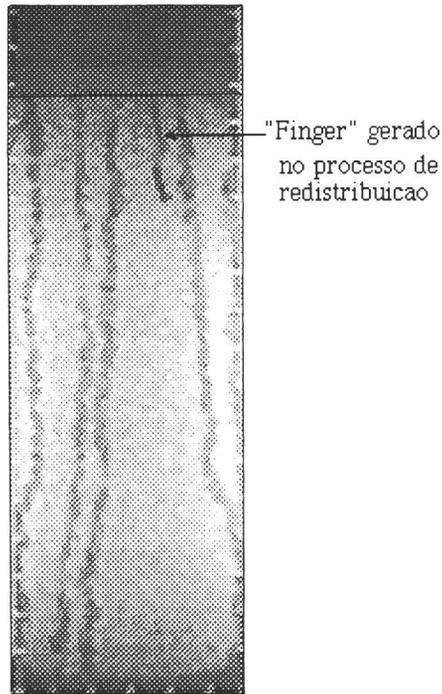


Fig. 6.13. Esta imagem representa o "congelamento" dos caminhos preferenciais, após "abertos" no experimento inicial (Fig. 6.12). Este experimento foi repetido, depois de 24 horas da realização do o experimento inicial (Fig. 6.12). Os "fingers" inicialmente gerados permanecem constantes e aqueles que estavam pela metade do percurso, atingiram o fundo da coluna. Mostra-se também o "fingering" gerado no processo de redistribuição do líquido.

Na tabela 6.2 está apresentado o resumo das características dos "fingers" gerado no laboratório, para cada tipo de amostra, onde o fenômeno foi observado. Nesta tabela, pode-se observar, por exemplo, o número de "fingers", as suas larguras e a velocidade do "finger" que mais rápido, atingiu antes que os demais o fundo da coluna. Para efeitos de comparação, também foi considerada nesta tabela a velocidade do fluxo em condições de saturação. Esta velocidade foi calculada, usando as relações (2.6) e (2.13), considerando os valores da condutividade hidráulica  $K$  e a porosidade  $\Phi$  da tabela 6.1, para cada tipo de solo. A velocidade dos "fingers" foi calculado medindo-se o espaço percorrido pelo fluxo em cada unidade de tempo (em minutos), através da coluna de solo.

*Tabela 6.2.: Resultados de algumas características morfológicas e físicas dos "fingers", nos experimentos de dupla camada, em 2-D*

Número da amostra	Descrição da amostra	Número de "fingers" observados	Largura média dos "fingers" (cm)	Velocidade média máxima do "finger" (cm/min)	Velocidade do fluxo em saturação (cm/min)
2	areia semi-fina	$2.0 \pm 1.0$	$6.80 \pm 2.5$	$05.8 \pm 0.6$	$05.0 \pm 0.5$
4	areia semi-grossa	$6.0 \pm 1.0$	$2.00 \pm 0.5$	$15.6 \pm 1.5$	$16.0 \pm 2.5$
5	areia grossa	$6.0 \pm 1.0$	$1.50 \pm 0.3$	$18.0 \pm 2.0$	$20.0 \pm 3.0$

### *A) Caracterização dos "fingers", através das técnicas de processamento de imagens e do cálculo de sua dimensão fractal D*

Como já foi discutido no capítulo V, os "fingers" gerados no laboratório, foram filmados durante seu desenvolvimento, através de uma câmera de vídeo e em seguida digitalizadas e processadas. Para o processamento destas imagens foram empregados "softwares" dedicados para este fim, como o KHOROS [163], instalado em uma estação de trabalho tipo SUN do IFQSC-USP e a Silicon Graphics do CNPDIA. O processamento de cada resultado experimental digitalizado e transformado em imagem, foi realizado seguindo a dinâmica dos "fingers" através da coluina de solo e correlacionando o desenvolvimento final dos "fingers" com o tipo de solo. Após este processamento, e convertidas em imagens binárias de duas cores preto e branco, estas imagens foram caracterizadas pelo cálculo de sua dimensão fractal D. Esta caracterização foi realizada seguindo a dinâmica dos "fingers" e o tipo de solo utilizado em cada experimento. Para o cálculo de sua dimensão fractal D, foi utilizado o método de "box-counting" e "sand-box", descritos no capítulo III.

Na interpretação dos resultados, levando-se em consideração a dimensão fractal D de cada estrutura, caracterizada através do tempo ou para cada tipo de solo, será necessário chamar a atenção que D não responde a uma estrutura estatisticamente autosimilar, mas sim a uma estrutura *estatisticamente auto-afim*, como descrito no capítulo III. Isto ocorre devido a que o deslocamento dos "fingers" segue uma direção privilegiada, a da gravidade, gerando estruturas com características de "auto-afinidade" (anisotrópicas) e não de "auto-similaridade" (isotrópicas), onde D é a dimensão fractal local (ver capítulo III, item 3.2.2).

A seguir, serão apresentados alguns resultados das estruturas dos "fingers" processados adequadamente, seguindo sua dinâmica espacial e o tipo de solo utilizado. Também apresentaremos sua característica fractal, do "bulk"  $D_b$  (vamos chamar de "bulk" área ocupada pelos "fingers" ) e do perfil  $D_p$  (vamos chamar de perfil, frente de deslocamento dos "fingers").

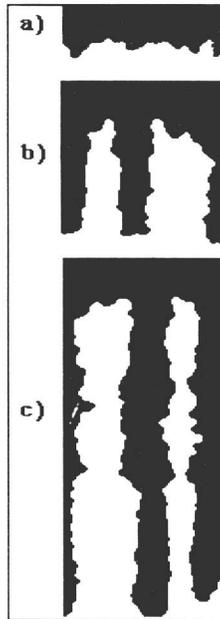


Fig. 6.14. Imagem processada do desenvolvimento dos "fingers" para o solo No. 2 (semi-fino), para três instantes diferentes de tempo e alturas do percurso. *a)* Início da instabilidade, tempo  $t = 2.15$  min.,  $h_{\max.} = 7.40$  cm e  $D_p \approx 1.09$ ; *b)* tempo  $t = 6$  min.,  $h_{\max.} = 29$  cm e  $D_p \approx 1.15$ ; *c)* tempo  $t = 14.6$  min. (final do experimento),  $h_{\max.} = 80$  cm e  $D_p \approx 1.34$ . Como pode ser observada desta sequência de imagens, a estrutura dos "fingers" não tem característica fractal, pois o mesmo é compacto. No entanto, a superfície ou perfil das estruturas apresenta uma "auto-similaridade estatística" (estritamente falando, estas superfícies são "estatisticamente auto-afins").

Na tabela 6.3, está sendo apresentado o acompanhamento da frente do deslocamento dos "fingers" (perfil de deslocamento), como função de sua dimensão fractal  $D_p$ . Esta dinâmica da frente é caracterizada para vários instantes de tempo e alturas correspondentes, seguindo o deslocamento da frente, ao longo da coluna de solo. A altura máxima ( $h_{\max.}$ ) é definida como a altura alcançada pelo "finger" mais rápido em um determinado instante. A estrutura morfológica destes "fingers" ( a área de ocupação dos "fingers" ), são bastante

compacta como para ser considerada do tipo fractal. Estas estruturas são muito parecidas com os "fingers" gerados nas celas de Hele-Shaw [88], de estruturas não fractais.

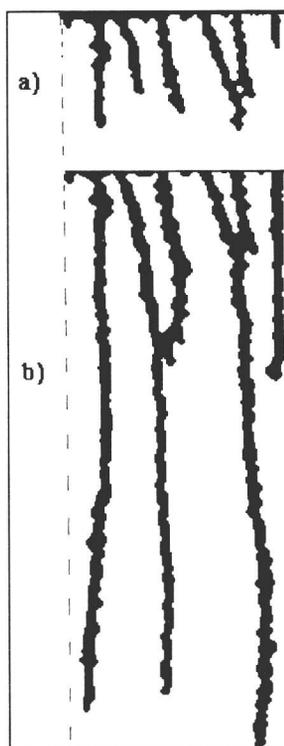


Fig. 6.15. Imagem digitalizada e processada, mostrando dois instantes do desenvolvimento dos "fingers" para a amostra de solo No. 4 (semi-grosso). *a)* Estrutura dos "fingers" para  $t = 2.0$  min,  $h_{\max.} = 17.3$  cm,  $D_b \approx 1.42$  e  $D_p \approx 1.30$ . *b)* Estrutura para o instante final,  $t = 6.0$  min,  $h_{\max.} = 80$  cm,  $D_b \approx 1.48$  e  $D_p \approx 1.39$ .

Na tabela 6.4 mostra os resultados da caracterização, através de sua dimensão fractal, das outras estruturas ("fingers") gerados (amostra de solo No. 4 e 5). Pode-se observar que as estruturas dos "fingers", correspondentes às amostras No. 4 e 5 representam estruturas fractais, com dimensão fractal para o "bulk"  $D_b$  de 1.49 e 1.45, respectivamente. Também são apresentadas as dimensões fractais dos perfis  $D_p$  e a porcentagem de ocupação. Esta porcentagem de ocupação refere-se ao valor da área ocupada pelos "fingers" dentro da coluna

de solo, considerada a partir da interface entre as duas camadas. Este parâmetro será o indicador para os efeitos de simulação dos "fingers", como será abordado na seção seguinte.

*Tabela 6.3. Acompanhamento da frente de deslocamento dos "fingers" (perfil de deslocamento) através de sua dimensão fractal, para a amostra No.2 (solo de textura semi-fina)*

Tempo (min)	Altura máxima : $h_{\max}$ (cm)	Dimensão fractal do perfil: $D_p$
2.15	7.40	1.09
4.46	21.00	1.11
6.08	29.00	1.15
7.40	38.60	1.17
9.70	46.70	1.20
12.20	58.00	1.25
13.80	68.00	1.30
14.60	80.00	1.34

*Tabela 6.4. Caracterização dos "fingers" através de sua dimensão fractal para cada tipo de solo, onde o fenômeno foi observado*

Amostra de solo (No.)	Dimensão fractal do "bulk": $D_b$	Dimensão fractal do perfil : $D_p$	Porcentagem de ocupação (%)
2	-----	$1.34 \pm 0.03$	$53 \pm 5$
4	$1.49 \pm 0.03$	$1.40 \pm 0.04$	$20 \pm 3$
5	$1.45 \pm 0.03$	$1.42 \pm 0.04$	$15 \pm 3$

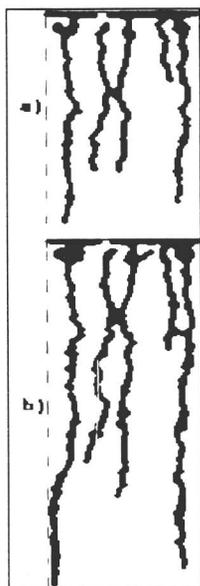


Fig. 6.16. Dois instantes do desenvolvimento dos fingers para a amostra de solo No.5 (solo de textura grossa). *a)* Estrutura para o tempo  $t \approx 3.0$  min,  $h_{\max.} = 48.8$  cm,  $D_b \approx 1.43$  e  $D_p \approx 1.30$ . *b)* Estrutura para o instante final de tempo,  $t = 4.4$  min,  $h_{\max.} = 80$  cm,  $D_b \approx 1.45$  e  $D_p \approx 1.40$ .

Assim, a característica fractal dos "fingers", sob as mesmas condições iniciais, está relacionada com a granulometria do solo ou perfil de distribuição dos poros. Este assunto será abordado com mais detalhes no final deste capítulo.

### ***B) Simulação do fenômeno "fingering" em 2-D***

Como mencionado no capítulo anterior (seção 5.2.1, item b), foi modificado o algoritmo inicial do programa de percolação por invasão, de forma a seguir a morfologia dos "fingers", nos diferentes tipos de solo, onde o fenômeno foi observado. Assim, com a introdução dos parâmetros F1, F2, F3, F4, F5 e F6, no algoritmo de percolação por invasão, escrito em linguagem FORTRAN, o programa foi rodado utilizando o computador VAX do IFQSC e a estação de trabalho Silicon Graphics do CNPDIA.

### B1) Simulação da dinâmica dos "fingers" através de sua dimensão fractal

A simulação foi realizada primeiro seguindo a dinâmica dos "fingers", caracterizada através de sua dimensão fractal  $D_p$ . Para tal, foi utilizada a amostra No.2, cuja dimensão fractal do perfil da frente de molhamento como função de sua altura, está apresentada na tabela 6.3.

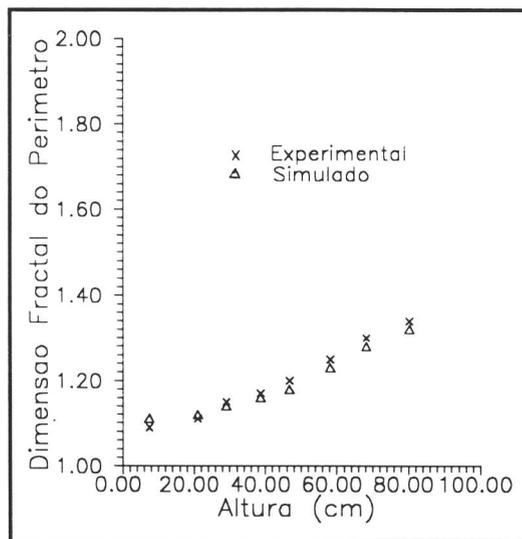


Fig.6.17 Curva representando os resultados experimentais (x) e de simulação ( $\Delta$ ), da frente de deslocamento dos "fingers", usando a dimensão fractal perimetral ( $D_p$ ) em função da altura ( $h_{m\acute{a}x.}$ ), como parâmetro característico da evolução espaço-temporal do fenômeno "fingering" capilar. Conforme Pode ser observado as duas curvas apresentam comportamento similar mostrando que a simulação foi capaz de reproduzir relativamente bem os resultados experimentais.

A execução da simulação foi realizada usando redes retangulares proporcionais coluna de acrílico usada no experimento. Tais redes retangulares foram divididas em alturas proporcionais aquelas do experimento (tabela 6.3). Assim, o programa fornecia, em cada rede

usada e para cada altura, o número de sítios perimetrais, equivalentes ao perfil do fluxo no experimento. Com estes dados e usando a relação (3.4), foi calculada a dimensão fractal  $D_p$  para cada perfil considerada na simulação. Desta forma, para determinados valores dos parâmetros "F's", onde utilizando somente os parâmetros F1, F2, F3 e F4, foi acompanhado a dinâmica dos "fingers", como apresentado na figura 6.17 [164].

*Tabela 6.6: Valores dos parâmetros "F's", introduzidos no algoritmo de simulação de percolação por invasão, para acompanhar a morfologia dos "fingers" no solo.*

Amostra de solo (No)	F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	0.5	0.05	0.6	0.001	0.40	0.009
2	0.5	0.18	0.6	0.001	0.25	0.000475
4	0.05	0.02	0.6	0.001	0.13	0.00003
5	0.03	0.05	0.6	0.001	0.13	0.00002

### *B2) Simulação dos "fingers", através de sua característica morfológica*

Devido a que as estruturas fractais, mesmo tendo a mesma dimensão fractal podem possuir diferentes características morfológicas, foi dado um outro enfoque para a simulação. Considerando a densidade de ocupação dos "fingers" na coluna de acrílico (área dos "fingers"/área total da coluna), como mostrados na tabela 6.4, foi acompanhado a morfologia dos "fingers", através da simulação, para cada tipo de solo. O ajuste da densidade de ocupação, na simulação, foi feito através dos parâmetros "F's". Para cada tipo de solo, os parâmetros "F's"

foram ajustados, seguindo o valor de ocupação em porcentagem e a morfologia dos "fingers", fornecidos pelo experimento.

*Tabela 6.7: Dimensão fractal e porcentagem de ocupação das estruturas dos "fingers" gerados através do programa de simulação.*

Amostra de solo (No.)	Dimensão fractal do "bulk": $D_b$	Dimensão fractal do perfil: $D_p$	Número de "fingers" observados	Porcentagem de ocupação (%)
1	----	----	----	100.00
2	----	$1.30 \pm 0.03$	$2 \pm 1$	$54 \pm 2$
4	$1.50 \pm 0.03$	$1.40 \pm 0.03$	$6 \pm 1$	$22 \pm 0.7$
5	$1.41 \pm 0.03$	$1.43 \pm 0.03$	$5 \pm 1$	$14 \pm 0.6$



Fig. 6.18. Imagem digitalizada e processada. Esta figura, corresponde a evolução dos "fingers" para a amostra de solo No. 2 (areia semi-fina). Claramente, podem ser observados três "fingers" bem definidos e compactos.

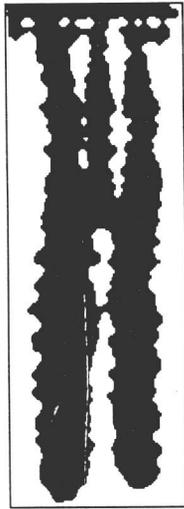


Fig. 6.19. Outro ensaio, para a amostra de solo No. 2, sob as mesmas condições experimentais da Fig.6.18. Dois "fingers", podem ser observados, bastante compactos, que atingiram o fundo da caixa, enquanto que o terceiro, juntou-se a um deles quase na metade do percurso.

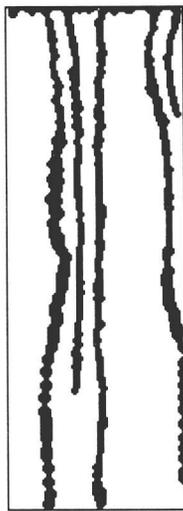


Fig. 6.20. Desenvolvimento dos "fingers" para a amostra de solo No. 4 (areia semi-grossa). Observa-se 4 "fingers" bem definidos e um que ficou paralizado no começo.

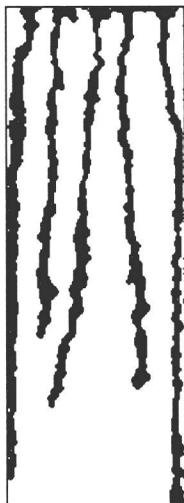


Fig. 6.21. Outro ensaio, com a amostra No. 4. Nesta oportunidade, 5 "fingers" foram desenvolvidos.



Fig. 6.22. Desenvolvimento dos "fingers" para a amostra de solo No. 5 (areia grossa). Podem ser observados 6 "fingers" delgados, 4 bem desenvolvidos e 2 que se juntaram aos outros.

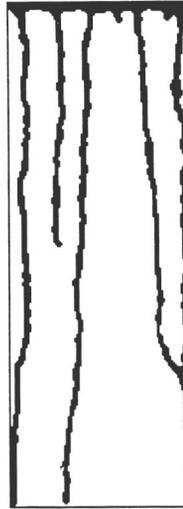


Fig. 6.23. Outro ensaio para a amostra de solo No. 5. Desta vez, formaram-se 5 "fingers" bem definidos.



Fig. 6.24. Cluster típico da simulação realizada através do programa de percolação por invasão modificada. Esta simulação representa o desenvolvimento dos "fingers" para a amostra de solo No. 2 ( areia de textura semi-fina). Esta simulação foi conseguida com os parâmetros  $F1=0.5$ ,  $F2=0.18$ ,  $F3=0.6$ ,  $F4=0.001$ ,  $F5=0.25$  e  $F6=0.000475$ . A rede usada foi retangular de 320 colunas por 800 linhas (proporcional coluna de solo do experimento). Pode-se observar o desenvolvimento de três "fingers" semelhantes aqueles da Fig. 6.18.



Fig. 6.25. Cluster típico da simulação representando o desenvolvimento dos "fingers" na amostra de solo No. 4 (areia de textura semi-grossa). Os parâmetros "F's" usados foram:  $F1=0.05$ ,  $F2=0.02$ ;  $F3=0.6$ ,  $F4=0.001$ ;  $F5=0.13$  e  $F6=0.00003$ , usando uma rede retangular de  $800 \times 320$ .



Fig. 6.26. Cluster típico da simulação correspondente amostra de solo No. 5 ( areia de textura grossa). Os parâmetros "F's" utilizados nesta simulação foram:  $F1=0.03$ ;  $F2=0.05$ ;  $F3=0.06$ ;  $F4=0.001$ ;  $F5=0.13$  e  $F6=0.00002$ , para a rede retangular de  $800 \times 320$ .

Para todas as simulações realizadas, foi usada a mesma rede rectangular de 800 linhas por 320 colunas, proporcional coluna de acrílico utilizada no experimento. Assim, o número total de sítios na rede de simulação foi de 256.000, representando cada um destes sítios um poro, cujo número randômico equivale ao tamanho do diâmetro do poro experimental. Para cada simulação, foram realizados 10 ensaios, resultando em um desvio estatístico de menos de um por cento.

Os resultados destas simulações estão apresentadas nas figuras 6.24 a 6.26, para cada tipo de solo e os parâmetros "F's" utilizados. Nestas figuras, pode-se observar claramente uma estreita aproximação entre os "fingers" simulados e aqueles obtidos experimentalmente (figuras 6.18 a 6.23). Os "fingers" simulados apresentam características físicas e morfológicas similares as dos "fingers" experimentais. Por exemplo, pode-se observar nas figuras 6.18 a 6.23 e 6.24 a 6.26, uma correlação entre o número de "fingers" e a largura deles. Tanto o resultado experimental como a simulação apresentam "fingers" similares em número e estruturas morfológicas.

Na tabela 6.7, estão resumidos os parâmetros físicos que caracterizam os "fingers" gerados através do programa de simulação. Estes resultados, comparados com aqueles da tabela 6.4 e 6.3, obtidos experimentalmente, estão muito próximos e dentro da faixa de erros considerada.

### **B3) Valores dos parâmetros "F's" introduzidos na simulação**

Antes de entrar na discussão dos valores dos parâmetros "F's", é oportuno recordar que estes parâmetros foram definidos de forma a tomar valores compreendidos entre 0 e 1 ("F's"  $\in$  [0, 1]). Quanto menor for o valor assumido por um deles (próximo de zero), tanto maior será sua participação no processo de simulação.

Na tabela 6.6 estão apresentados os valores dos parâmetros "F's", introduzidos no algoritmo de percolação por invasão, que acompanharam a estrutura morfológica dos "fingers", para os três tipos de solos, onde o fenômeno foi observado. O solo No.1, onde o fluxo se deslocou de forma uniforme e estável, foi considerado, nesta tabela, como referência que será discutido na secção seguinte. Para este solo, a simulação, com os parâmetros citados, gerou uma estrutura compacta, ocupando a rede toda (100% de ocupação), como indicado na tabela 6.7.

Observando esta tabela e comparando os parâmetros "F's" utilizados para a simulação dos "fingers", nas três amostras de solo, Nos.2, 4 e 5, podemos ver que, por exemplo, os valores para os parâmetros F4 (que simula a pressão hidráulica) e F3 ("evaporador de bolhas"), para as três amostras se mantiveram constantes. Desde que todos os experimentos foram realizados nas mesmas condições físicas, e a pressão hidráulica, externamente aplicada, sempre foi a mesma, foi necessário manter o parâmetro F4, como constante para todas as situações de simulação. O parâmetro F3 (um dos "evaporadores de bolhas", que tornam a estrutura mais compacta), mostrou-se ter uma mínima participação no processo de formação dos "fingers". Desta forma, mantendo este parâmetro como constante, evitávamos investimento de tempo no processo de simulação.

Os parâmetros F5 ( que simula uma invasão múltipla) e F6 ( chamado de tempo de espera), atuam de modo combinado. Para o solo No.2 (textura semi-fina), da tabela 6.6,  $F5 = 0.25$  e  $F6 = 0.000475$ . A combinação destes valores foram os responsáveis para a compactação das primeiras camadas observadas na simulação, Fig. 6.24 (semelhante zona de indução observada no experimento). Aumentando os valores destes parâmetros, resultaram estruturas bem mais compactas, como aquela da amostra No.1, onde usando o valor de  $F5 = 0.40$  e  $F6 = 0.009$ , conseguiu-se obter uma estrutura totalmente compacta, semelhante ao resultado observado experimentalmente, para este tipo de solo.

Pelo contrário, se F5 e F6 assumem valores menores, a compactação será menor nas primeiras camadas, chegando a desaparecer esta compactação inicial para certos valores de F6. Este efeito é observado na simulação com amostras No.4 (textura semi-grossa), quando  $F5 = 0.13$  e  $F6 = 0.00003$ , e de forma similar com a amostra No.5 (textura grossa), quando  $F5 = 0.13$  e  $F6 = 0.00002$ . Assim, a combinação destes dois parâmetros atuam como simuladores da granulometria da amostra em questão. Para amostras de textura fina, F5 e F6 assumiriam valores maiores que para amostras de textura grossa.

O parâmetro F2 ("evaporador de bolhas") não tem um comportamento que defina o tipo de solo atuante. Este parâmetro, segundo a tabela 6.6, apresenta valores um tanto aleatórios. Contudo, o efeito que este parâmetro representa na simulação é determinante para a compactação dos "fingers".

Finalmente, o parâmetro F1 ("sintonizador da gravidade"), assume valores segundo o tipo de solo, como mostrado na tabela 6.6. Os valores assumidos por F1 diminuem segundo a textura do solo, variando de 0.5 para o solo de textura semi-fina a 0.03 para o solo de textura grossa. Foi observado também durante o processo de simulação, que quanto menor o valor assumido por F1 maior o número de "fingers" e a invasão atinge o fundo da rede com maior rapidez. Este comportamento é semelhante velocidade adquirida pelos "fingers", nos solos de textura grossa.

#### **B4) Perfil de distribuição de poros obtido através da simulação**

O programa de simulação de percolação por invasão assume poros (sítios com valores randômicos) distribuídos uniformemente em toda a rede. Com a introdução dos parâmetros "F's", esta distribuição é mudada, sendo que ao final da simulação, toda vez que a morfologia dos "fingers" é ajustada, a distribuição de poros (sítios) atualizada pelos "F's" deverá ser semelhante aquelas obtidas experimentalmente.

Para checar esta hipótese e obter o perfil de poros ao final da simulação, depois de feito o ajuste morfológico dos "fingers" para cada tipo de solo simulado, o programa de simulação foi modificado, de forma a continuar rodando até invadir totalmente a rede. Desta forma, o programa seria capaz de fazer uma curva do perfil de distribuição destes poros, para cada tipo de solo.

Os resultados destas simulações estão apresentados nas figuras 6.27 a 6.30, onde é possível observar, pelo menos para o caso da amostra No.2, uma correlação idêntica entre o perfil experimental e o simulado. Nas outras amostras, esta correlação não alcançou o mesmo sucesso, da mesma maneira que as medidas experimentais também não atingiram a alta confiabilidade esperada o que será discutido, em seguida.

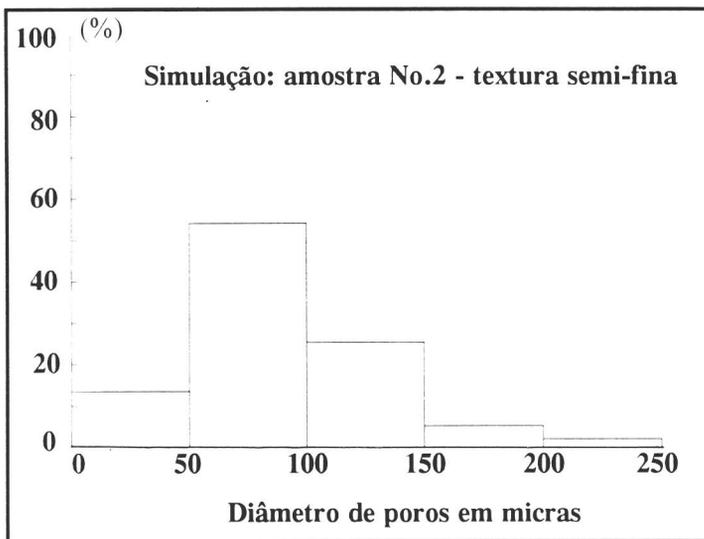


Fig. 6.27. Perfil de poros para a amostra No.2, obtido com o programa de simulação. Pode-se deduzir claramente a partir desta curva que o comportamento da distribuição de poros é idêntico ao apresentado na figura 6.2, obtida experimentalmente. Desta forma, o programa de simulação também foi capaz de reproduzir o perfil de distribuição de poros experimentalmente.

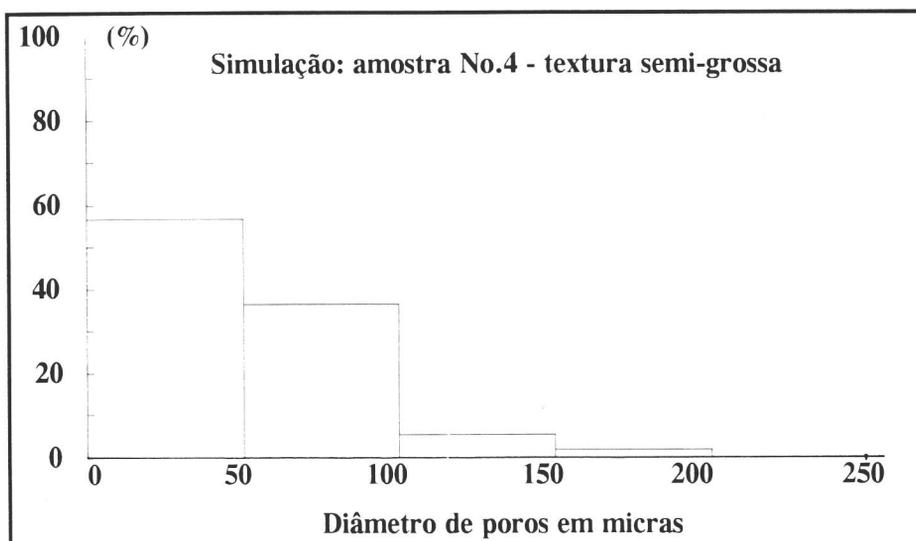


Fig.6.28. Perfil de distribuição de poros para a amostra No. 4, fornecido pelo programa de simulação. Esta distribuição está um tanto deslocada para a esquerda, comparada com a distribuição experimental da figura 6.4.

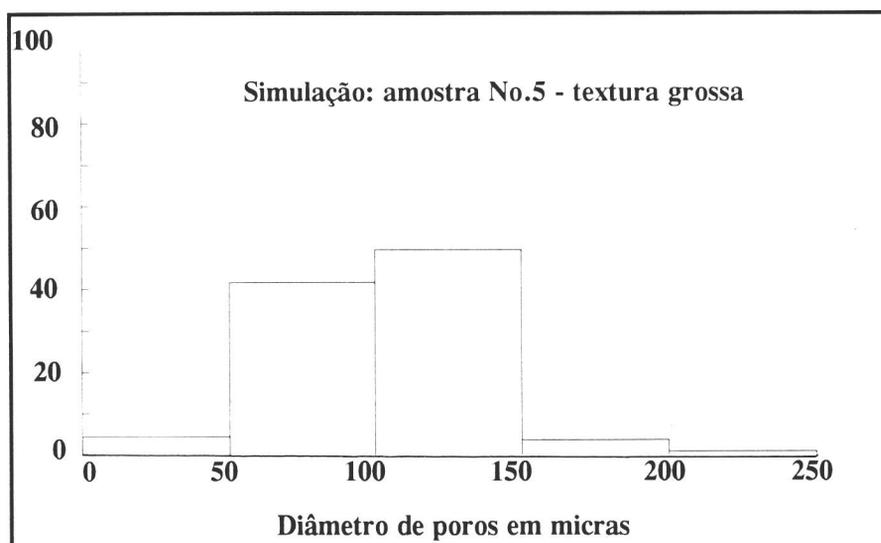


Fig. 6.29. Perfil de distribuição de poros obtido com o algoritmo de simulação, para amostra No.5. Este perfil concentra a maioria dos poros na faixa de 50 e 150  $\mu\text{m}$ , enquanto que o perfil experimental, mostrado na Fig.6.5, mantém uma concentração quase que constante na faixa de 0.00 a 250  $\mu\text{m}$ .

Os resultados da distribuição do perfil de poros, obtidos através do programa de simulação, como apresentados nas figuras 6.27 a 6.30, indicam comportamentos "semelhantes" aqueles obtidos experimentalmente com o porosímetro de mercúrio. A figura 5.21, simulação do perfil de distribuição de poros para a amostra No.2, é a que melhor acompanha o resultado experimental através de toda a faixa de 0.00 a 250  $\mu\text{m}$  de poros detetados, considerando dentro da margem dos erros experimentais. Estes erros, difíceis de serem avaliados, advêm basicamente das hipóteses teóricas assumidas para as medidas experimentais, usando o porosímetro de mercúrio. Por exemplo, a consideração da forma cilíndrica dos poros, o ângulo de contato líquido-sólido, o valor da tensão superficial e outros, como já discutido na seção (5.1.4 do capítulo V). •

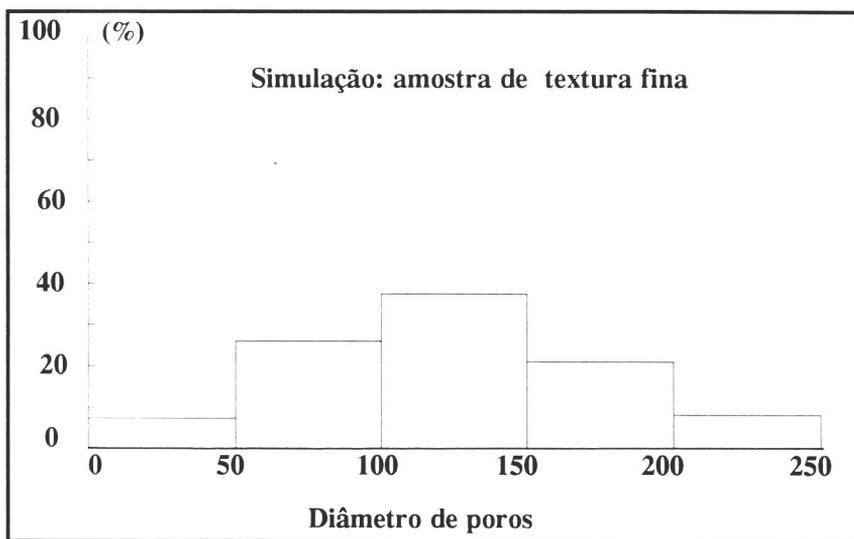


Fig. 6.30. Perfil de distribuição de poros, obtido através do programa de simulação para uma amostra de solo de textura fina (sem a geração de "fingers"). Este perfil foi obtido em uma situação onde a estrutura gerada pela simulação era totalmente compacta. Semelhante aquelas de areia fina, onde o fluxo se deslocou de forma uniforme. Podemos observar que o perfil desta distribuição mantém uma certa simetria, semelhante a da areia fina, embora a faixa de poros seja bem mais larga. Contudo, este resultado pode indicar que distribuições de poros com perfil simétrico, diminuiriam a possibilidade de aparição de "fingers".

Um outro problema que cabe destacar, na obtenção dos resultados experimentais com o porosímetro de mercúrio, resulta, da própria metodologia empregada para a medida da distribuição de poros em amostras de pó, como é o caso das amostras de areia utilizadas. Neste tipo de amostras, além dos problemas de empacotamento gerados ao colocar as amostras na cápsula de ensaio do porosímetro de mercúrio, aparecem os problemas de variação do arranjo geométrico no processo de medida. Sobretudo, a altas pressões (medida de poros pequenos), onde o rompimento dos poros inicialmente formados é de ocorrência altamente provável. A existência de substâncias "contaminantes" nos microporos também acrescentam erros de medida. No caso particular deste trabalho, a presença de poros grandes (macroporos), próximos do limite do aparelho ( $300\ \mu\text{m}$ ), também foi um outro problema. Esta parte da medida foi realizada manualmente, com passos grandes, de aproximadamente  $50\ \mu\text{m}$ , comparados como os passos de  $0.1\ \mu\text{m}$  utilizados automaticamente pelo sistema na medida dos microporos.

Por outro lado, o mesmo aparelho apresenta um parâmetro indicador, que reflete o grau de confiança da medida obtida. Este parâmetro está expresso em porcentagem, sendo que para medidas com valores acima de 25%, os resultados são considerados bons e abaixo desta porcentagem, os resultados não são muito confiáveis.

Como está sendo apresentado no apêndice, para os resultados das 6 amostras medidas com o porosímetro de mercúrio, este indicador supera 25% para as amostras No.1, No.2, No.3 e No.6. No entanto, para as amostras No.4 e No.5, o indicador apresenta valores bem abaixo de 25%. Isto significaria que as distribuições de perfil de poros, apresentadas nas figuras 6.4 e 6.5 (Figs. A4 e A5 do apêndice), não são muito confiáveis. Justamente para estas amostras onde o "fingering" foi observado, o perfil de distribuição de poros fornecido pelo algoritmo de simulação apresenta maior diferença quando comparado com o experimental. No entanto, para a amostra No.2, onde o aparelho fornece um alto grau de confiança (50%), na medida do perfil de poros, a simulação acompanha identicamente o perfil de distribuição de poros.



Desta forma, o algoritmo de simulação de percolação por invasão modificada, com a introdução dos parâmetros "F's", foi capaz de acompanhar morfologicamente a dinâmica experimental dos "fingers", podendo normalmente fornecer o perfil de distribuição de poros para cada tipo de solo simulado. Cabe prestar atenção ao ressaltar o resultado apresentado na Fig.6.30, onde observ-se um comportamento simétrico no perfil de distribuição de poros. Este perfil de poros obtidos com o programa de simulação, representa uma amostra onde a formação de "fingers" não foi observada. É o caso de amostras de granulometria fina, semelhantes a amostra No.1. Este resultado, embora cobrindo uma faixa mais larga de poros, é compatível com o comportamento também simétrico do perfil de distribuição de poros da amostra No.1 (Fig. 6.1).

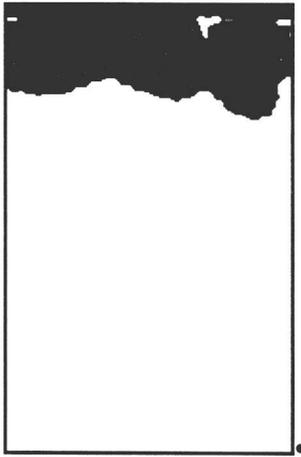
Assim, tanto na simulação como no experimento, o perfil de poros se apresenta como um parâmetro indicador da formação de "fingers", sob condições experimentais similares. Por exemplo, um comportamento simétrico desta curva (Fig.6.1 e 6.30) diminuiria a chance de aparecerem "fingers". No entanto, curvas com características assimétricas, aumentariam a chance de se formar "fingers". Contudo, o perfil de distribuição de poros é um parâmetro que deve ser ainda mais pesquisado de forma a correlacioná-lo melhor com a ocorrência do fenômeno "fingering". É necessário contar com metodologias de medida mais confiáveis, de forma a garantir resultados experimentais que permitam avaliar adequadamente o programa de simulação.

Devemos esclarecer que estes resultados, estão sendo apresentados pela primeira vez na literatura, sobretudo em Física de solos.

### **6.3.2.- Coluna de areia de uma única camada (solo não estratificado)**

O resultado dos experimentos, para testarem a ocorrência do fenômeno "fingering" em solos não estratificados (homogêneos), está sendo apresentado na Fig. 6.31a,b. Nestas figuras, pode-se observar dois instantes do desenvolvimento da frente de deslocamento do fluxo, ao

longo de uma coluna de solo de  $30 \times 38 \times 0.5 \text{ cm}^3$ . A amostra de solo usado, neste experimento foi a No. 4 (solo de textura semi-grossa), com a coluna preenchida de forma homogênea. A aplicação da água na superfície do solo foi bem lenta com um fluxo constante durante toda a experiência. A figura 6.31a, apresenta o instante  $t = 12\text{s}$ , onde o deslocamento da frente de molhamento ainda é uniforme, sem a formação de "fingers". Na figura 6.31b, instante final do experimento  $t = 90\text{s}$ , são observados claramente o desenvolvimento de três "fingers", bem definidos e outros menores em forma de "tiras".



a)



b)

Fig. 6.31. Resultados experimentais do fenômeno "fingering" em solo homogêneo (sem a camada fina). Dois instantes da infiltração de água em uma coluna de areia de  $30 \times 38 \times 0.5 \text{ cm}^3$  são mostrados. A amostra usada foi a No. 4 (textura semi-grossa), com a coluna preenchida de forma homogênea. A aplicação da água na superfície do solo foi bem lenta com um fluxo constante durante toda a experiência. Em *a*) apresenta-se o deslocamento do fluido para  $t = 12\text{s}$  (sem "fingering") e em *b*) apresenta-se o instante final da infiltração  $t = 90\text{s}$ , onde claramente se observa o desenvolvimento de três "fingers" bem definidos e outros menores, em forma de "tiras". Estes resultados comcordam com os relatados por Selker et al [26].

Isto demonstra que o fenômeno "fingering" pode aparecer também em solos homogêneos (não estratificados), onde a condição determinante para que isto ocorra é a taxa de fluxo aplicada na superfície do solo. Esta constatação também foi recentemente relatada por Selker et al [26].

#### 6.4.- Resultados experimentais do fenômeno "fingering", em 3-D

##### 6.4.1.- Resultados experimentais com o tomógrafo médico de raios X

A seguir, são apresentados os resultados experimentais da dinâmica do fenômeno "fingering", obtidos com o tomógrafo médico de raios X de quarta geração, através de uma coluna cúbica de  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ .

Estes resultados refletem as oportunidades e limitações do aparelho, um tomógrafo médico projetado para aplicações hospitalares, no acompanhamento espaço-temporal do fenômeno "fingering".

A figura 6.32 corresponde a um instante de tempo  $t = 1.58 \text{ min}$ , do deslocamento de fluxo através da coluna cúbica de solo, considerados a partir do início da infiltração. Nesta imagem digitalizada, mas ainda não processada, pode-se observar claramente (em cinza claro) a morfologia do fenômeno e a interface líquido-sólido (em cinza escuro), a primeira camada de solo (amostra No.1) totalmente saturada e o começo da instabilidade do fluxo, depois de uma certa zona de indução abaixo da interface (linha cinza escura) entre as duas camadas. Aprecia-se também um "finger", se deslocando rapidamente pela parede do recipiente, assim como a superfície não-planar entre as duas camadas, embora todos os cuidados experimentais tenham sido tomadas para construí-la como planar. Esta imagem corresponde a uma fatia transversal de 1,5 mm de espessura, do centro da coluna. A matriz de reconstrução usada foi de  $512 \times 512$  pixels e um campo de visão circular ("field of view": FOV) de 220 mm. Este FOV pode ser apreciado na Fig. 6.32 em um círculo escuro que circunda a coluna de solo. A resolução destas

imagens, consideradas como elementos de volume ("voxels"), foram de  $0.430 \times 0.430 \times 1.5 \text{ mm}^3$  ou  $0.28 \text{ mm}^3$ , com pixels de  $0.185 \text{ mm}^2$ .

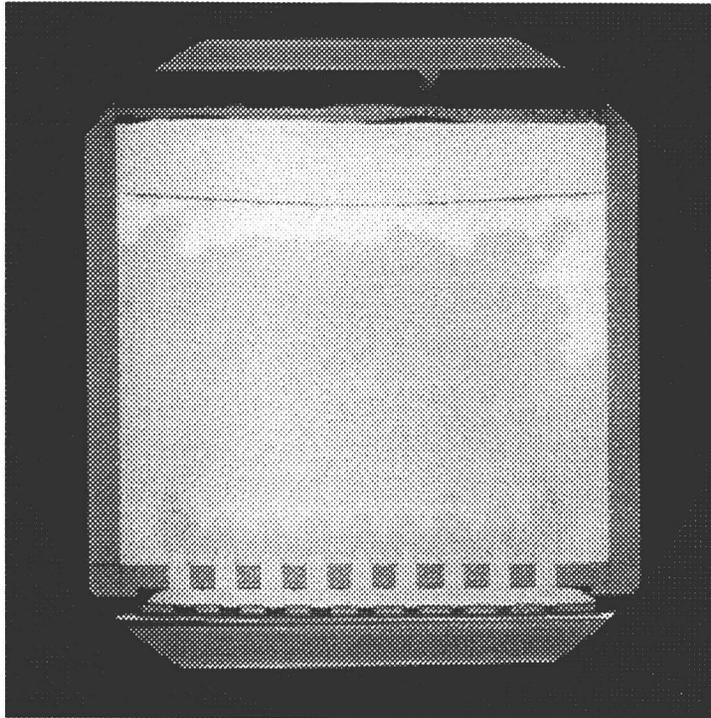


Fig. 6.32. Imagem digitalizada sem processamento, obtida com o tomógrafo médico de raios-X. Esta imagem corresponde a um corte transversal do centro da coluna cúbica ( $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ ), para um instante de tempo  $t = 1.58 \text{ min}$ , depois de iniciada a infiltração, através da superfície do solo. Pode-se apreciar claramente a interface líquido (cinza claro)-sólido (cinza escuro) e o começo da instabilidade do fluxo, depois de uma certa zona de indução abaixo da interface (linha cinza escura) entre as duas camadas. Aprecia-se também um "finger" deslocando-se rapidamente pela parede do recipiente.

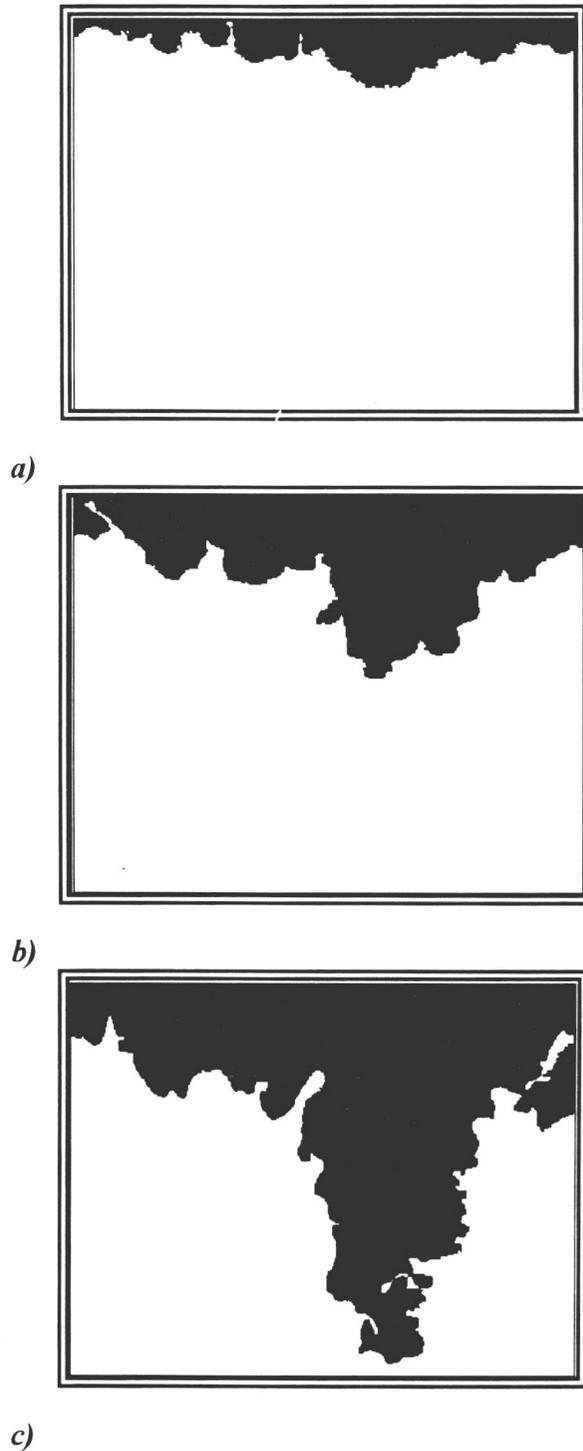


Fig. 6.33. Imagens processadas obtidas com o tomógrafo médico de raios-X. Representam a dinâmica do desenvolvimento dos "fingers" através da secção transversal central da coluna cúbica de solo. É mostrada uma fatia de 0.5 mm de espessura, 12 cm de largura e 15 cm de altura em três instantes de tempo diferentes: *a)*  $t = 1,25$  min, *b)*  $t = 2,0$  min e *c)*  $t = 2,7$  min, consideradas a partir do início da infiltração.

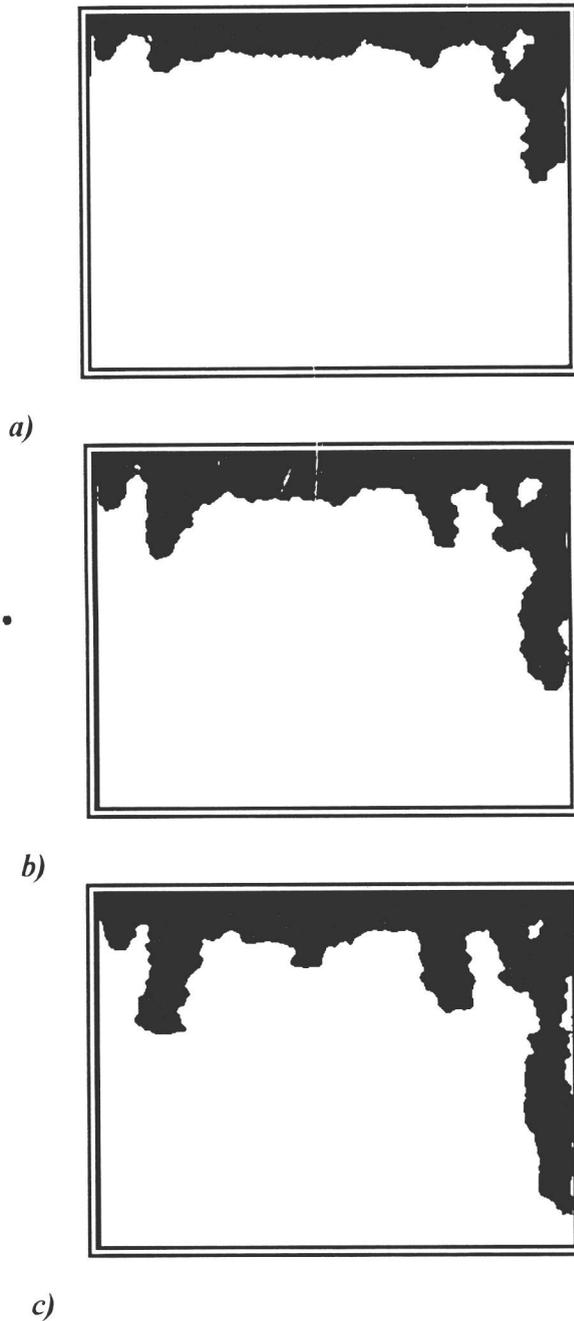


Fig. 6.34. Estas imagens representam um outro tipo de aquisição realizada com o tomógrafo de raios-X. As três imagens são parte de um conjunto de aquisições realizadas, usando a programação automática do tomógrafo e o deslocamento horizontal da mesa, para diferentes seções transversais da amostra. a) Representa o deslocamento do fluxo no instante  $t = 1.58$  min, da seção central da amostra. b) Morfologia do fluxo para o instante  $t = 1.8$  min, de uma fatia transversal deslocada 3 mm atrás da seção central e c) Dinâmica do fluxo para  $t = 2.08$  min, de uma fatia transversal, deslocada 6 mm a partir do centro da amostra.

Na figura 6.33, são apresentados imagens processadas de três instantes de tempo durante o deslocamento do fluxo através de uma fatia ( de 1.5 mm de espessura) central da coluna. Estas imagens apresentam o acompanhamento da dinâmica dos "fingers" a partir da interface entre as duas camadas, como pode ser apreciado na figura. Observa-se o desenvolvimento de um "finger" largo e compacto com uma velocidade média de  $5.5 \pm 0.5$  cm/min. Também é observada a presença da zona de indução, antes do "finger" começar a se desenvolver. Em todos os experimentos de tomografia, no preenchimento do solo na coluna cúbica, foi colocada um papel de filtro na interface entre as duas camadas de solo, de forma a evitar que partículas procedentes da camada fina penetrassem na segunda camada (de textura grossa). Nos experimentos em 2-D, conseguimos diminuir a altura desta zona de indução, colocando um filtro na interface entre as duas camadas. Contudo, existem outros fatores físicos que participam na geração desta zona de indução, sobretudo aqueles de origem local ( a nível de poro), como tensão superficial, pressão capilar e ângulo de contato. Há necessidade de experimentos mais dedicados para compreender melhor tais fatores.

A figura 6.34 representa uma tentativa de usar a técnica de tomografia médica para o acompanhamento sequencial do fenômeno "fingering". Para tal, foram usados os recursos de aquisição automática do tomógrafo e a movimentação mecânica da amostra. Na fig. 6.34a) é apresentado o deslocamento do fluxo para o instante  $t = 1.58$  min, a partir do início da infiltração. Esta imagem representa uma fatia transversal do centro da coluna cúbica. Em 6.34b) representa-se a aquisição para o instante  $t = 1.80$  min, de uma fatia transversal deslocada 3 mm do centro da amostra e em fig. 6.34c) representa-se o deslocamento do fluxo para o instante  $t = 2.08$  min, através de uma fatia transversal, deslocada 6 mm atrás do centro da amostra.

Através da aquisição destas três imagens sequenciais, pode-se observar que o tempo empregado foi de aproximadamente 2.0 min, tempo suficiente para que o "fingering" atingesse o fundo da coluna cúbica, como mostrado na figura 6.34c. Neste tempo, foi possível fazer o

acompanhamento "espacial" do fenômeno, para uma região de amostragem de 6 mm e uma única medida para cada seção (fatia). Nesta região, como pode ser apreciada na sequência das três figuras 6.34a,b,c a estrutura morfológica dos "fingers" não mudou. Eles se apresentam como sendo o deslocamento sequencial através de uma única fatia. Desta forma, para um estudo da distribuição espacial dos "fingers", precisaremos fazer aquisições tomográficas de maior número de fatias que produziram uma região de amostragem maior. Isto nos levaria a empregar tempos de aquisição muito maiores que 2 min, tempo suficiente para que a maioria dos "fingers" alcancem o fundo da caluna. Desta forma, o tomógrafo médico, projetado para aplicações hospitalares, praticamente impossibilita fazer o sequenciamento espacial da dinâmica do fenômeno "fingering".

Embora as imagens apresentadas nas figuras 6.32 a 6.34 representam o sequenciamento dos "fingers", através de uma única fatia transversal ou de fatias muito próximas, elas apresentam pela primeira vez, na literatura, informações do interior da amostra de solo da dinâmica do fenômeno "fingering". Com isto, pode-se avaliar a dinâmica morfológica e a frente de deslocamento (interface líquido-ar) do fluxo no interior da amostra, permitindo obter informações do transiente da infiltração, o que é relevante no caso da formação dos "fingers". Também foi possível mostrar a variabilidade da distribuição e evolução dos "fingers", conforme apresentados nas figuras 6.34 a), b) e c). Assim, apesar das limitações citadas acima, o tomógrafo médico de raios -X torna-se uma ferramenta muito promissora para o acompanhamento dinâmico do fluxo preferencial ou fenômeno "fingering" no interior do solo.

#### **6.4.2.- Resultados experimentais com o tomógrafo de RMN**

Os resultados experimentais dos estudos do fenômeno "fingering", em 3-D, obtidos com o sistema de tomografia de imagens por ressonância magnética nuclear, serão apresentados em duas partes. Na primeira parte, serão apresentados os resultados obtidos com imagens do fenômeno "fingering" em situações de equilíbrio hidrodinâmico e na segunda parte, os resultados da dinâmica espacial do fenômeno através de medidas por "spin-echo".

### a) Resultados obtidos com a técnica de imagens (TORM)

Os resultados obtidos com o tomógrafo de ressonância magnética nuclear, estão sendo apresentados nas figuras 6.35 a 6.40. Todos esses resultados foram obtidos nas mesmas condições físicas : o mesmo tipo de solo (amostra No.2), a mesma taxa de infiltração aplicada na superfície do solo e os mesmos parâmetros de medida utilizados pelo aparelho de TORM. Sempre foram usadas 7 fatias de aquisição de 1.8 cm de espessura espaçadas 2 cm entre seus centros.

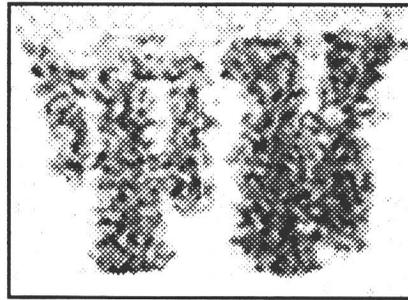
A figura 6.35 representa três aquisições (a,b,c) do plano transversal em situação de equilíbrio hidrodinâmico. Destas três imagens podemos observar o caráter tridimensional do fenômeno "fingering" e a grande variabilidade espacial do fenômeno. Por exemplo em a) os "fingers", alcançaram o fundo do recipiente. No entanto, nas secções b) e c) próximas da parte central da coluna de acrílico, os "fingers" ainda estão pela metade da coluna. Também através destas imagens, pode ser quantificado a característica geométrica dos "fingers", como seu diâmetro médio, que neste caso foi de  $2.5 \pm 0.5$  e o percurso através da coluna. Pode-se observar que estes "fingers" seguem caminhos preferenciais um tanto retilíneos, o que mostra o grande domínio da força gravitacional sobre o sistema .

A figura 6.36, representa um outro conjunto de medidas (a a f) do plano horizontal (coronal), nas mesmas condições da Fig. 6.35. Nestas figuras, claramente é possível observar o número de "fingers" através das diferentes fatias ao longo da vertical. Observa-se uma certa constância nos diâmetros dos "fingers" que atingem o fundo da coluna cúbica.

Isto evidencia que a tomografia por RMN possui um grande potencial para o estudo tridimensional do fenômeno "fingering", pelo menos em condições de equilíbrio hidrodinâmico.

Também, por exemplo, é possível ver graduação de tons de cinza o que significa em função da escala ou sinal de NMR maior (cinza escuro) e menor (cinza claro) quantidade de água. Ou

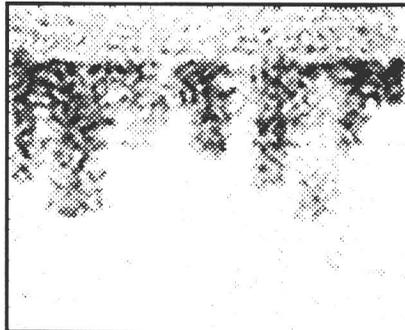
seja, dá idéia da distribuição horizontal de água. Seria interessante fixar uma seção coronal e verificar efeito da difusão horizontal.



a)



b)



c)

Fig. 6.35. Imagens obtidas com o sistema de TORM, mostrando três seções transversais do fenômeno "fingering" em condições estáticas. Cada seção representa uma fatia (coluna cúbica de  $15 \times 15 \times 15$  cm<sup>3</sup> de areia) de 2 cm de espessura por 15 cm de largura e 15 cm de altura. Pode-se observar claramente nestas 3 imagens a variabilidade espacial do fenômeno. Em a) os "fingers" estão próximos do fundo da caixa e em b) e c) (seções próximas à parte central da coluna cúbica) os "fingers" ainda estão pela metade da coluna.

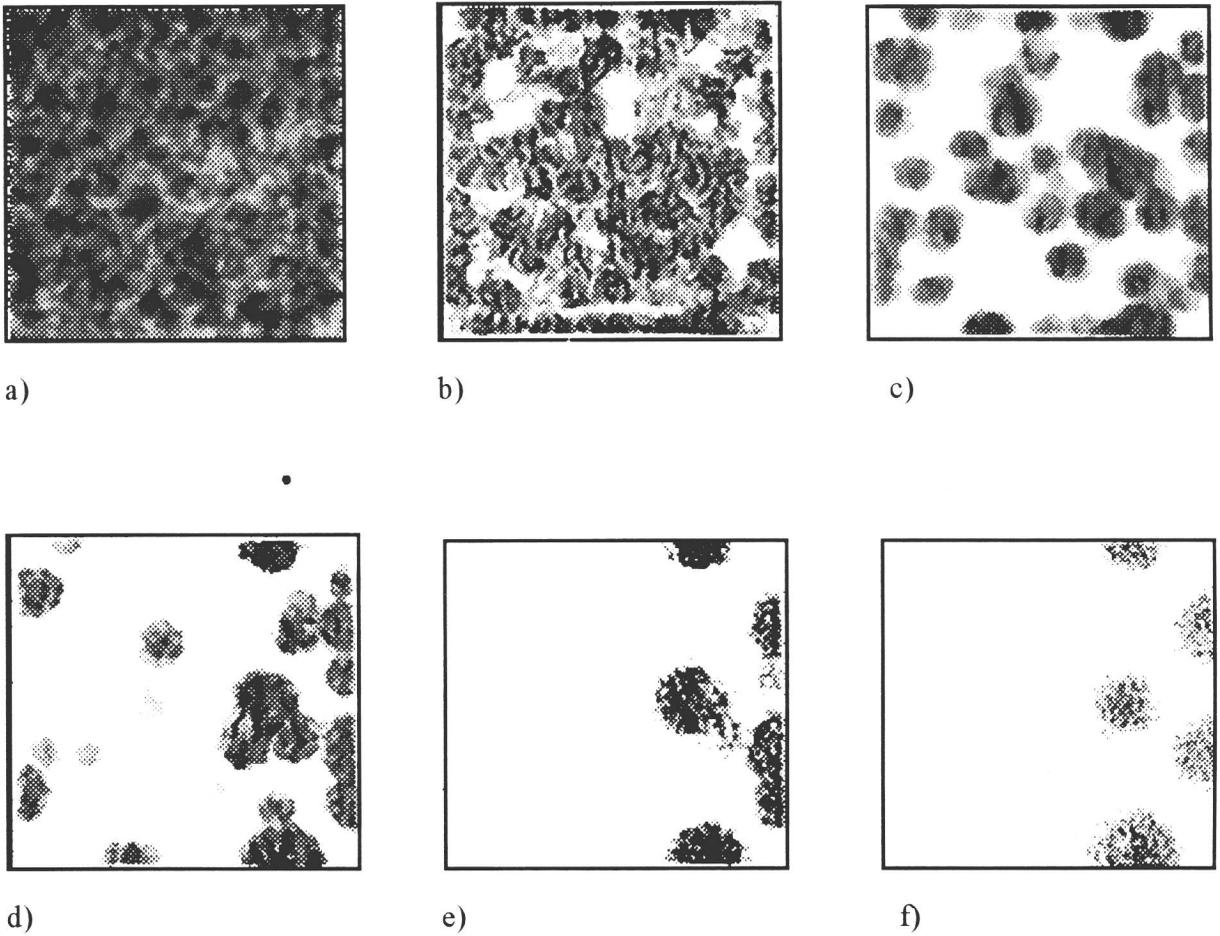


Fig. 6.36. Imagens obtidas com o sistema TORM. Seis secções coronais da coluna cúbica de solo são apresentadas nas mesmas condições da Fig. 6.35. Representam fatias da coluna seguindo o sentido da infiltração. a) Secção próxima superfície da coluna totalmente saturada (em cinza) e f) secção correspondente ao fundo da coluna de solo. b), c), d) e e) representam situações intermediárias. As partes em branco representam zonas secas e em tons de cinza zonas molhadas. Pode-se claramente contabilizar o número de "fingers" através de cada secção coronal.

A partir das imagens coronais, da figura 6.36, foi possível fazer uma reconstrução tridimensional de forma a poder avaliar a morfologia espacial dos "fingers". Esta reconstrução foi feita através de um algoritmo de interpolação [90].

A figura 6.37, apresenta esta reconstrução tridimensional, onde pode-se observar claramente a natureza espacial tridimensional do fenômeno "fingering", apresentando "fingers" de diferentes tamanhos e diâmetros. Uma certa regularidade na formação dos "fingers", ao longo da vertical pode ser verificada, mostrando, neste caso, o papel determinante que a força gravitacional desempenha na formação e na dinâmica do fenômeno.

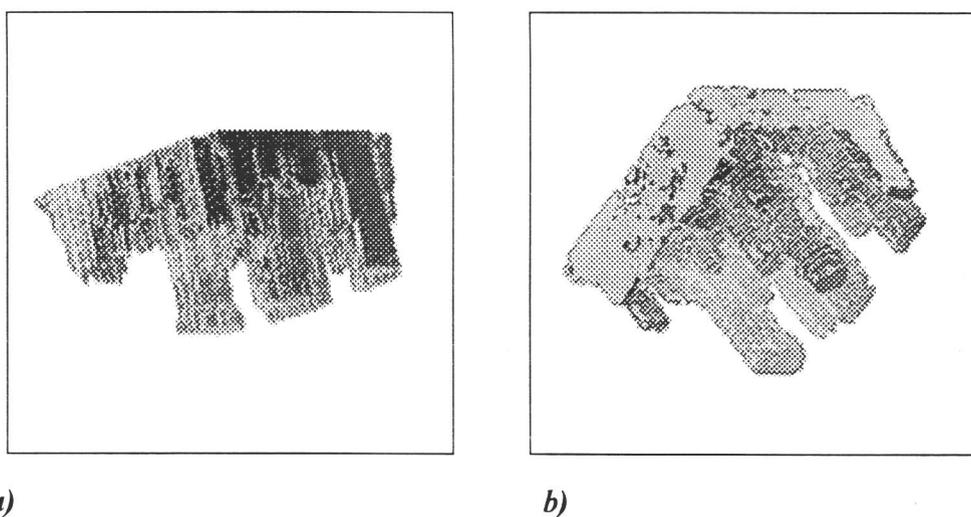
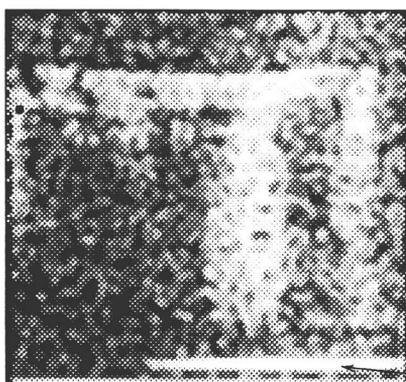


Fig. 6. 37. Reconstrução tridimensional do fenômeno "fingering" ao longo da coluna cúbica de solo. Imagem obtida através da figura 6.36 utilizando um algoritmo de interpolação. Pode-se claramente observar o carácter discreto dos "fingers" no espaço e certa "regularidade" de crescimento ao longo da vertical (seguindo a força gravitacional), coerentes com os resultados da figura 6.35. a) e b) representam uma rotação de, respectivamente, 15 e 30 graus em relação à vertical.

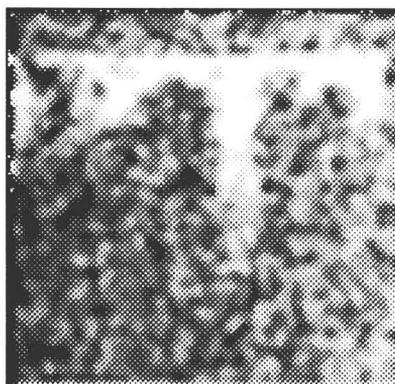
A figura 6.38 representa a imagem de uma secção transversal da coluna cúbica, onde observa-se claramente dois "fingers" largos e outro que ficou pela metade. Também evidencia-se um efeito interessante próprio do fluxo preferencial: uma certa quantidade de fluido se deslocou rapidamente por algum dos caminhos definidos pelos "fingers" e ficou acumulado no fundo da coluna. Uma situação semelhante pode facilmente dar-se em condições reais de campo. Este exemplo que está sendo apresentado foi detetado quase no centro da coluna. Em outro corte, perto das paredes do recipiente, este fato não foi detetado (Fig.6.38b).



a)

água acumulada

devido ao fluxo preferencial



b)

Fig. 6.38. Imagem, obtidas através do sistema TORM, que representa um corte transversal da coluna cúbica. Em a) Pode-se observar muito nitidamente o efeito "by-pass" devido ao fluxo preferencial, onde no fundo do recipiente ficou acumulado uma certa quantidade de água que se deslocou rapidamente através de alguns dos "fingers" traçados. Em b) corte transversal perto da parede da coluna, este fenômeno não é observado. Com isto, fica evidente a importância de se estudar espacialmente o fenômeno "fingering".

## b) Resultados das medidas usando a técnica de "spin-echo"

Os resultados das experiências obtidas sem a utilização de imagens tomográficas, como relatados na seção 5.3.2, item b, estão apresentadas nas figuras 6.39 e 6.40 para três instantes de tempo (36,2s, 81,0s e 137,0s) seguindo a dinâmica do fluido. A figura 6.39 representa dois fatias ou projeções do plano vertical para os três instantes diferentes de tempo. A fatia chamada de "central" representa a projeção do centro da coluna de solo, por onde o fluido se infiltrou e se deslocou mais rapidamente. A fatia chamada como "perto da parede" representa a projeção da seção próxima da parede da coluna por onde o fluido se infiltrou e avançou menos. Isto pode indicar que a parede não influencia a formação dos "fingers" nem a velocidade que eles desenvolvem. Também pode ser observado destas fatias o número de "fingers" em cada instante de tempo. Isto está dado pelas pontas observadas nesses mesmos instantes. Por exemplo, na fatia "perto da parede", no instante inicial igual a 36,2s, aparece uma ponta bem definida que representa a aparição de um "fingering" nesse instante. Para o instante igual 81,0s, aparecem 4 pontas que correspondem a 4 "fingers" e finalmente para o tempo final igual a 137,0s, observ-se 6 pontas que correspondem a 6 "fingers". Na figura 6.40 estão apresentadas a distribuição espacial do perfil da frente de deslocamento do fluido para os três instantes de tempo, seguindo a gravidade e contra a gravidade ("olhando baixo para cima"). Nestes perfis, pode-se apreciar claramente o caráter espacial e temporal do fenômeno "fingering" que apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal. Observa-se como as pontas surgidas inicialmente ("fingers" iniciais) crescem rapidamente, enquanto que nas outras regiões do espaço, o crescimento é mínimo. As pontas maiores também representam espacialmente a localização das regiões por onde o fluido se deslocou em maior abundância.

Contudo, cabe fazer alguns comentários em relação a estes resultados que estão sendo apresentados. Como já foi mencionado na seção (5.3), para a realização de experiência de "spin-echo", assumiu-se a hipótese de que a gravidade é o parâmetro mais importante que domina a dinâmica dos "fingers" em solos. Esta hipótese foi sustentada pelos resultados obtidos com as experiências com imagens (Fig. 6.31 a 6.38), onde pode-se nitidamente constatar a tendência de crescimento dos "fingers" ao longo da vertical. Porém, sempre

*Projeção da dinâmica do fluxo em 2-D*

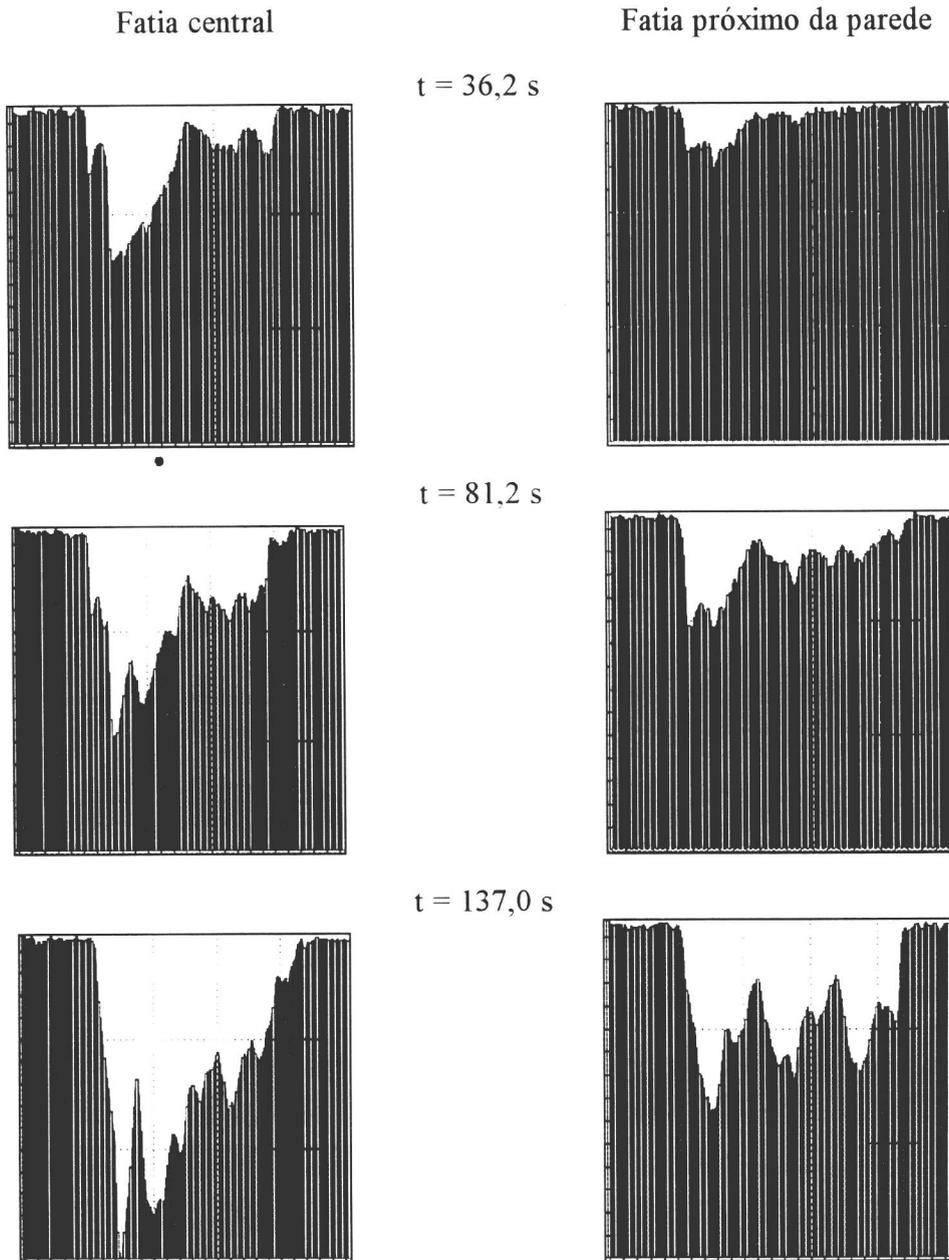


Fig. 6.39. Resultado experimental obtido através da técnica de "spin-echo" e recursos de computação gráfica. Representação de uma projeção da dinâmica dos "fingers", em 2D, para três instantes de tempo de uma fatia central e lateral, deslocada aproximadamente 6 cm da fatia central (próximo da parede do recipiente) da coluna cúbica de areia. O perfil de avanço do fluido segue a gravidade, onde as pontas representam os "fingers", que também são proporcionais à quantidade de fluido percolado.

### Dinâmica espacial em 3-D do fenômeno "fingering"

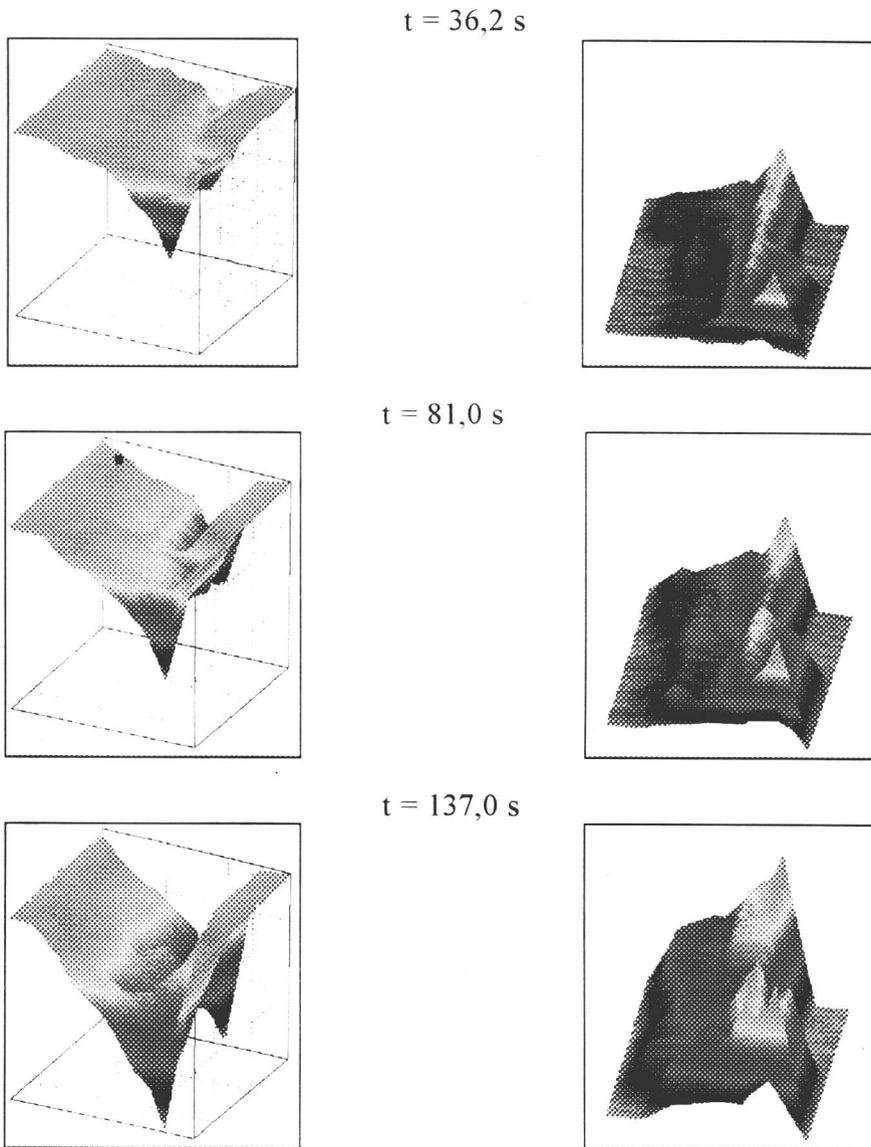


Fig. 6.40. Experiência com RMN sem obtenção de imagem tomográfica. Mostra-se uma distribuição espacial do perfil do fenômeno "fingering" para três instantes diferentes de tempo através da coluna cúbica (Fig. 5.19a). Claramente, observa-se a distribuição espacial e o crescimento das pontas ("fingers") com o decorrer do tempo. As imagens do lado direito representam a infiltração da água na coluna como se fosse vista de baixo para cima (contra o sentido da gravidade). Esta composição de imagens foi executada através do programa de processamento de imagens "khoros"

existem certas tortuosidades do fluxo que podem dar origem a deslocamentos horizontais ou mesmo o surgimento de bolhas no transiente do fluxo. Tais situações não podem ser detetadas com a técnica de "spin-echo". Esta técnica, mede em forma de sinal, uma quantidade física que é proporcional à concentração de água que vai penetrando ao longo da vertical da coluna, não sendo capaz de discriminar a posição do fluido nesta direção. Para solos não homogêneos, onde o surgimento de fluxos horizontais é grande, esta técnica não poderia ser empregada.

Por outro lado, como mencionado acima, o sinal de "spin-echo" que acompanha a frente de deslocamento ao longo da vertical é diretamente proporcional à quantidade de água que vai penetrando ou infiltrando dentro da amostra a partir da superfície do solo. Para se fazer este tipo de medida, foi necessário desligar o gradiente de campo magnético ao longo da vertical (sem codificação de fase). Ou de outro modo, foi usada uma "codificação de fase manual", definida como o intervalo de tempo usado para cada aquisição. Desta forma, uma aquisição para as 7 fatias transversais, tomaria um tempo de 1,4 s e considerando-se 8 médias para otimização da relação sinal-ruído, o tempo total de aquisição do conjunto das 7 fatias tomaria 11,2s. Este foi o tempo adotado como o intervalo da aquisição durante 180s. Por outro lado, a velocidade característica dos "fingers", neste tipo de solo, foi encontrada ser aproximadamente 0,09 cm/s, que já teriase deslocado aproximadamente 1 cm em 11,2s. Isto significa que a frente, de deslocamento do fluido, como apresentado nas figuras 6.39 e 6.40, teria uma incerteza de aproximadamente 1cm.

Assim, explorando os limites da técnica de TORMN e usando o sinal de "spin-echo" como o sinal que acompanha a infiltração através do tempo, foi possível acompanhar pela primeira vez descrito na literatura, a dinâmica do fenômeno "fingering" espacialmente dentro das limitações experimentais e as hipóteses assumidas, conforme já discutidas acima.

## CAPITULO VII

### CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, iremos descrever as conclusões finais do estudo do fenômeno "fingering", a partir dos resultados teóricos de simulação assim como experimentais obtidos e relatados nos capítulos III a VI. Também faremos as recomendações que consideramos pertinentes aos trabalhos futuros.

#### 7.1.- Conclusões

As principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho de tese estão resumidas em seguida, permitindo afirmar que os objetivos foram plenamente atingidos:

- 1) O fenômeno "fingering" pode aparecer tanto em solos estratificados como em solos homogêneos. O parâmetro determinante é a taxa de fluido transmitida pela interface de transição quando o solo é estratificado. Quando o solo é homogêneo, a taxa de infiltração será dada pela quantidade de fluido aplicada na superfície do solo (Pgs. 122 e 151);
- 2) A condutividade hidráulica, a umidade inicial e o perfil de distribuição de poros (ou granulometria) são características físicas do meio solo que vão determinar a taxa de transmissão do fluido (Pgs. 122 a 130);
- 3) Em solos, onde a existência de poros pequenos é grande ou apresentam uma distribuição simétrica, curta ou larga de poros, a ocorrência do fluxo preferencial será menos provável (Pg. 148);
- 4) A velocidade final dos "fingers" esta diretamente relacionada com a condutividade hidráulica de saturação do meio. Começa com uma velocidade inicial no momento de formação dos

"fingers" e vai aumentando com o decorrer do tempo podendo atingir o equilíbrio hidrodinâmico com uma velocidade final igual à velocidade que o fluido teria em condições de saturação total do meio (Pg.124);

5) O número de "fingers" e suas larguras estão relacionados à taxa de infiltração e a presença de macroporos ou microporos (Pg. 130);

6) Assim que os "fingers" aparecem, estes marcam o caminho preferencial. Mesmo aumentando o fluxo de infiltração, desligando e ligando a alimentação do fluido ou seja, mudando as condições de fronteira, os caminhos ficam fixos, precisando de muitas horas, dependendo do tipo de solo, de infiltração para fazer com que os caminhos preferenciais desapareçam por efeitos de difusão. Nesta situação, os processos de redistribuição de fluido no solo, também podem gerar "fingers" (Pg. 129);

7) A frente de deslocamento (interface fluido-ar) ou perfil de infiltração tem um comportamento de autosimilaridade estatística ou fractal, variando sua dimensão fractal em função da altura do avanço da infiltração [164]. O comportamento global da estrutura dos "fingers", em certas situações, também poderá ter característica fractal, tendo como fatores, o tipo de solo e sua característica granulométrica. Em solos de textura fina, as estruturas dos "fingers" são compactas e não fractais. No entanto, em solos de textura grossa, estas estruturas descrevem características próprias dos fractais, onde a dimensão fractal está relacionada com o tipo de granulometria do solo, quando mantidas as mesmas condições iniciais e de fronteira (Pgs. 134 a 138);

8) As condições iniciais e de fronteira são fatores determinantes para a ocorrência do fenômeno. Assim, que os "fingers" aparecem a força gravitacional passa a ser o parâmetro físico mas importante que dirige a dinâmica do sistema (Pgs. 50, 131, 153-1159);

9) A aparição dos "fingers" no interior do sistema poroso é puramente randômico ou estocástico. Em experiências repetidas nas mesmas condições iniciais e de fronteira, o número de "fingers" em média se manteve, mas a localização deles variou espacialmente (Pgs. 122-129 e 153-161);

10) O comportamento geométrico dos "fingers" apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal, o que neste caso evidencia sua natureza tridimensional e estocástica (Pgs. 153-161);

11) O algoritmo do modelo de percolação por invasão modificada, com a introdução dos parâmetros "F's" foi capaz de descrever a morfologia dos "fingers" para os diferentes tipos de solo utilizados, fornecendo perfis de distribuição de poros compatíveis com aqueles obtidos experimentalmente através do porosímetro de mercúrio (Pgs. 142-147);

12) As técnicas de medida empregadas, como tomografia de raios-X e de RMN, mostraram-se de grande utilidade para o estudo experimental da variabilidade espacial e temporal do fenômeno "fingering" em solos. Ambas as técnicas apresentam vantagens e desvantagens mútuas. No entanto, são em seu conjunto complementares, não-destrutivas e, portanto, altamente indicadas para estudos equivalentes aos apresentados neste trabalho (Pgs. 153 a 162);

13) A técnica de "spin-echo" e o emprego do sistema de processamento de imagens, mostraram-se apropriados para o acompanhamento da dinâmica espacial da interface fluido-ar, abrindo novas possibilidades de estudo de processos semelhantes, em meios porosos (Pgs. 163-166).

## 7.2.- Sugestões de trabalhos futuros.

Da experiência acumulada durante o processo de elaboração deste trabalho de tese fazemos as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

a) Estender o programa de simulação para três dimensões. A validação desta simulação será feita através das imagens de RMN, em condições de equilíbrio hidrodinâmico. Isto é, cortar a alimentação do fluxo, quando o primeiro "finger" atingir o fundo da caixa. Ficou evidente a partir deste trabalho, que uma vez gerados os "fingers", eles ficam praticamente estáveis por várias horas, tempo<sup>o</sup> suficiente para fazer imagens tomográficas em diferentes secções da amostra;

b) A partir do modelo de simulação, obter o perfil de aceitação e valida-lo experimentalmente. Quando simulada a morfologia dos "fingers", o programa de simulação fornece o perfil de aceitação dos poros (sítios invadidos durante a percolação). Este perfil de aceitação é equivalente aos poros molhados (invadidos) por onde os "fingers" se deslocam (poros que pertencem às zonas saturadas do meio) no experimento.

c) As estruturas geradas pelo algoritmo de percolação por invasão independem do perfil de poros utilizados, mesmo com a introdução dos parâmetros "F's". Tanto faz fornecer ao simulador uma distribuição Gaussiana ou uma distribuição uniforme. Contudo, existem evidências de que usando um perfil de dupla distribuição (por exemplo, duas gaussianas distantes) a morfologia das estruturas será diferente quando comparada com um perfil de uma única distribuição. Em solos é fácil encontrar vários perfis de distribuição de poros, dependendo do tipo de solo. Assim, sugerimos introduzir esta dupla distribuição de poros no programa de simulação, de forma a estudar as estruturas geradas via computador;

- d) Utilizar outras técnicas diferentes da porosimetria de mercúrio, sobretudo para a medida de macroporos de forma a obter resultados confiáveis, capazes de avaliar melhor o programa de simulação;
- e) Nas medidas usando a técnica de imagens por RMN, projetar e construir bobinas de rádio frequência segundo as dimensões da amostra utilizada e compatível como o diâmetro do eletroímã. Isto deverá evitar maior dispersão do campo magnético e permitirá obter melhor relação sinal-ruído;
- f) Na formação dos "fingers", utilizar líquidos diferentes permitindo variar a tensão superficial com a finalidade de observar a atuação da tensão superficial no desenvolvimento e na característica morfológica dos "fingers", o que deverá ser complementada com amostras de diferentes graus de contaminação;
- g) Desenvolver experimentos de observação do fenômeno "fingering", em ambientes com variações bruscas de temperatura, de forma a estudar a influência da temperatura no processo de geração e desenvolvimento dos "fingers" e
- h) Estudar a dependência do número de "fingers", forma e tamanho com as condições de fronteira principalmente o papel da pressão: negativa, positiva ou igual a zero no interior da coluna.

## APÊNDICE

Nesta secção apresentaremos os resultados do perfil de distribuição de poros das seis amostras de solo arenoso, conforme obtidos com o porosímetro de mercúrio.

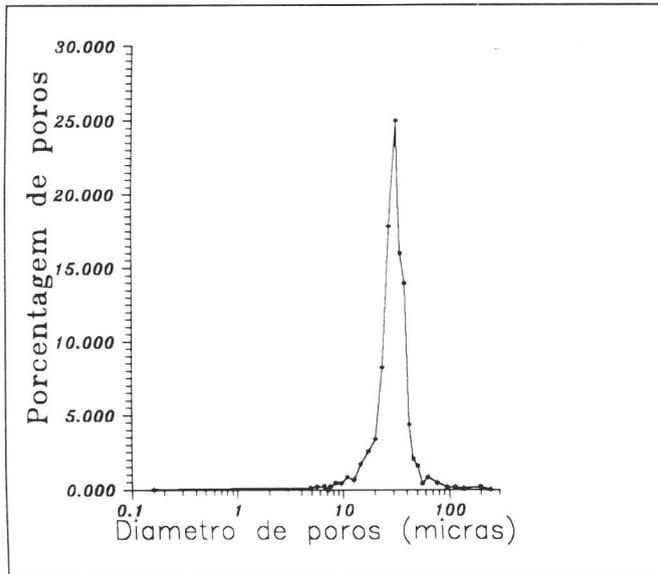


Fig. A1. Perfil de poros para a amostra No.1 (solo de textura fina). Os diâmetros dos grãos de areia estão compreendidos entre 0.106 mm e 0.149 mm. O grau de confiança da medida fornecida pelo aparelho é de 59% o que é considerado como muito bom.

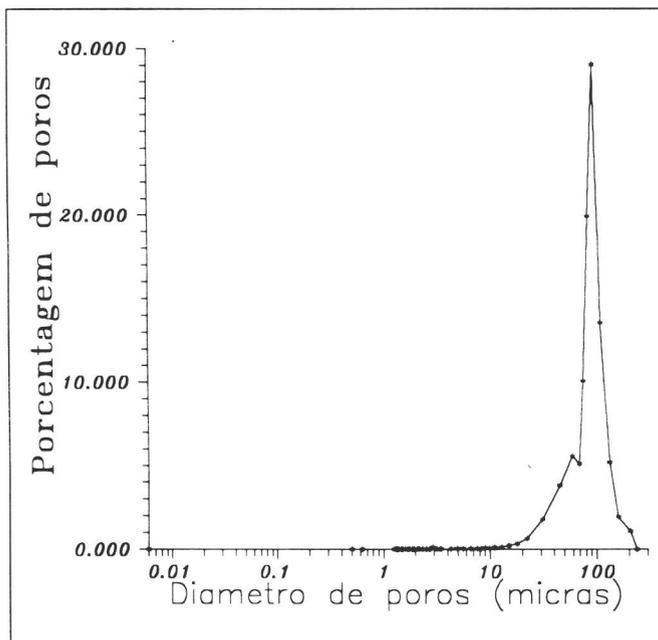


Fig. A2. Perfil de distribuição de poros da amostra No.2 (textura semifina). Os diâmetros dos grãos de areia estão compreendidos entre 0.212 mm e 0.500mm. Neste caso, o grau de confiança da medida fornecida pelo aparelho é de 48% o que é considerado como muito bom.

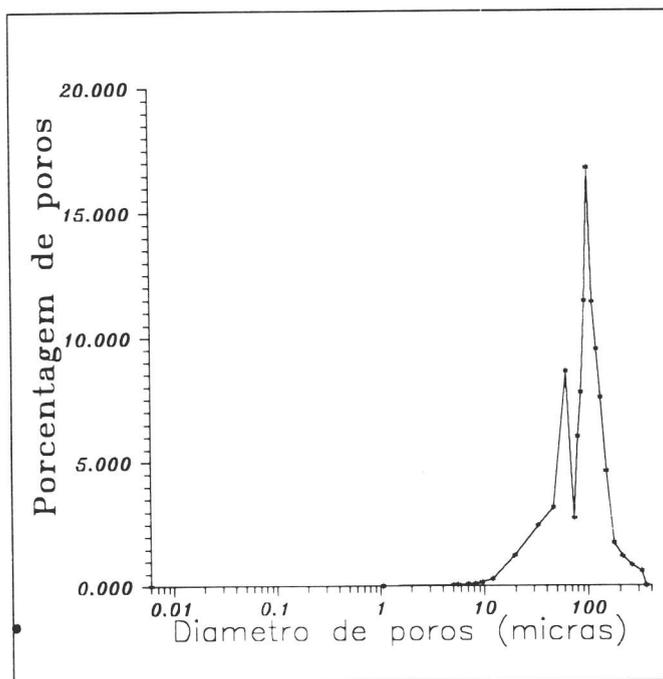


Fig. A3. Perfil de distribuição de poros para a amostra No. 3 (textura semifina). Os diâmetros dos grãos de areia estão compreendidos entre 0.297 mm e 0.500 mm. O grau de confiança na medida neste caso foi de 53% (muito bom).

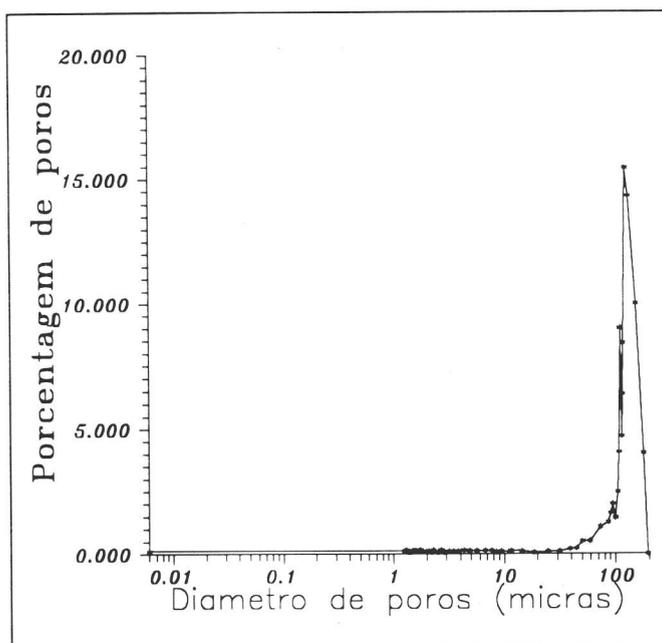


Fig A4. Perfil de distribuição de poros para a amostra de solo No.4 (textura semi-grossa). Os diâmetros dos grãos de areia estão compreendidos entre 0.500 mm e 1.0 mm. O grau de confiança fornecido pelo aparelho é de 13% o que é considerado não confiável.

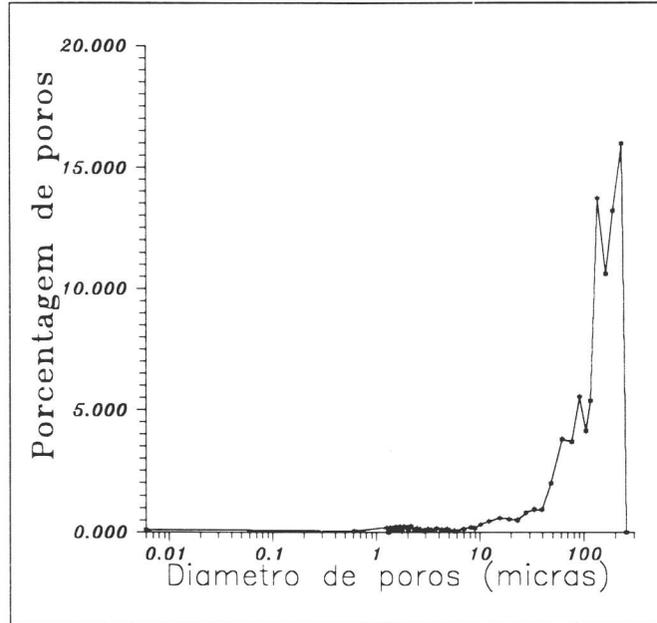


Fig. A5. Perfil de distribuição de poros para a amostra de solo No.5 (textura grossa). Diâmetros dos grãos de areia compreendidos entre 1.00 mm e 2.00 mm. Grau de confiança do equipamento igual a 7% considerado não confiável.

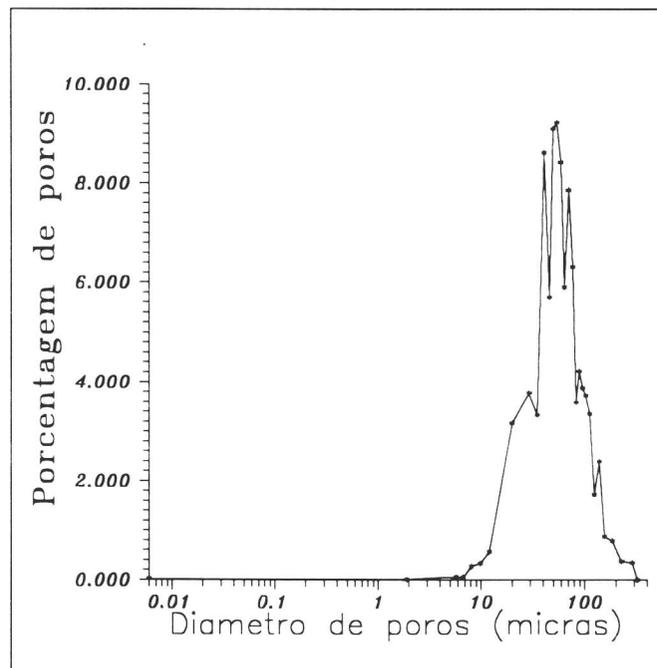


Fig. A6. Perfil de distribuição de poros para a amostra No. 6 (textura semi-grossa). Diâmetros de grãos compreendido entre 0.149 mm e 1.00 mm. Grau de confiança do equipamento igual a 50% considerado muito bom.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sposito, G. & Reginato, R.J. Opportunities in basic soil science research. Madison, Soil Science Society of America, 1992. 109p.
2. Berry, P. & Christie, M. Computers refine oil production. Phys. World. Bristol, 47-51, 1991.
3. Lenormand, R.; Toubal, E. & Zarcone, C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. J. Fluid Mech., Cambridge, U.K., 189, 165-187, 1988.
4. Engeberts, W.F. and Klinkenberg, L.J. In: World Petroleum Congress, 3. Proceedings... s.l., s.ed., 1951. Sec. 2, p. 544.
5. Lenormand, R. Pattern growth and fluids displacements through porous media. Physica, 140A, 114-123, 1986
6. Nittmann, J., Daccord, G. and Stanley, E. Fractal growth of viscous fingers: quantitative characterization of a fluid instability phenomenon. Nature, 314 (14), 141-144, 1985.
7. Paterson, L. Diffusion limited aggregation and two-fluid displacements in porous media. Phys. Rev. Lett., 52, 1621-1624, 1984
8. Chouke, R.L., Van Meurs, P. and Van der peol, C. The instability of slow, immiscible, viscous liquid-liquid displacements in permeable media. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 216, 188-194, 1959.
9. Saffman, P.G. and Taylor, S.G. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. Proc. Roy. Soc. Amer., 245, 312-329, 1958.
10. Furuberg, L., Feder, J., Aharony, A. and Jossang, T. Dynamics of invasion percolation. Phys. Rev. Lett. 61(18), 2117-2120, 1988.
11. Witten, T.A. and Sanders, L.M. Diffusion-limited aggregation. Phys. Rev. B, 27, 5686-5697, 1983.
12. Wilkinson, D. and Willemsen, J.F. Invasion percolation: a new form of percolation theory. J. Phys. A: Math. Gen. 16, 3365-3376, 1983.
13. Meakin, P., Feder, J., Frette, V. and Jossang, T. Invasion percolation in a destabilizing gradient. Phys. Rev. A, 46(6), 3357-3368, 1992.
14. Frette, V., Maloy, K.F., Boger, F., Feder, J. and Jossang, T. Displacement structures in 2- and 3- dimensional porous media at low viscosity contrast. Physica Scripta, T38, 95-98, 1991.

15. Chen; Jing-Den; Dias, M.; Patz, S. and Schwartz, L. Magnetic resonance imagen of immiscible fluid displacement in porous media. Physical Review Letters, 61(13), 1489-1492, 1988.
16. Dupont, T.; Goldstein, R.; Kadanoff, L. and Zhou. Finite-time singularity formation in Hele-Shaw system. Physical Review E, 47, (6), 4182-4196, 1993.
17. Glass, R.J. and Parlange, J.Y. Immiscible displacement in porous media. Stability analysis of three-dimensional, axisymmetric disturbances with application to gravity-driven wetting instability. Water Resources Research, 27(8), 1447-1956, 1991.
18. Crestana, S. Transporte, Previsão do destino e balanço de pesticidas no solo. São Carlos, 1991. Projeto FAPESP, processo no. 90/3773-7.
19. Hill, D.E. and Parlange, J.-Y. Wetting front instability in layered soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36 (5), 697-702, 1972.
20. White, I., Colombera, P.M. and Philip, J.R. Experimental studies of wetting front instability induced by gradual changed of pressure gradient and by heterogeneous porous media. Soil Sci. Soc. Am. J., 41, 483-489, 1977.
21. Tamai, N., Asaeda, T. and Jeevaraj, Ch. G. Fingering in two-dimensional, homogeneous, unsaturated porous media. Soil Science, 144(2), 107-112, 1987.
22. Glass, R.J., Parlange, J.Y. and Steenhuis, T.S. Wetting front instability: theoretical discussion and dimensional analysis. Water Resources Research, 25(6), 1187-1194, 1989a.
23. Glass, R.J.; Steenhuis, T.S. and Parlange, J.Y. Wetting front instability: experimental determination of relationships between system parameters and two-dimensional unstable flow field behavior in initially dry porous media. Water Resources Research, 25(6), 1195-1207, 1989b.
24. Baker, R.S. and Hillel, D. Laboratory Tests of a theory of fingering during infiltration into layered soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 20-30, 1990.
25. Glass, R.J. Wetting front instability in unsaturated porous media: a three-dimensional study in initially dry sand. Transport in porous media, 5, 247-268, 1990.
26. Selker, J.S.; Steenhuis, T.S. and Parlange, J.Y. Wetting from instability in homogeneous sandy field under continuos infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 1346-1350, 1992.
27. Starr, J.L.; Deroo, H.C.; Frink, C.R. Leaching characteristics of a layered field soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 376-391, 1978.

28. Glass, R.J., Steenhuis, T.S. and Parlange, J.-Y. Wetting front instability as a rapid and far-reaching hydrologic process in the vadose zone. Journal of contaminant Hydrology, 3, 207-226, 1988.
29. Ritsema, C.J. and Dekker, L.W. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. Water Resources Research, 29 (7), 2183-2193, 1993.
30. Posadas, A.N.D and Crestana, S. Aplicação da teoria fractal na caracterização do fenômeno "fingering" em solos não saturados. Rev. Bras. Ci. Solo, 17(1), 1-8, 1993.
31. Glass, R.J., Steenhuis, T.S. and Parlange, J.Y. Mechanism for finger persistence in homogeneous unsaturated, porous media: theory and verification. Soil Science, 48 (1), 60-70, 1989.
32. Raats, P.A.C. Unstable wetting front in uniform and nonuniform soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37, 681-685, 1973.
33. Philip, J.R. Stability analysis of infiltration. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39, 1042-1049, 1975.
34. Hillel, D. and Baker, R.S. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils. Soil Science, 146(1), 51-56, 1988.
35. Chang, W-L.T. Fractal analysis of wetting front instability in unsaturated soil. Davis, 1990. Tese de Doutorado.
36. Diment, G.A. and Watson, K.K. Stability analysis of water movement in unsaturated porous materials 2 numerical studies. Water Resources Research, 19(4), 1002-1010, 1983
37. Hosang, J. Modeling preferential flow of water in soil-a two-phase approach for field conditions. Geoderma, 58, 149-163, 1993.
38. Bensimon, D.; Kadanoff, L.P.; Shoufan, L. Shraimman, B. and Chaotan, D. Viscous flows in two dimensions. Rev. Mod.Phys., 58(4), 977-999, 1986.
39. Mandelbrot, B.B. The fractal geometry of nature. 2.ed. N.Y., Freeman, 1982. 429p.
40. Maloy, K.J.; Feder, J. and Jossang, T. Viscous fingering fractals in porous media. Phys. Rev. Lett., 55, 2688-2691, 1985a
41. Maloy, K.J.; Feder, J. and Jossang, T. Radial Viscous fingering in a Hele-Shaw cell. s.l., Department of physics, University of Oslo, 1985b. 1-15. (Report Series Cooperative phenomena project, 85-9).
42. Chen, J.D. and Wilkinson, D. Pore-scale viscous fingering in porous media. Physical Review Letters, 58(18), 1892-1895, 1985

43. Posadas, A.N.D. Estudo da cinética de fusão e de congelamento da água em um meio poroso não-saturado: experimentação e simulação. São Carlos, USP-IFQSC, 1990. Tese de mestrado,
44. Crestana, S., Posadas, A., Nielsen, D.R., Kauten, R. and Brown, J.M. One dimensional heat flow model describing freezing-thawing processes occurring in a sand column validated by magnetic resonance imaging measurements. *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics Thermodynamics*, 1660-1664, 1993.
45. Crestana, S. Noninvasive measurements. In: Sposito, G. & Regonato, R.J. Opportunities in basic soil science research. Madison, Soil Science Society of America, 1992. p. 83-85
46. Sheidergger, A.C. The physics of flow through porous media. 3.ed. University of Toronto Press, 1972.
47. Hillel, D. Introduction to soil physics. Academic press, 1982.
48. Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkntin, B.P. Soil-Water interactions: mechanisms and applications. s.l., Marcel Dekker, 1988.
49. Reichardt, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. s.l., Cargill, 1985. 445p.
50. Adam, N.K. The physics and Chemistry of surfaces. Oxford, Claredan, 1938.
51. Crestana, S. A tomografia computadorizada como um novo método para estudos da Física da água no solo. Carlos, USP-IFQSC, 1985. Tese de Doutorado.
52. Warrick, A.M. Time-dependent linearized infiltration. I. point sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38, 383-386, 1974.
53. Lome, D.O. and Warrick, A.W. Time linearized infiltration. II. line sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38, 568-572, 1974.
54. Tobinaga, S. Formulação variacional do escoamento da água em um meio porosos não saturado. São Carlos, USP - EESC, 1973. Tese de mestrado.
55. Sposito, G. and Jury, A.W. Inspectional analysis in the theory of water flow through unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 791-798, 1985.
56. Philip, J.R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and ets solutions. *Soil Sci.*, 83, 345-357, 1957.
57. Selim. H.M. and Kirkham, D. Unsteady two-dimensional flow of water in unsaturated soil above an impervious barrier. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37, 489-495, 1973.

58. Unlü, K., Nielsen, D. and Biggar, J.W. Stochastic analysis of unsaturated flow: one-dimensional Monte Carlo simulations and comparisons with spectral perturbation analysis and field observations. Water Resources Research, 26(9), 2207-2218, 1990.
59. Hillel, D. Applications of soil physics. s.l., Academic Press, 1980. Cap. 11.
60. Philip, J.R. Steady infiltration from buried surface and perched point and line sources in heterogeneous soils: I. Analysis. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36, 268-273, 1972.
61. Tiellontson, P.M. and Nielsen, D.R. Scale factors in soil science. Soil Sci. Soc. Am. J., 48, 953-959, 1984.
62. Gelhar, L.W. Stochastic analysis of flow in heterogeneous porous media. In: Bear & Corapcioglu. Fundamentals of transport phenomena in porous media. Netherlands, NATO, 1984. p.673-717. (NATO ASI Series, serie E: Applied Sciences, 82).
63. Marsily, G. de. Spatial variability of properties in porous media: a stochastic approach. In: Bear & Corapcioglu. Fundamentals of transport phenomena in porous media. Netherlands, NATO, 1984. (NATO ASI Series, serie E: Applied Sciences, 82).
64. Gray, W.G. Comparison of finite difference and finite element methods. In: Bear & Corapcioglu. Fundamentals of transport phenomena in porous media. Netherlands, NATO, 1984. (NATO ASI Series, serie E: Applied Sciences, 82).
65. Nielsen, D.R., Jackson, R.D., Cary, J.W. and Evans, D.D. Soil water. Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. of Am., 1972.
66. Miller, E.F. and Miller, B.D. Physical theory for capillary flow phenomena. Journal of Applied Physics, 27(4), 324-332, 1955.
67. Miller, E.E. Similitude and scaling of soil-water phenomena. In: Hillel, D., ed. Applications of soil physics, N.Y., Academic Press, 1980.
68. Warrick, A.W., Mullen, G.J. and Nielsen D.R. Scaling field-measured soil hydraulic properties using a similar media concept. Water Resources Research, 13(2), 355-362, 1977.
69. Vachaud, G., Vauclin, M. & Balbanis, P. Stochastic approach of soil water flow through the use of scaling factors: measurement and simulation. Agricultural Water Management, 13, 249-261, 1988.
70. Clark, I. Practical geostatistics. London, Applied Science Publ., 1979. 129p.
71. Warrick, A.W. & Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physical properties in field. In: Hillel, D., ed. Applications of soil physics. N.Y., Academic Press, 1980.

72. Hillel, D. & Elrick, D. Scaling in soil physics: principles and applications. Madison, SSSA, 1990. 122p.
73. Tyler, S.W. Fractal applications to soil hydraulic properties. Nevada, 1990. Tese de Doutorado.
74. Tyler, S.W. & Wheatcraft, S.W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. Soil Sci. Soc. Am. J., 53, 987-996, 1989.
75. Toledo, P.G.; Novy, R.A.; Davis, H.T. & Scriven, L.R. Hydraulic conductivity of porous media at low water content. Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 673-679, 1990.
76. Tyler, S.W. and Wheatcraft, S.W. Fractal scaling of soil particle-size distribution: analysis and limitations. Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 362-369, 1992.
77. Rieu, M. and Sposito, G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I theory. Soil Sci. Soc. Am. J., 55, 1231-1238, 1991.
78. Rieu, M. and Sposito, G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: II applications. Soil Sci. Soc. Am. J., 55, 1239-1244, 1991.
79. Morrison, R.D. Uncertainties associated with the transport and sampling of contaminants in the vadose zone. Sacramento, Ca., AEG, 1989. (personal communication).
80. Gerke, H.H. & Vangermuchten, M.T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solute in structured porous media. Water Res. Research, 29(2), 305-319, 1993.
81. Silliman, S.E. & Wrightal. Stochastic analysis of paths of high hydraulic conductivity in porous media. Water Res. Research, 24(11), 1901-1910, 1988.
82. Berkowitz, B. & Braester, C. Dispercion in sub-representative elementary volume fracture networks: percolation theory and randon wolk approach. Water Res. Research, 27(12), 3159-3164, 1991.
83. Berkowitz, B. & Balberg, I. Percolation theory ans its application to groundwater hidrology. Water Res. Research, 29(4), 775-794, 1993.
84. Di Pietro, L. Malayan, A. & Zeleski, S. Modelling water flow in unsaturated porous media by interacting lattice gas-cellular automata: II. infiltration. (to be published).
85. Di Pietro, L. Transports D'eau dans des milieux a porosite binodale: modelisation par la methode de gaz sur resaux. Universite de Montpellier, 1993. Tese de Doutorado.

86. Zimmerman, R.W., Chen, G., Hadgu, T. & Bodvarsson, G. A numerical dual-porosity model with semi-analytical treatment of fracture / matrix flow. Water Res. Research, 29(7), 2127-2137, 1993.
87. Steenhuis, T.S., Parlange, T.Y. & Andreini, M.S. A numerical model for preferential solute movement in structured soils. Amsterdam, Elsevier, 1990.
88. Feder, J. Fractals. N.Y., Plenum, 1988. 283p.
89. Andreini, M.S. & Steenhuis, T.S. Preferential paths of flow under conventional and conservation tillage. Geoderma, 46, 85-102, 1990.
90. Posadas, D.A., Tannús, A., Panepucci, H.C., & Crestana, S. Estudo tridimensional do fenômeno "fingering" em solos através de imagens de RMN e raios-X. In: encontro de usuários de RMN, 5, Angra dos Reis, R.J. Resumos...Rio de Janeiro, AUREM, 1993. p.105.
91. Fisher, M. The renormalization group in the theory of critical behavior. Review of Modern Physics, 46(4), 597-616, 1974.
92. Vicsek, T. Fractal growth phenomena. 2.ed. s.l., World Scientific Publishing, 1992. 508p.
93. Hausdorff, F. Dimension and asexual mass. Math. Ann., 79, 157-179, 1919
94. Besicovitch, A.S. On the sum of digits of real numbers represented in the dyadic system (on sets of fractional dimensions II). Math. Ann., 110, 321-457, 1935.
95. Mandelbrot, B.B. Les objets fractals: forme, hasard et dimension. Paris, Flammarion, 1975.
96. Barnsley, M.F.; Devaney, R.L.; Mandelbrot., B.B; Peitgen, H. -O.; Saupe, D. & Voss, R.F. The Science of fractal image. N.Y., Springer-Verlag, 1988. 312p.
97. Barnsley, M. Fractal everywhere. N.Y., Academic Press, 1988. 394p.
98. Jossang, T. & Feder, J. The fractal characterization of rough surfaces. Physica Scripta, 44, 9-44, 1992.
99. Meakin, P. Fractals and disordered growth. J. Mater. Educ., 11, 105-167, 1989.
100. Mandelbrot, B.B. Self-affine fractal sets. In: Pietronero, L. & Tossati, E. Fractals in Physics. Amsterdam, North-Holland, 1986a,b. p. 3-28.
101. Mandelbrot, B. Self-affine fractal and fractal dimension. Physica Scripta, 32, 257-260, 1985.
102. Gouyet, J.-F., Rosso, M. & Sapoval, B. Fractal surfaces and interface. In: Fractal and disordered systems. Berlin, Springer-Verlag, 1991. Cap. 7.

103. Vicsek, T. Fractal growth phenomena. Singapor, World Scientific, 1989.
104. Devreux, F., Bilot, F., Chaput & Sapoval, B. NMR determination of the fractal dimension insilica aerogels. Physical Review Letters, 65(5), 614-617, 1990.
105. Keller, J.M., Crownover, R.M. & Chen, R.Y. Characteristics of natural scenes related to the fractal dimension. IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., 9(5), 621-627, 1987
106. Avnir, A. The fractal approach to heterogeneous Chemistry. Great Britain J. Wiley, 1989. p. 441.
107. Forrest, S.R. & Witten, J.A. Long-range correlations in smoke-particle aggregates. J. Phys. A: Math. Gen., 12(5), 109-117, 1979.
108. Creutz Burg, R. Fast algorithm for computing fractal dimensions of imagen segments. s.l., s. ed., 1991. p 42-31.
109. Jorge, L., Posadas, A. D., Lira, L. & Crestana, S. Algoritmo para cálculo da dimensão fractal de estruturas porosas através de processamento de imagens. In: Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos- ENEMP, 20, São Carlos, Out. 1992. Anais...São Carlos, UFSCar, 1993. V.1, p.155-161.
110. Block, A.W., Bloh, V. & Schllnhuber. Efficient box-counting determination of generalized fractal dimensions. Phys. Rev. A, 42(4), 1869-1874, 1990.
111. Bourke, P. Fractal box dimension calculator. Nova Zelandia 1992. (comunicação pessoal).
112. Tél, T., Fülöp, A. & Vicsek, T. Determination of fractal dimensions for geometrical multifractals. Physica A, 159, 155-166, 1989.
113. Bear, J. Dinamics of fluid in porous media. Amsterdam, s.ed., 1972. (American elsevier enviromental science series).
114. Jensen, M.H., Libchaber, A., Pelcé, P. & Zocchi, G. Effect of gravity on the saffman-taylor meniscus: theory and experiment. Phys. Rev. A, 35, 2221-2227, 1987.
115. De Gregoria, A.J. & Schwartz, L.W. Saffman-Taylor finger width at low interfacial tension. Phys. Rev., 58, 1742-1744, 1987.
116. Homsey, G.M. Viscous fingering in porous media. Am. Rev. Fluid. Mech., 19, 271-311, 1987.
117. Paterson, L. Radial fingering in a Hele-Shaw cell. J. Fluid. Mech., 113, 513-529, 1981.

118. Maloy, K.J., Feder, J. & Jossang, T. Viscous fingering fractals in porous media. Physical Review letter., 58(24), 2688-2691, 1985.
119. Witten, T.A. & Sander, L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomena. Physical Review Letteres., 47(19), 1400-1403, 1981.
120. Daccord, G., Nittmann, S. & Stanley, H.E. Fractal viscous fingers: experimental results. In: Stanley & Ostrowsky, eds. An growth and form. Boston, s.ed., 1986. 203-210.
121. Nittmann, J. Fractal viscous fingering: experiments and models. Physica 140A, 124-133, 1986.
122. Nagatani, T., Hydrodynamic instability and the structural phase transition in diffusion-limited aggregation with drift. Phys. Rev. A, 40(9), 5351-5355, 1989.
123. Daccord, G. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid. Phys. Rev. Letts., 58, 479-482, 1987.
124. Dias, M.M. & Wilkinson, D.J. Percolation with trapping. J. Phys. A., 191, 3131-3146, 1986.
125. Frette, V., Maloy, K.F., Boger, F., Feder, J. & Jossang, T. Diffusion-limited-aggregation-like displacement structures in a three-dimensional porous medium. Physical Rev. A., 42(6), 3432-3437, 1990.
126. Blumberg, R.L., Shlifer, G. & Stanley H.E. Monte Carlo tests of universality in a correlated-site percolation problem. J. Phys. A: Math. Gen., 13, L147-L152, 1980.
127. Roux, J-N. and Wilkinson, P. Resistance jumps in mercury injection in porous media. Phys. Rev. A, 37(10), 3921-3926, 1988.
128. Wilkinson, D. Percolation in immiscible displacement. Physical Rev. A., 34(2), 1380-1391, 1986.
129. Jacquin, Ch. G. & Adler. P.M. The fractal dimension of a gas-liquid interface in a porous medium. J. Colloid and Interfa. Sci., 107(2), 405-417, 1985.
130. Chang, W-L, Biggar, J.W. and Nielsen, D.R. Fractal description of wetting front instability in layered soils. Water Resources Research. (aceito para publicação).
131. Broadbent, S.R. and Hammersley, J.M. Percolation process I. crystals and mazes. Proc. Cambridge Phils. Soc., 53, 629-641, 1957.
132. Shante V.K.S. & Kirkpatrick, S. An introduction to percolation theory. Adv. Phys., 20, 325-357, 1971.

133. Zellen, R. Introduction percolation: a model for all seasons. Annals of the Israel Physical Society., 5, 1-57, 1983
134. Stauffer, D. Introduction to percolation theory. s.l., Taylor & Francis, 1985.
135. Ziff, R.M. Test of scaling exponents for percolation cluster perimeters. Phys. Rev. Lett., 58, 545-548, 1986.
136. Stauffer, D. Scaling theory of percolation clusters. Phys. Reports., 54, 1, 1979
137. Stanley, H.E. Introduction to phase transition and critical phenomena. 2. ed. Oxford, Clarendon, 1971.
138. Balberg, I. Recent developments in continuum percolation. Phil. Mag., 56(6), 991-1003, 1987.
139. Thompson, A.H., Katz, A.J. & Raschke, R.A. Mercury injection in porous media: a resistance devil's staircase with percolation geometry. Physical Review Letters., 38(1), 29-32, 1987.
140. Castelman, K.R. Digital image processing. N.Y., Prentice-Hall, 1979. 429p. (Signal Processing Series).
141. Gonzales, R.C. & Woods, R.E. Digital image processing. s.l., Addison-Wesley, 1992.
142. Jain, A.K. Fundamentals of digital image processing. s.l., Prentice-Hall, 1989.
143. Tozzi, C.L. & Magalhães, L.P. Sistemas Gráficos: técnicas de modelagem, desenho, PAC. Campinas, R. Vieira, 1991. 287p.
144. Dias, L.A.V., Neto, G.C., Barrera, Jr. & Souza, R.C.M. Imagens e computadores, o olho que tudo vê. Ci. Hoje, 7(37), 34-44, 1987.
145. Luyten, P. Humans under the spectrometer. Physics World., 36-40, 1990.
146. Pykett, I.L. NMR imaging in medicine. Scient. Amer., 246(5), 54-64, 1982.
147. Panepucci, H., Donoso, J.P., Tannús, A., Beckman, N. & Bonagama, T. Tomografia por ressonância magnética nuclear: novas imagens do corpo. Ci. Hoje., 4(20), 46-56, 1985.
148. Wehrli, F. The Origins and future of nuclear magnetic resonance imaging. Physics Today., 34-42, 1992.
149. Tannús, A. Desenvolvimento da tecnologia de tomografia por ressonância magnética nuclear. TORMN. São Carlos, USP-IFQSC, 1987. Tese Doutorado,

150. Masfield, P. & Morris, P.G. "NMR Imaging in Biomedicine". Adv. Magn. Reson., 1982. supp. 2.
151. Bottomley, P.A. NMR Imaging Techniques and Application: a Review. Rev. Sci. Instrum., 53(9), 1319-1337, 1982.
152. Slichter, C.P. Principles of magnetic resonance. 2.ed. Berlin, Springer-Verlag, 1980.
153. Shaw, D. Fourier transform N.M.R. spectroscopy. 2.ed. N.Y., Elsevier, 1984. (Studies in physical and theoretical chemistry, 30).
154. Bories, S.A., Charrier-Motjabi, M.C., Houi, D. & Raynaud, P.G. Christiansen effect, nuclear magnetic resonance (N.M.R) - magnetic resonance imaging (M.R.I). In: convective heat and mass transfer in porous media, Izmir, Turkey. 1990. Proceedings... s. 1., NATO Advanced Study Institute, 1990.
155. Bracewell, R. The fourier transform and its applications. N.Y. McGraw-Hill, 1978.
156. Cho, Z.H. Computerized tomography. Encyclop. Phys. Sci. Technol., 3, 507-544, 1987.
157. Ahluwalia, B.D. Tomographic methods in nuclear medicine: physical principles, instruments and clinical applications. Florida, CRC. Press, 1989.
158. Hounsfield, G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography): I. Description of system. British Journal of radiology, 46, 1016-1022, 1973.
159. Washburn, H.M. "Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. Proc. Nat. Acad. Sci., 7, 115-116, 1921.
160. Danielson, R.E. & Sutherland, P.L. Porosity. In: Method of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods. Madison, 1987.
161. Grimaldi, M. Modifications structurales d'un materiau limoneux soumis a un compactage dynamique. Sci. sol, 24, 269-284, 1990.
162. Ragab, R., Feyen, J. & Hillel, D. Effect of the method for determining pore size distribution on prediction of the Hydraulic conductivity function and of infiltration. Soil Sci., 134(2), 141-145, 1982.
163. Donohoe, G.W. Image processing short course with khoros. s.1, University of New Mexico, 1992.
164. Posadas, A.D., Crestana, S., Onody, R.N. and Jorge, L.A.C. Teoria fractal e percolação por invasão validadas na descrição do fluxo preferencial em um meio poroso. In: encontro sobre escoamento em meios porosos-ENEMP, 20, São Carlos-SP, 1992. Anais... São Carlos, UFScar, 1993. V.1., p. 141-153.

165. Mandelbrot, B.B. Fractals: form, chance and dimension. San Fransisco, Freeman, 1977
166. Posadas, D.A. and Crestana, S. Teoria fractal técnicas de imagem na caracterização da infiltração instável em um meio poroso não-saturado. In: encontro sobre escoamento em meios porosos-ENEMP, 19, Campinas-SP, Out. 1991. Anais... Campinas, UNICAMP, 1992. V.1, p.117-129.