

CIRO HUMES

**CONSIDERAÇÕES SOBRE A DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO
DE VAZIOS DE FILTROS DE PROTEÇÃO DE OBRAS GEOTÉCNICAS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração :
Engenharia de Solos

Orientador :
Paulo Teixeira da Cruz

1995

À Leila,

por ser a pessoa maravilhosa que é

Agradecimentos

- aos meus pais, Carlos (“ In Memoriam”) e Maria de Lourdes, que me deram a formação e a base para a elaboração deste trabalho.
- à minha amada esposa Leila, cujo amor e estímulo, foram a fonte de energia para a realização desta tese.
- às minhas queridas filhas Lilian, Ana Paula e Renata, pela paciência e “compreensão”.
- aos meus irmãos Carlos e Cláudio pela amizade sempre presente.
- aos meus sogros, João e Lourdes, pelo apoio irrestrito.
- ao Dr. Paulo Teixeira da Cruz, pela valiosa orientação, desde o meu mestrado.
- ao Prof. Dr. Araken Silveira pela bibliografia fornecida e disposição na troca de idéias no desenvolvimento deste trabalho.
- ao Dr. Carlos de Souza Pinto pela sugestão e ajuda na elaboração do modelo físico.
- ao Grupo CNEC: Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores S.A., pelo apoio ao meu desenvolvimento.
- à FEI : Faculdade de Engenharia Industrial, em particular ao Prof. Valter Prieto, chefe do Departamento de Engenharia Civil, pelo incentivo.
- a todos amigos e colegas que colaboraram durante esta jornada.

ÍNDICE

1 - Aspectos Gerais sobre Filtros de Proteção	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Histórico.....	3
1.3 - Mecanismo de Filtragem.....	10
1.4 Estabilidade Interna de Solos Granulares	14
1.5 - Análises Estatísticas.....	16
1.6 Resumo dos Pontos Principais.....	20
2 - Sobre a Determinação da Curva de Distribuição de Vazios de Filtros de Proteção	21
2.1 - Trabalhos de Silveira (1964, 1965, 1966).....	22
2.2 - Trabalho de de Mello (1977).....	35
2.3 - Trabalho de Wittmann(1979).....	39
2.4 - Trabalho de Musso-Federico (1983)	50
2.5 - Trabalho de Sherard e co-autores (1984).....	57
2.6 - Trabalho de Musso-Federico (1985)	59
2.7 - Trabalho de Tsutyia (1987).....	67
2.8 - Trabalho de Atmatzidis (1989).....	70
2.9 - Trabalho de Silveira (1993)	76
3 - Discussão dos Trabalhos sobre a Determinação da Curva de Distribuição de Vazios e dos Fatores Intervinentes	85
3.1 - Conceito de Vazio de Controle.....	86
3.2 - Sobre a Forma e Dimensão das Partículas dos Filtros	88
3.3 - Quanto à Compacidade do Filtro.....	91
3.4 - Determinação da Frequência de Ocorrência dos Vazios	92
3.5 - Resumo dos Pontos Principais	97
4 - Nova Proposta para a Determinação da Curva de Distribuição dos Vazios	99
4.1 - Uma- nova proposta.....	99
4.2 - Verificação da Proposta.....	103
4.2.1 - Comparação entre as Porosimetrias Obtidas Pelas Diversas Metodologias	103
4.2.2 - Tendência de Redução dos Maiores Vazios com a Graduação (CNU) do Filtro de Proteção	111
4.2.3 - Comparação com a Porosimetria Experimental de Sória e Co-Autores.....	113
4.2.4 - Comparação com um Modelo Físico.....	115
4.2.5 - Comportamento de Filtros Bem Graduados.....	124
4.2.6 - Análise dos Ensaio de Filtros de Sherard e Co-Autores.	124
4.2.7 - Análise dos Ensaio de Carreamento de Atmatzidis.....	131
4.3 - Conclusões.....	136
5 - Conclusões e Considerações Finais	137
 ANEXO I - ESTABILIDADE INTERNA DOS SOLOS	139
1.1- Histórico.....	140
1.2 - Lubochkov (1969).....	142
1.3 - De Mello (1975)	154
1.4 - Kezdi (1979).....	155
1.5 - Sherard (1982).....	156
1.6 - Kenney & Lau (1984, 1985 e 1986).....	157
1.7 - Tsutyia (1986, 1987).....	166
1.8 - Aberg (1992, 1993).....	168
1.9 - Skempton & Brogan (1994).....	172
1.10 - Resumo e Considerações finais.....	177
1.11 - Exemplo de Aplicação	179

ANEXO II - ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLOS GRANULARES....184

ANEXO III - PROGRAMA FILTRO.....189

BIBLIOGRAFIA.....205

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.2.1 - APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO PARA A AREIA C	6
FIGURA 1.2.2 - APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO PARA A AREIA A	7
FIGURA 1.2.3 - APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO PARA A AREIA B	8
FIGURA 1.3.1 - MECANISMO DE FILTRAGEM	11
FIGURA 2.1.1 - ESQUEMAS DE VAZIOS DE FILTROS ADOTADOS POR SILVEIRA (1964,1966) ...	24
FIGURA 2.2.1 - RESTRIÇÕES AO MÉTODO DE ARAKEN SILVEIRA, SEGUNDO DE MELLO(1977)	36
FIGURA 2.2.2 - FILTROS DE MUSSO-FEDERICO	38
FIGURA 2.3.1 - RESULTADOS DO TRABALHO DE WITTMANN(1979)	43
FIGURA 2.3.2 - REDUÇÃO DO COMPRIMENTO DE FILTRAGEM, SEGUNDO WITTMANN(1979) .	45
FIGURA 2.3.3 - REDUÇÃO DA POROSIMETRIA DO FILTRO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE FILTRAGEM, SEGUNDO WITTMANN(1979).	45
FIGURA 2.3.4 - ÁBACO PARA CÁLCULO DA POROSIMETRIA DE UM FILTRO	48
FIGURA 2.3.5 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS E POROSIMÉTRICAS DO PEDREGULHO ENSAIADO POR WITTMANN(1979)	49
FIGURA 2.4.1 - FILTROS ESTUDADOS POR MUSSO-FEDERICO	51
FIGURA 2.4.2 - GRÁFICOS $D_{v,x}/D_{v,y}$ VERSUS CNU	53
FIGURA 2.4.3.- VARIAÇÃO DO NÚMERO DE CONFRONTOS COM O NÚMERO DE VAZIOS (N_v)	55
FIGURA 2.6.1 - CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS E DE VAZIOS EM VOLUME -	64
FIGURA 2.6.2 - COMPARAÇÃO ENTRE POROSIMETRIAS OBTIDAS PELO ENFOQUE DE ENTROPIA (DIÂMETRO EQUIVALENTE) E DE SILVEIRA(VOLUME)	66
FIGURA 2.7.1 - ESQUEMA DE CÁLCULO DOS VAZIOS, SEGUNDO TSUTYIA(1987)	68
FIGURA 2.8.1 - CURVAS DE VAZIOS CONFORME ATMATZIDIS(1979)	71
FIGURA 2.8.2 - RESULTADOS DO TRABALHO DE ATMATZIDIS(1979)	73
FIGURA 2.9.1 - TRABALHO DE SILVEIRA(1993)	78
FIGURA 2.9.2 - ESQUEMA DO ENSAIO DE SÓRIA ET AL(1993)	80

FIGURA 2.9.3 - MATERIAIS ENSAIADOS	80
FIGURA 2.9.4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE CURVA DE VAZIOS	82
FIGURA 2.9.5 - FATORES INTERVENIENTES NA CURVA DE VAZIOS	82
FIGURA 4.2.1 - GRANULOMETRIAS EM MASSA DOS FILTROS ESTUDADOS POR MUSSO-FEDERICO.....	104
FIGURA 4.2.2 - GRANULOMETRIAS EM ÁREA DOS FILTROS ESTUDADOS POR MUSSO-FEDERICO.....	105
FIGURA 4.2.3 - DISTRIBUIÇÃO DOS VAZIOS DOS FILTROS DE MUSSO-FEDERICO EM FUNÇÃO DAS ÁREAS DAS PARTÍCULAS, CONFORME HUMES	106
FIGURA 4.2.4 - COMPARAÇÃO ENTRE AS POROSIMETRIAS CALCULADAS	109
FIGURA 4.2.5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS POROSIMETRIAS CALCULADAS	110
FIGURA 4.2.6 - GRÁFICO $D_{v,85} / D_{50} \times CNU$, PARA AS HIPÓTESES DE SILVEIRA E HUMES....	112
FIGURA 4.2.7 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA EXPERIMENTAL DE SÓRIA E CO-AUTORES E AS CURVAS TEÓRICAS DE SILVEIRA E HUMES.....	114
FIGURA 4.2.8 - ESQUEMA DO MODELO FÍSICO	116
FIGURA 4.2.9 - POROSIMETRIA DE FILTROS BEM GRADUADOS COM MESMOS 10% DE FINOS (CONFORME HUMES).....	122
FIGURA 4.2.10 - COMPARAÇÃO DE POROSIMETRIAS DE FILTROS BEM GRADUADOS, CONFORME SILVEIRA E HUMES.....	123
FIGURA 4.2.11A - ESQUEMA DE ENSAIO POR SHERARD E CO-AUTORES(1984)	126
FIGURA 4.2.11B- GRANULOMETRIA DAS AREIAS USADAS POR SHERARD E CO-AUTORES(1984)	126
FIGURA 4.2.12A - GRANULOMETRIA DOS FILTROS ENSAIADOS POR SHERARD E CO - AUTORES (1984).....	127
FIGURA 4.2.12B- RELAÇÃO D_{15} / D_{85} OBTIDA NOS ENSAIOS EFETUADOS POR SHERARD E CO-AUTORES(1984).....	127
FIGURA 4.2.13 - POROSIMETRIAS DOS PEDREGULHOS ENSAIADOS POR ATMATZIDIS	132
FIGURA 4.2.14 - CURVAS DE PENETRAÇÃO PREVISTAS.....	135
FIGURA I.2.1 - CURVA GRANULOMÉTRICA LIMITE DE LUBOCHKOV.....	143
FIGURA I.2.2. - MATERIAIS DE GRANULOMETRIA CONTÍNUA E DESCONTÍNUA	143
FIGURA I.2.3 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS LIMITE E QUALQUER	143

FIGURA I.6.1 - MATERIAIS ESTÁVEIS ENSAIADOS APUD KENNEY E LAU(1984)	158
FIGURA I.6.2 - MATERIAIS INSTÁVEIS ENSAIADOS	158
FIGURA I.6.3 - MÉTODO DE CÁLCULO DA CURVA FORMA DE KENNEY E LAU	160
FIGURA I.6.4 - CURVAS FORMAS OBTIDAS DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS POR KENNEY E LAU	161
FIGURA I.6.5 - CRITÉRIO PARA AVALIAR A INSTABILIZAÇÃO DO MATERIAL DE KENNEY E LAU(1984)	163
FIGURA I.8.1 - CORDAS DOS GRÃOS E VAZIOS APUD ABERG(1993)	169
FIGURA I.9.1 - RELAÇÃO ENTRE GRADIENTE CRÍTICO E ÍNDICE DE ESTABILIDADE APUD SKEMPTON E BROGAN(1994)	175
FIGURA II.1 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS EM MASSA DOS MATERIAIS ESTUDADOS	185
FIGURA II.2 - DISTRIBUIÇÃO EM NÚMERO DE PARTÍCULAS	186
FIGURA II.3 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM ÁREA LATERAL	187

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - QUADRO-SÍNTESE DOS CRITÉRIOS DE FILTRO OBTIDOS A PARTIR DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO	4
TABELA 2.1.1 - DETERMINAÇÃO DA CURVA DE VAZIOS - RELAÇÃO $(D_i/D_1)= 1:2:3:4:5$	26
TABELA 2.1.2 - DETERMINAÇÃO DA CURVA DE VAZIOS - RELAÇÃO $(D_i/D_1)= 1:2:4:6:8$	27
TABELA 2.1.3 - DETERMINAÇÃO DA CURVA DE VAZIOS - RELAÇÃO $(D_i/D_1)= 1:2:4:8:16$	28
TABELA 2.3.1- EQUAÇÕES PROPOSTAS POR WITTMANN(1979)	41
TABELA 4.2.1 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES PREVISTOS E OBTIDOS NO MODELO FÍSICO	120
TABELA 4.2.6.1 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CARREAMENTO PARA O D_T DOS FILTROS ENSAIADOS POR SHERARD E CO-AUTORES	128
TABELA 4.2.6.2 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CARREAMENTO PARA O D_S DOS FILTROS ENSAIADOS POR SHERARD E CO-AUTORES	129
TABELA I.11.1 - VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE INTERNA DOS FILTROS DE MUSSO-FEDERICO ATRAVÉS DO CRITÉRIO DE SHERARD	180
TABELA I.11.2 - ESTABILIDADE INTERNA - FILTRO H - CRITÉRIO DE KENNEY & LAU	182
TABELA I.11.3 - ESTABILIDADE INTERNA - FILTRO E - CRITÉRIO DE KENNEY & LAU	182
TABELA I.11.4 - ESTABILIDADE INTERNA - FILTRO G - CRITÉRIO DE KENNEY & LAU	183
TABELA I.11.5 - ESTABILIDADE INTERNA - FILTRO D - CRITÉRIO DE KENNEY & LAU	183

Nomenclatura e Convenções

Material-base : solo ou material submetido a um fluxo de água, que se deseja proteger.

Filtro : material constituído de partículas granulares inertes que tem por função impedir o arraste das partículas do material-base e drenar a vazão afluyente.

Vazios ou Poros do Filtro : Espaços existentes entre as partículas do filtro.

Vazios de Controle do Filtro : Espaço entre os agrupamentos das partículas do filtro que condicionam a passagem ou o bloqueio de uma partícula do material-base.

Diâmetro do Vazio de Controle : diâmetro da maior partícula esférica que pode atravessar o vazio. Quando considera-se o vazio formado pelo agrupamento de três partículas esféricas, é o diâmetro da esfera tangente inscrita às partículas formadoras do vazio.

dv_x : diâmetro do vazio correspondente à porcentagem x, de diâmetros menores que dv_x.

dx : diâmetro da partícula do material-base correspondente à porcentagem x, de diâmetros menores que dx.

D_x : diâmetro da partícula do filtro correspondente à porcentagem x, de diâmetros menores que D_x.

RESUMO

A discussão das metodologias para a determinação da curva de distribuição de vazios (porosimetria) de filtros de proteção, e a proposta de uma nova metodologia são os principais tópicos deste trabalho.

São abordados os principais trabalhos desde a teoria pioneira de Silveira.

Com o objetivo de verificar a adequação da nova proposta, são feitas comparações entre os valores previstos e os dados experimentais existentes na literatura técnica, bem como com os dados obtidos em um modelo físico.

Também é apresentado neste trabalho, um relato da situação do conhecimento sobre a estabilidade interna de materiais granulares.

ABSTRACTS

The discussion of the methods for determination of void-size distribution curves of protective filters, and the suggestion of a new approach to this determination, are the main subjects of this work.

The discussion covers all the main contributions since Silveira's pioneer theory.

The void size curves computed by the new approach satisfactorily agree with data from laboratory tests and results from a physical model.

A revision report for internal stability for granular soils is also presented .

Apresentação

Esta tese tem como objetivos principais discutir os trabalhos existentes sobre a determinação da curva de distribuição de vazios (porosimetria) de filtros de proteção, e apresentar uma nova metodologia para este cálculo.

No Capítulo 1, são abordados os aspectos referentes ao desenvolvimento dos estudos de filtros, ressaltando a importância do conhecimento da porosimetria em função dos seus vazios de controle, para permitir a análise de carreamento do material-base no interior do filtro.

No Capítulo 2, é feita uma análise crítica dos trabalhos existentes para a determinação da curva de distribuição de vazios, desde o trabalho pioneiro de Silveira(1964).

No Capítulo 3, é feita uma discussão e uma síntese da análise dos trabalhos apresentados no capítulo anterior, com ênfase na sua adequabilidade para utilização em problemas de filtração.

No Capítulo 4, é proposta uma metodologia para o cálculo da porosimetria de um filtro, a partir da sua distribuição granulométrica.

A porosimetria obtida através da proposta desta tese mostra uma boa concordância quando é comparada com dados de ensaios de laboratório da literatura técnica, e com valores obtidos de um modelo físico. Os resultados obtidos mostram-se adequados mesmo para filtros bem graduados, o que não acontecia com as teorias anteriores.

No Anexo I, efetua-se uma análise dos trabalhos que tratam da estabilidade interna de materiais granulares bem graduados. Este aspecto é importante, pois um material só pode ser usado como filtro se for internamente estável.

No Anexo II apresenta-se um estudo da distribuição granulométrica de solos granulares em função da massa, área lateral ou número das partículas.

No Anexo III apresenta-se a listagem e um exemplo de aplicação do Programa Filtro para computador pessoal (linguagem QBASIC).

Este programa realiza o cálculo da porosimetria do filtro, o qual pode ser discretizado em até dez diâmetros, o que gera duzentos e vinte tipos de vazios. Ele também efetua a análise de carregamento através da metodologia de Silveira(1964).

1 - Aspectos Gerais sobre Filtros de Proteção

1.1 - Introdução

Este trabalho trata da determinação da curva de vazios (porosimetria) de filtros de proteção constituídos de materiais granulares.

O conhecimento da porosimetria é necessário para a realização da análise de carreamento das partículas do material-base, que se quer proteger.

Através da teoria probabilística de Silveira(1964), conhecida a porosimetria, é possível determinar o percurso que uma partícula do material-base (d), terá no interior do filtro até encontrar um vazio (d_v) menor, que interrompa o seu transporte ($d_v < d$).

Um conceito fundamental nos estudos de filtragem, é que o vazio (poro) do filtro deve ser caracterizado pela sua dimensão de controle, isto é, pela dimensão que controla a passagem ou o bloqueio da partícula do material-base. Esta dimensão é associada ao diâmetro da maior partícula esférica que pode atravessar o vazio (poro).

Consequentemente, para problemas de filtragem, a distribuição de vazios deve ser determinada em termos de vazios de controle, também denominados de passagens, porque, novamente ressaltando, são eles que condicionam o carreamento ou não do material-base.

A seguir, antes de iniciar a análise dos trabalhos existentes sobre a determinação da distribuição de vazios de filtros de proteção, serão apresentados um histórico e uma análise estatística dos critérios de filtros convencionais, que são baseados principalmente em relações granulométricas entre partículas do material-base (d) e do filtro (D).

1.2 - Histórico

No início da década de 1920, Terzaghi* propôs a utilização de filtros invertidos para o combate à erosão por percolação de água através da fundação da barragem de Bou-Hanifia, no norte da África. Em 1922 o registro de patentes da Áustria forneceu-lhe a patente desta medida.

Terzaghi postulou que o filtro de uma obra de terra deveria ser mais permeável que o material-base, de modo a escoar toda a vazão pelo maciço sem que se desenvolvessem subpressões elevadas, e que ao mesmo tempo impedisse o arraste de partículas do material base.

No período de 1938 e 1939 na Universidade de Harvard, Bertram (1940) realizou a primeira pesquisa experimental para a determinação de critérios de filtro baseados em relações granulométricas. Seguiram-se diversas pesquisas semelhantes, cujos principais resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 1.1 .

Baseado nestas premissas ele propôs as seguintes relações granulométricas entre o filtro e o material-base:

- Critério de Estabilidade : $D_{15}^{**} < 4 a 5 d_{85}$ (1.2.1)

- Critério de Permeabilidade : $D_{15} > 4 a 5 d_{15}$ (1.2.2)

*Terzaghi, K. (1922) - "Der Grunbruch on stauwerken und seine Verhutung ' Die Wasser-Kraft, vol 17, pp: 445-449, em Thanikachalam - Sakthivadivel (1974).

**A proposta original é $D_{15} < 4 d_{85}$, passando a ser conhecida como $D_{15} < 4 a 5 d_{85}$ no meio técnico, após a pesquisa do U.S. Corps of Engineers(1941).

TABELA 1.1

QUADRO-SÍNTESE DOS CRITÉRIOS DE FILTRO OBTIDOS A PARTIR DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Autor	Data	Material-base			Filtro			Fluxo de Água		Critérios de Filtros/Observações
		Material	CNU	Espesura (cm)	Material	CNU	Espesura (cm)	Direção	i	
Terzaghi	1922	-	-	-	-	-	-	-	-	$D_{15} \leq 4d_{85}$ e $D_{15} \geq 4D_{15}$. Este critério foi proposto sem base experimental.
Bertram	1940	Areias	$< 1,5$	6,0	Areias (grãos arredondados e angulares)	$< 1,5$	6,0	Ascendente e descendente	6-20	$D_{15} \leq 6d_{85}$ e $D_{15} \geq 9d_{15}$. Filtros com $CR \geq 50\%$
U.S. Corps of Engineers	1941	Areia	2,0	1,0	Areias / areias com pedregulhos	3,0-7,5	15,2	Descendente	1-2	$D_{15} \leq 5d_{85}$. A curva granulométrica do filtro deve ser paralela a do material-base ($D_x/d_x \leq 25$).
Filtros Uniformes	1955	Siltes e areias	2-7*	20,3	Areia/areia com pedregulhos	2	20,3	Descendente	4-45	<ul style="list-style-type: none"> - Diâmetro máximo do filtro = 3". - % que passa na # 200 menor que 5 %. - As curvas devem ser paralelas na direção dos finos. - Deve-se desprezar a fração $> \# 4$, do material-base.
Karpoff	1955	Siltes e silte arenoso	10**	20,3	Areia/areia com pedregulhos	4-20**	20,3	Descendente	4-45	<ul style="list-style-type: none"> * Feito um ensaio com CNU = 10. ** Feito um ensaio com CNU = 30. *** Foram feitos apenas 6 ensaios.
Filtros de Britas	1955	Areia, areias com pedregulhos	3-5	20,3	Britas ***	3-5	20,3	Descendente	-	
Zweck e Davidenkoff	1957	Siltes areias e pedregulhos	$< 1,5$	12-20	Areias, pedregulhos	$< 1,5$	12-30	Ascendente, Descendente e horizontal	0,5-3,0	$D_{50} / d_{50} \leq (5 \text{ a } 30)$. dependendo da direção do fluxo, gradiente hidráulico e granulometria do material-base.
Thanikachalam e Sakthivadivel	1974	Siltes e areias	-	-	Areias e pedregulhos	$\leq 32^*$	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - $\log (D_{10}/d_{10-3}) = 1,55/\log((d_{10}-0,001) 10^3)$ - $D_{60}/D_{10} = 0,915 (D_{10}/d_{10}) - 4,575$ * O critério foi baseado na reanálise das pesquisas de outros autores.
Sherard e Coautores	1984	Siltes e areias	$< 1,5$	5,1-10,2	Areias, areia com pedregulhos	$\leq 6,5$	10,2-20,3	Descendente	400-800	$D_{15} \leq 5d_{85}$ (Observa-se que a relação limite obtida foi igual a $D_{15} \leq 9d_{85}$). Filtros com $CR \geq 80\%$, $D_{15} \geq 1,00$ mm e $CNU \leq 10$.

APUD HUMES (1985)

O critério de estabilidade, $D_{15} < 4 \text{ a } 5 d_{85}$, admite que a dimensão dos vazios do filtro está associada à sua fração fina (representada pelo D_{15}) e que o material-base possui uma granulometria contínua e, assim, ao ser impedido o arraste de sua fração grossa (representada pelo d_{85}), esta impedirá o arraste da fração fina por auto-filtragem. Na Figura 1.2.1 a 1.2.3 apresentam-se exemplos de aplicação dos principais critérios de filtro baseados em relações granulométricas para as areias C, B e A, onde as areias A e B respectivamente, correspondem às frações com grãos menores e maiores que 0,50 mm da areia C. Como os critérios fixam normalmente apenas um diâmetro do filtro, adotou-se graduações uniformes para todos os critérios, para facilitar a comparação entre os mesmos. Observa-se que existem diferenças sensíveis entre alguns critérios e que os filtros dimensionados para o material C, não atendem aos critérios de filtro aplicados à areia A, que é a fração “fina” de C.

Uma análise detalhada destes critérios é apresentada em Humes (1985).

Para materiais-base coesivos, também foram apresentados critérios de filtro baseados na sua resistência à tração (Davidenkoff (1955), Zaslavsky-Kassif(1965), Folque(1977)), tensão de fluência (Wolsky et all (1970)) e permeabilidade do filtro (Vaughan-Soares (1978)).

De Mello (1977) condena o uso destes critérios pois eles não levam em consideração que o fenômeno de “piping” (erosão interna) é regido pela estatística dos extremos, isto é, a resistência à tração (ou outra propriedade) que condicionará o processo, não é a que se determina em ensaios onde a amostra é homogênea e bem compactada, e sim aquela existente em uma zona mal compactada, na ligação de duas camadas de barragem ou em uma descontinuidade.

FIG . 1.2.1 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO PARA A AREIA C

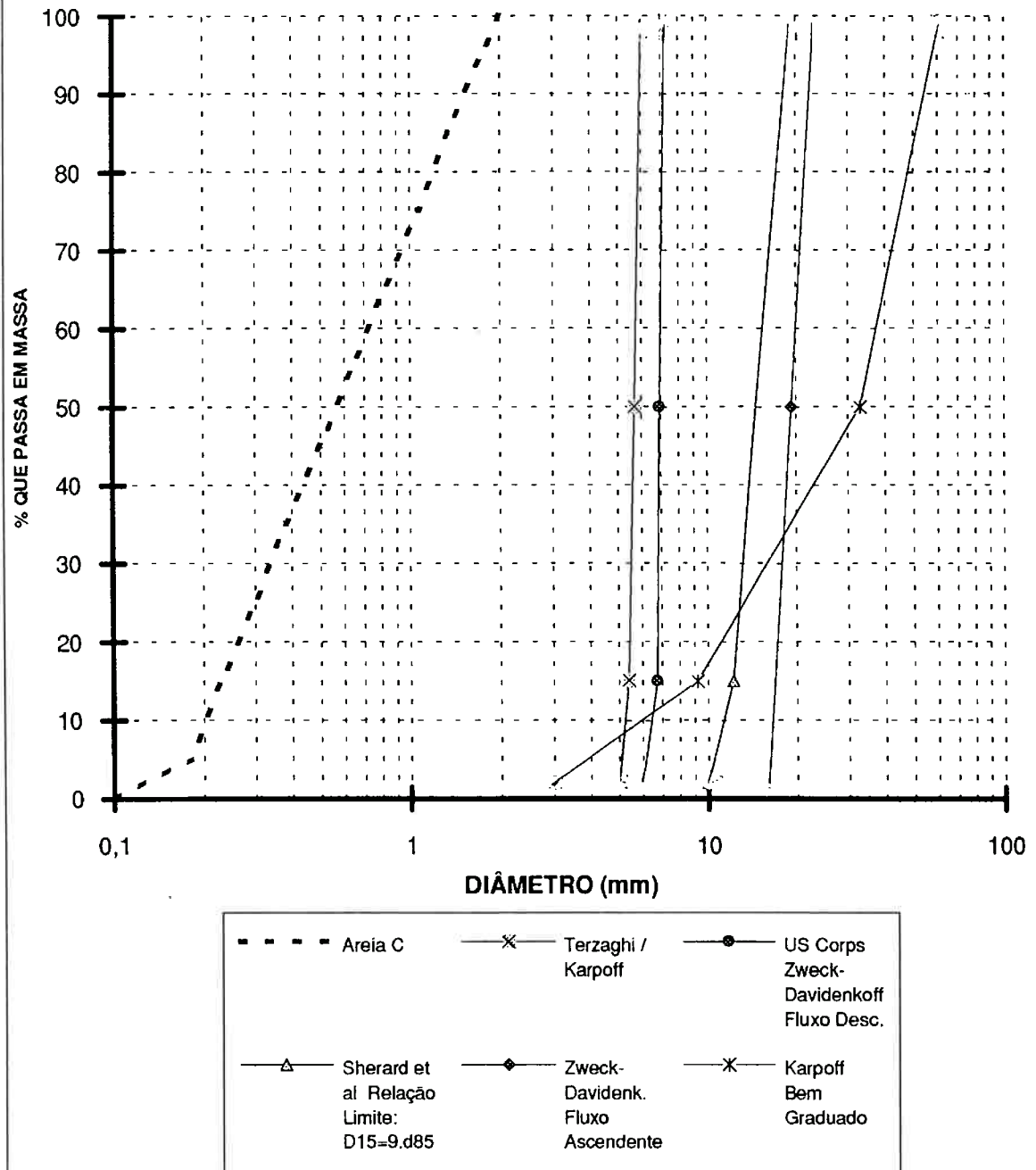


FIG 1.2.2 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO PARA A AREIA A

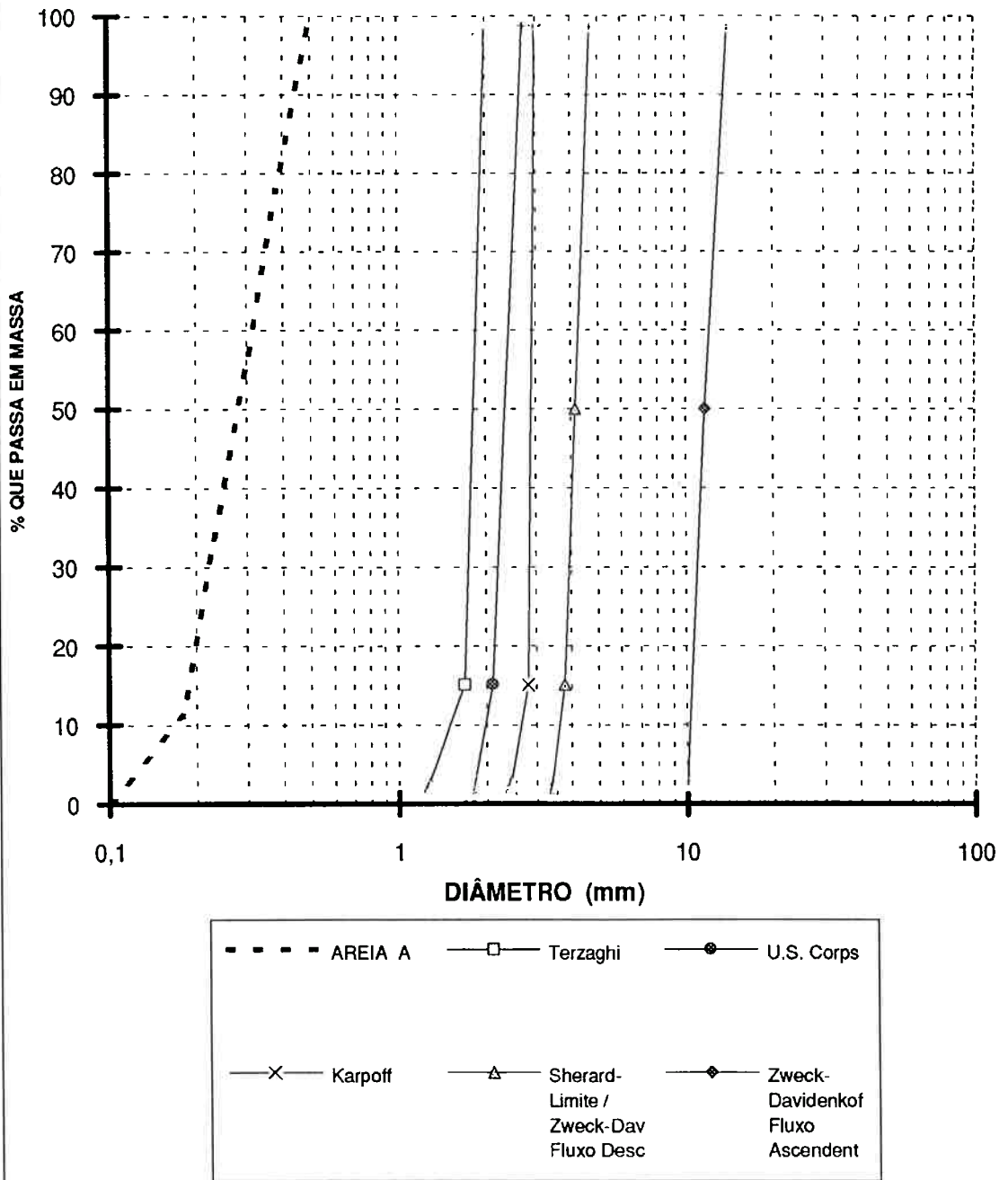
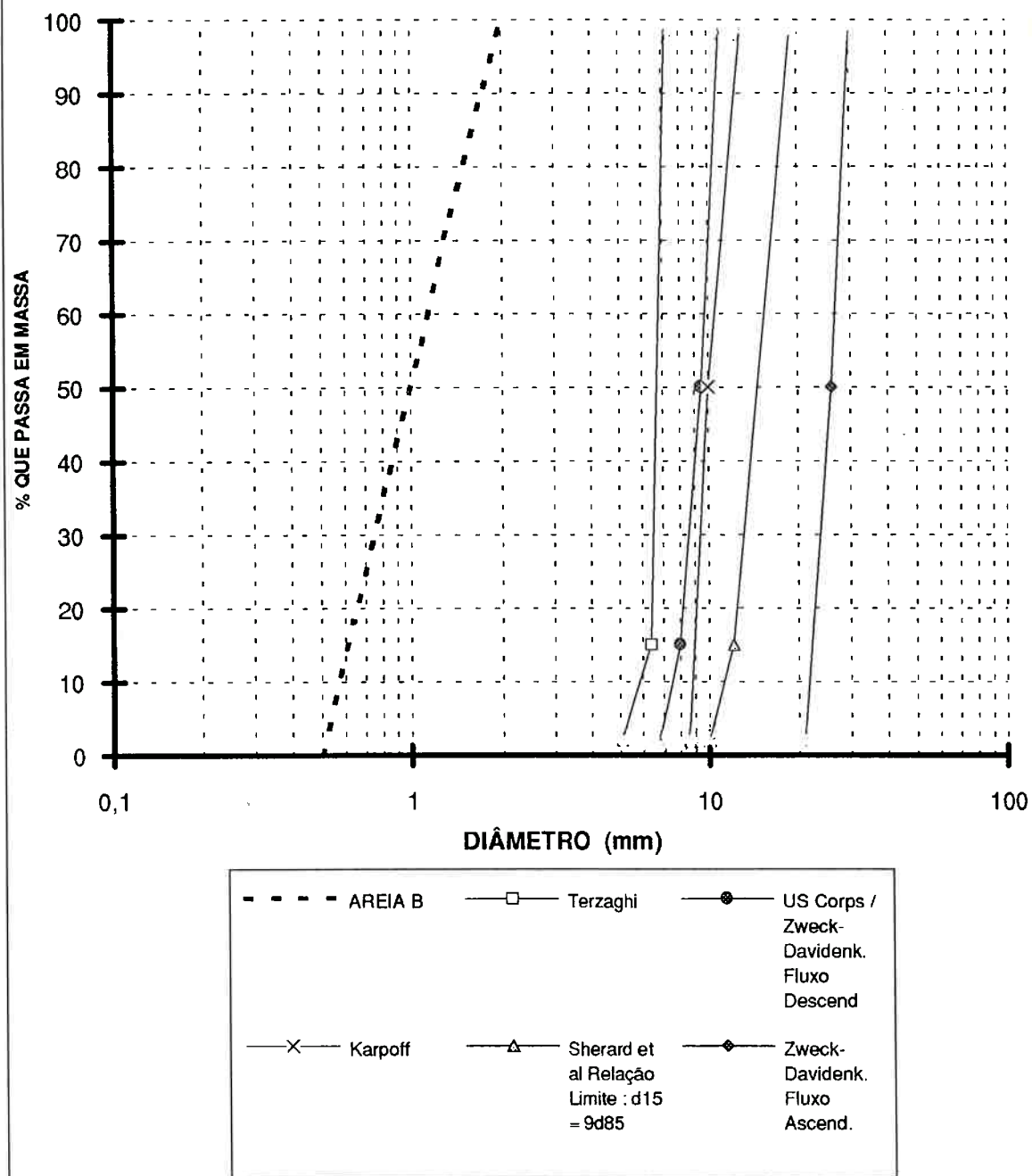


FIG 1.2.3 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO PARA A AREIA B



O mesmo tipo de comentário vale para a determinação do gradiente crítico destes critérios, pois ele não pode ser associado ao gradiente que ocorre no ensaio, onde a geometria envolvida é bem definida. O gradiente no fenômeno de “piping” (erosão interna) é função de condicionantes tais como trincas, fissuras e caminhos preferenciais de percolação de caracterização impossível.

Concluindo De Mello recomenda que a proteção contra o “piping” (erosão interna) de barragens, deve ser feita através do dimensionamento do filtro de proteção com base na retenção das partículas ou agregados de partículas do solo coesivo pelos poros do filtro, independentemente das propriedades intrínsecas do material-base e também através da inclinação do filtro de modo que atuem somente tensões de compressão na sua interface. Tal medida favorece a formação de arcos de partículas do material-base sobre as entradas do filtro, impedindo o arraste do material-base. Em Humes (1985) é feita uma análise detalhada destes critérios e dos aspectos envolvidos.

Silveira (1964) inovou os estudos de filtro ao apresentar uma metodologia para a determinação da curva de distribuição de vazios (porosimetria) de um filtro, bem como uma análise probabilística que permite o cálculo do número de confrontos (n) que uma partícula de um material-base (d) tem com vazios do filtro (d_v) até confrontar-se com $d_v < d$. Esta análise torna possível o cálculo da penetração $S = n \times s$ (onde s = percurso em cada confronto) das partículas do material-base no interior do filtro.

Como o número de confrontos é função da curva de distribuição dos vazios, a sua correta determinação é de fundamental importância para a análise de carreamento das partículas do material-base, e será o tema desta tese.

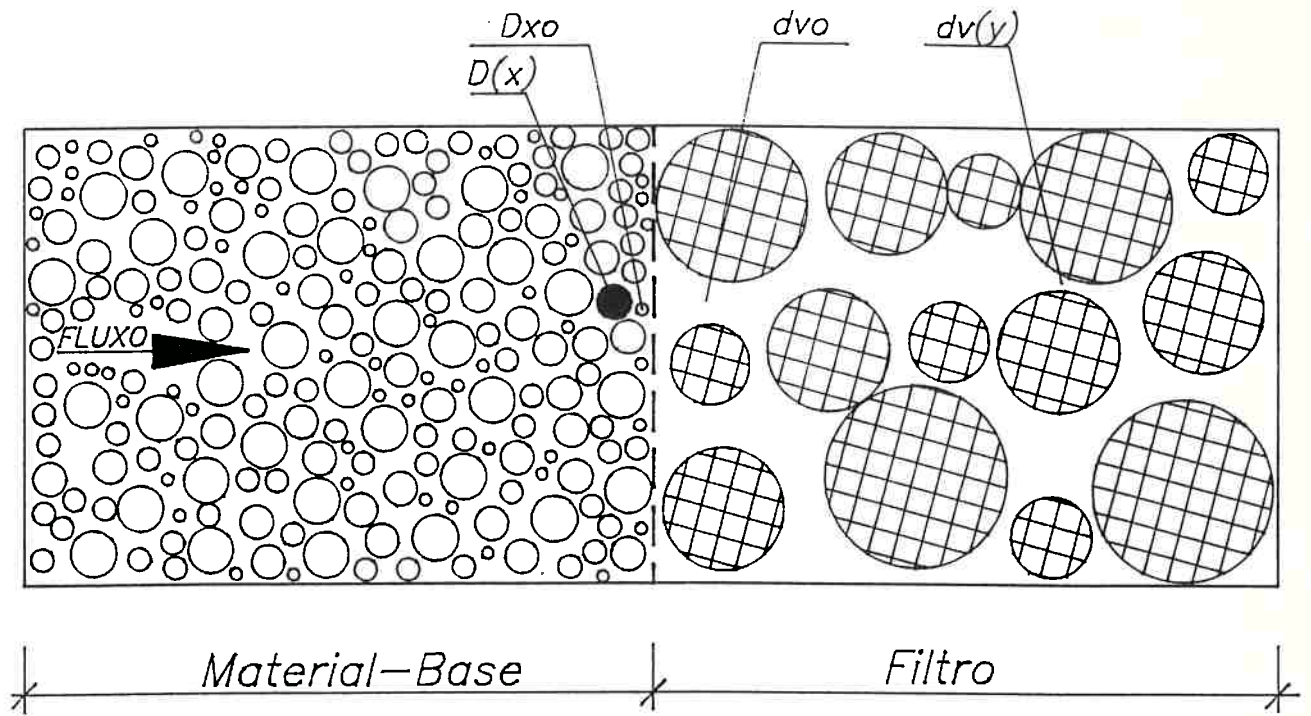
1.3 - Mecanismo de Filtragem

A Figura 1.3.1 apresenta um esquema do mecanismo de filtragem que ocorre na interface entre um filtro e o material-base que ele protege, quando ambos estão sujeitos a um fluxo d'água suficientemente severo, para carrear partículas do material-base.

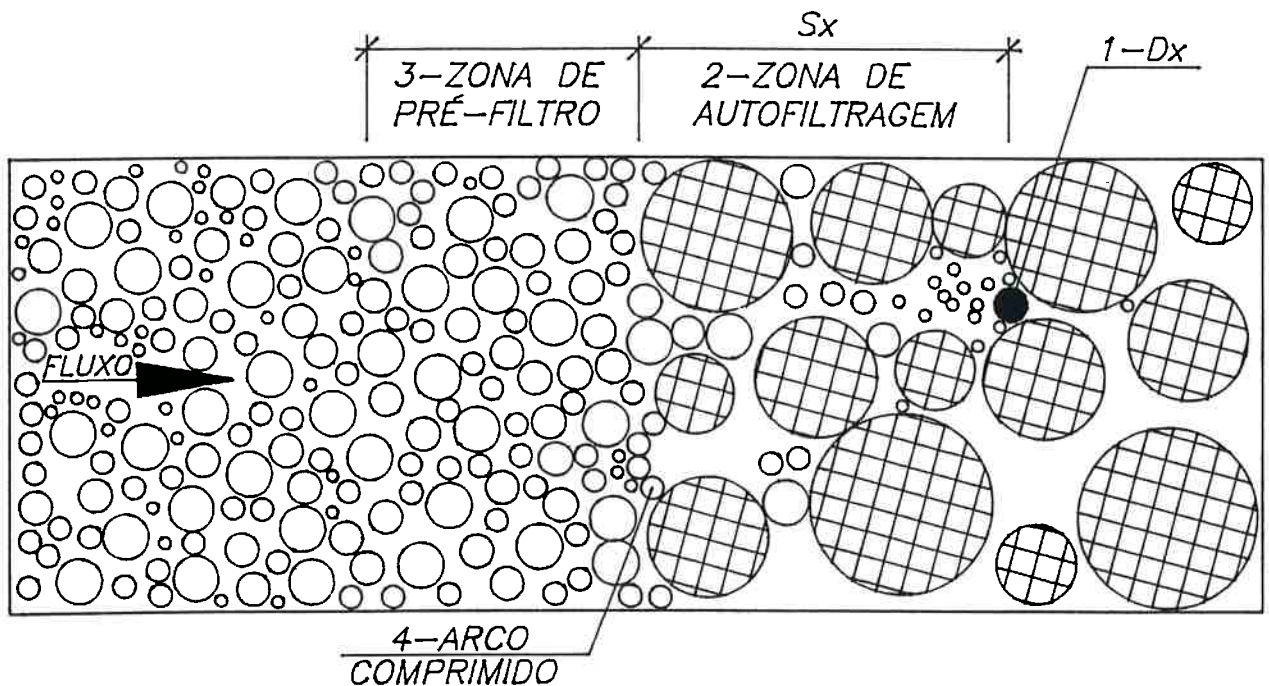
Se todas as partículas do material-base (d_0) fossem maiores que os vazios (d_v) na interface do filtro, não haveria penetração das mesmas no interior do mesmo, e o estado inicial não se alteraria (ver Figura 1.3.1a). Todavia, é válido esperar que exista uma fração de partículas do material-base menores que uma determinada parcela dos vazios do filtro, o que torna possível o arraste de partículas com dimensão $d(x)$ para o interior do filtro, as quais serão transportadas até uma distância S_x , quando encontrarão um vazio com dimensão $d_v(y)$, tal que $d_v(y) \leq d(x)$, conforme mostra a Figura 1.3.1b. Ao ocorrer o bloqueio desta partícula, através deste porocanal (sequência de vazios interligados) uma partícula $d(x-1)$ com dimensão ligeiramente inferior a $d(x)$, poderá ser carreada até no máximo uma distância igual a S_x , uma vez que os vazios formados entre a partícula $d(x)$ e o agrupamento de partículas do filtro que formam o vazio $d_v(y)$ são menores que $d(x-1)$. Ressalta-se, que o percurso desta partícula, poderá ser menor, porque ela poderá confrontar-se com um vazio $d_v(y-1) \leq d(x-1)$, a uma distância de transporte menor que S_x .

Consequentemente, forma-se uma zona de autofiltragem no interior do filtro, que é responsável pela estabilização do carreamento do material-base.

Como pode ser notado, a interação material-base x filtro não é simples, e torna-se mais complexa, quando se tem em mente o fato de que a distribuição dos vazios na zona de auto-filtragem se altera, torna-se mais fina, a medida que são capturadas as partículas do material-base.



a - Situação Inicial



b - Situação Estabilizada

1 - Retenção dos grãos maiores que impedem o transporte dos grãos menores

2 - Formação da zona de autofiltragem no interior do filtro

3 - Formação da zona de pré-filtro no material-base

4 - Criação de arcos comprimidos sobre as entradas do filtro

FIGURA 1.3 - MECANISMO DE FILTRAGEM

Salienta-se ainda que, quanto mais amplas forem a distribuição granulométrica do material-base e a porosimetria do filtro, mais importante é a análise de carreamento segundo o enfoque probabilístico de Silveira (1964), pois ela é a ferramenta que permite responder as seguintes questões fundamentais para julgar o desempenho de um filtro (ver Humes 1985 e 1986a) :

- a - Qual o comprimento de filtragem necessário para bloquear o d_{85} do material-base ?
- b - Qual é a quantidade de partículas que pode penetrar e atravessar o filtro, antes que ocorra a autofiltragem ?
- c - Após o bloqueio do d_{85} , qual é a quantidade de partículas que atravessa a zona de autofiltragem ?

Para responder esta última questão, é necessário simular a formação da zona de autofiltragem e determinar a sua porosimetria. Sem intenção de esgotar este assunto, que não é o tema desta tese, isto é possível considerando que a espessura da zona de autofiltragem é igual ao percurso S_{85} do diâmetro d_{85} e que após o seu bloqueio, não existem nesta zona vazios superiores a este valor , conforme propõe Humes em seus trabalhos de 1985 e 1986.

Outro modo de simular a zona de autofiltragem é através do aplicação das idéias de Kjellman(1964) e Silveira(1965), que serão apresentadas no capítulo 2, que foram utilizadas para o dimensionamento das transições da Barragem Pedra do Cavalo, conforme mostra Humes(1985).

O mecanismo de filtragem descrito acima, é representativo do que ocorre no filtro. Observa-se que o material-base foi levado em conta apenas como fornecedor de partículas, embora ele também desempenhe um papel estabilizante, pois através do bloqueio das suas

partículas maiores na interface do filtro e da saída de suas partículas mais finas para o interior do filtro, forma-se uma zona denominada de pré-filtro junto a superfície do filtro, que contribui para impedir o carreamento da fração fina do material-base.

A zona de pré-filtro apresenta uma granulometria intermediária entre o material-base e o filtro, e a sua espessura pode ser estimada através do trabalho de Silveira(1965). Uma abordagem conceitual deste aspecto é apresentada por este autor em 1978, a qual mostra um caminho promissor para o estudo da influencia do pré-filtro no mecanismo de filtragem, que poderá ser até um parâmetro de julgamento da eficiência do filtro.

Um outro efeito estabilizante que pode ocorrer, é o bloqueio das entradas do filtro pela formação de arcos de partículas comprimidas sobre as mesmas, que depende da direção do fluxo d'água, estado de tensão do maciço e granulometria do material-base. Zweck-Davidenkoff(1957) e Thanikachalam-Saktnivadivel(1974) mostram que para materiais-base não coesivos, quanto mais fino o solo, mais propícia é a formação de arcos comprimidos. Contudo, deve-se estar atento que estes arcos são facilmente destruídos através de vibração, conforme verificado nas pesquisas do U.S. Corps of Engineers(1941) e de Sherard e co-autores(1984).

Tendo em vista o exposto, pode-se afirmar que sempre é possível haver um carreamento de partículas do material-base para o interior do filtro, quando as condições de fluxo são suficiente severas para provocar o transporte das partículas.

Este carreamento depende fundamentalmente da relação entre as dimensões das partículas do material-base e dos vazios do filtro, que determinam as dimensões e características das zonas de autofiltragem e de pré-filtro.

1.4 - Estabilidade Interna de Materiais Granulares

Um aspecto muito importante que está implícito no mecanismo de filtragem, é a continuidade granulométrica tanto do filtro como do material-base. O material não deve possuir falta ou excesso de determinados grãos de modo que as partículas da fração fina possam ser transportadas através dos vazios formados pela estrutura da fração grossa. Este tipo de erosão interna é denominada de sufosão pelos autores russos e do leste europeu e de instabilidade interna, mais recentemente, pelos pesquisadores ocidentais.

A instabilidade interna ocorre principalmente em materiais com granulometria descontínua (“gap graded”), caracterizados por terem um trecho sub-horizontal na curva granulométrica, e em materiais muito bem graduados ($CNU > 10$) que apresentam uma curva granulométrica com concavidade voltada para cima.

Em princípio, se o material-base não apresenta estabilidade interna, o seu filtro de proteção deve ser dimensionado para a sua fração fina, tendo em vista que ela é ‘livre’, isto é, pode ser transportada independentemente do arraste da fração grossa.

Se um material indicado para a execução do filtro não possuir estabilidade granulométrica, ele não deverá ser utilizado, porque a perda de sua fração fina poderá comprometer a estabilidade geral do maciço, além do fato de que a caracterização da porosimetria a ser utilizada para verificação do desempenho do filtro fica indefinida, uma vez que seria necessário conhecer qual é a fração fixa do material, e ainda não se dispõe de uma metodologia adequada para tanto.

Tendo em vista o exposto, a utilização de um material para construção de um filtro de proteção, é condicionada à verificação de sua estabilidade interna, principalmente se o material é bem graduado.

No Anexo I será apresentada a situação do conhecimento sobre a estabilidade interna de materiais granulares que, conforme exposto, é um pré-requisito para o estudo de filtros.

1.5 - Análises Estatísticas

Honjo-Veneziano (1989) apresentam uma análise estatística de 287 ensaios de filtro para materiais-base granulares.

Estes ensaios foram classificados em :

- Estáveis : ensaios onde não houve carreamento do material-base.
- Instáveis : ensaios onde o material-base atravessou facilmente no filtro.
- Colmatados : ensaios onde há penetração do material-base (“clogging”) até que se atinja uma condição estável.

Os ensaios onde houve colmatação, foram considerados instáveis a favor da segurança e também, porque assim foram classificados em muitas pesquisas.

Um aspecto muito importante que deve ser levado em consideração ao se analisar pesquisas experimentais, é que muitas delas, foram realizadas com materiais-base muito uniformes, em geral com materiais com granulometria compreendida entre 2 peneiras de aberturas próximas, e com filtros com granulometrias semelhantes ou ligeiramente menos uniformes. As pesquisas apresentadas na Tabela 1.1, cujos resultados também foram utilizados por Honjo-Veneziano, mostram este aspecto. Este procedimento visava obter uma condição de carreamento ‘praticamente nulo’ de partículas do material-base para o interior do filtro, de modo que a eficiência do filtro fosse avaliada pela constância da medida de vazão e de medidas de pressão ao longo da espessura do filtro (Bertram, Karpoff e Zweck-Davidenkoff).

Exceção foi a pesquisa desenvolvida pelo U.S. Corps of Engineers, onde o controle foi visual e a espessura do material-base igual a um centímetro. Quando o filtro era submetido a vibração através de golpes de um soquete de borracha e ocorria a penetração

do material-base no interior do filtro, ele era repostado e caso a penetração máxima estabilizasse em 1 a 2 cm, o filtro era considerado estável.

Ou seja, para facilitar a interpretação dos ensaios e não ter que levar em conta o mecanismo de filtragem que ocorre quando a gama de diâmetros do material-base não é restrita, foram utilizados materiais uniformes e nos ensaios em que houve transporte de partículas, usualmente eles foram considerados instáveis, a favor da segurança.

Estas considerações serão úteis para analisar as conclusões dos estudos estatísticos, conforme será visto em seguida..

O modelo estatístico considerou uma variável binária Y (Y = 0 para estabilidade e Y = 1 para instabilidade) e um vetor de variáveis exploratórias, constituído por vários diâmetros de partículas do material-base e do filtro.

Foi feita uma regressão binária através do modelo logístico de Cox (1970)*, sendo utilizado as estatísticas Taxa de Semelhança (“Likelihood Ratio - LR”) e Porcentagem Corretamente Prevista (“Percent Correctly Predicted - PCP”) para avaliar a adequação do modelo utilizado.

Os principais resultados obtidos foram :

a - Somente o D15 do filtro foi considerado uma variável significativa para representar o filtro .

b - Cinco diâmetros do material-base ($d \geq d_{60}$) foram considerados significativos, o que pode ser interpretado que a sua auto-retenção é controlada pela distribuição granulométrica, especialmente pela fração grossa

* Cox, D. R. (1970) - *Analysis of Binnary Data* - Chapman and Hall, London citado em Honjo- Veneziano (1989).

c - Análise mais refinada, mostrou que a relação **D15/d85** é a mais indicada para prever a estabilidade de um filtro.

Esta relação (**D15/d85**), aliada à relação **d95/d75**, são as que melhor retratam a interação material-base versus filtro.

Estes autores propuseram o seguinte critério de filtro :

$$\mathbf{D15/d85 \leq 5,5 - 0,5 d95 / d75 \text{ para } d95 / d75 \leq 7, \quad (1.3.1)}$$

uma vez que a probabilidade de um filtro dimensionado pelo critério de Terzaghi (**D15/d85 ≤ 5**) ser instável é de 23%, sendo que quando considera-se apenas os ensaios em que os materiais-base eram uniformes, ou todos os ensaios com a inclusão da relação **d95/d75** (que indica a capacidade de autofiltragem do material-base) no critério de filtro, a probabilidade é reduzida para 10%.

Em vista das considerações apresentadas no início deste item sobre as pesquisas experimentais, este critério mostra que quando se utiliza materiais-base não uniformes, para que não ocorra “nenhum” carreamento de material-base para o interior do filtro, é necessário utilizar relações **D15/d85** menores que o critério consagrado de Terzaghi, que pode chegar a ser 2, se o material-base tiver a relação **d95/d75** igual a 7.

De Mello (1989) plotou 99 resultados de ensaios de filtro com materiais-base coesivos ou não, em uma folha de probabilidade comum da lei de Gumbel (drenagem urbana). As regressões médias obtidas indicam que o critério de Terzaghi apresenta 20% de probabilidade de ruptura para os filtros de areia (46 pontos) e 0,5% de probabilidade de ruptura para filtros de siltes e argilas (53 pontos), mostrando segundo o autor que “nós não temos aquela confiança em filtros que se julgaria que deveríamos ter”.

Apesar do rigor de considerar instáveis os filtros que sofreram colmatação, estes resultados mostram que o dimensionamento de filtros exclusivamente através de relações granulométricas pode não ser adequado.

1.6 - Resumo dos Pontos Principais

Só devem ser utilizados para a construção de filtros materiais granulares que possuam estabilidade interna. Conforme visto, os critérios de filtro baseados em relações granulométricas admitem que os vazios do filtro (representados pelo D15) devem reter a fração grossa do material-base (representada pelo d85), e que sendo a granulometria do material-base contínua, por auto-filtragem, será impedido o arraste de sua fração fina.

As considerações apresentadas nos itens anteriores mostram que a simplificação de representar os vazios do filtro e a fração grossa do material-base por um único valor cada, pode não ser adequada.

Honjo-Veneziano sugerem a inclusão da relação d_{95}/d_{75} do material-base (indicador da capacidade de auto-filtragem) no critério de Terzaghi, para se garantir o mesmo desempenho (“segurança”), independentemente da fração grossa do material-base ser bem graduada ou uniforme.

Observa-se que a análise geométrica-probabilística proposta por Silveira (1964) permite caracterizar o processo de transporte e retenção de partículas do material-base no interior do filtro, permitindo avaliar o desempenho do mesmo. Esta ferramenta é muito poderosa mas requer o conhecimento da curva de distribuição de vazios do material que será utilizado como filtro de proteção.

No capítulo 2, apresentado a seguir, serão apresentados os trabalhos que tratam deste assunto.

2- Sobre a Determinação da Curva de Distribuição de Vazios de Filtros de Proteção

Neste capítulo será feita uma análise dos trabalhos que tratam da determinação da curva de distribuição de vazios (porosimetria) de filtros de proteção.

Cumpramos ressaltar novamente, que a porosimetria que interessa para analisar o processo de filtração (bloqueio das partículas do material-base) é aquela que fornece a dimensão mínima (diâmetro) que controla a passagem ou não da partícula do material-base. Estes vazios serão denominados vazios de controle ou passagens.

2.1 - Trabalhos de Silveira (1964,1965,1966)

A tese de Silveira (1964) pela primeira vez aborda o estudo de filtros através do confronto entre a granulometria do material-base e os vazios(poros) do filtro. Como ele é a base de todos os trabalhos subsequentes que adotam este enfoque, será feita uma apresentação detalhada não só dos aspectos que tratam do cálculo da distribuição dos vazios (aspecto geométrico) , como também no que se refere à análise de carreamento do material-base através do interior do filtro (aspecto probabilístico).

Para o desenvolvimento de sua teoria, Silveira faz as seguintes hipóteses:

- a. serem os grão esferoidais
- b. estar o filtro em seu estado de máxima compactação
- c. serem independentes as posições relativas ocupadas pelos grãos
- d. a curva de frequência acumulada da ocorrência dos grãos do filtro está associada à sua curva de distribuição granulométrica em massa(volume).

A hipótese a, segundo o autor, na maioria dos casos constitui uma aproximação razoável.

A hipótese b, é feita para que sempre se possa admitir a existência da tangência de três grãos, dando origem a um vazio central.

A hipótese c, implica em uma mistura e homogeneização bem feita do material, isto é, não há segregação.

A hipótese d, confere a cada diâmetro dos grãos uma probabilidade de ocorrência.

Assim pela hipótese c, as posições relativas entre os grãos são aleatórias, pelas hipóteses b e d, pode-se determinar a ocorrência de determinados agrupamentos de grãos e pela hipótese a pode-se compor o esquema da Figura 2.1.1, cujo vazio interno será representado pela circunferência tangente interna, de diâmetro d_v . Este diâmetro será função das três partículas de diâmetro D_i , D_j e D_k , e assim, para o cálculo da distribuição de vazios do filtro é necessário representar sua curva granulométrica por m diâmetros representativos, isto é, discretizar a sua curva de distribuição granulométrica. Para m diâmetros, tem-se um número de combinações com repetição igual a :

$$N = C_{m,3} = \frac{m(m+1)(m+2)}{3!} = \frac{1}{6} m(m+1)(m+2) \quad (2.1.1)$$

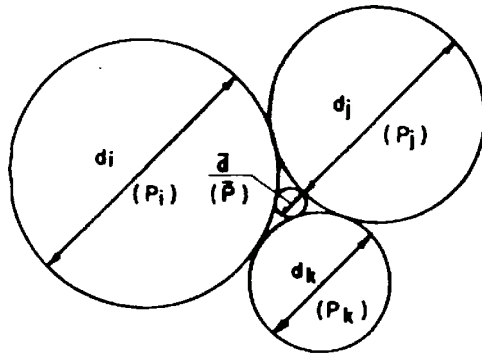
O autor fez um estudo comparativo e concluiu que para $m = 5$, N é igual a 35 e a precisão do método é adequada e não requer um trabalho excessivo.

A probabilidade de ocorrência dos três tipos de agrupamentos possíveis são as seguintes:

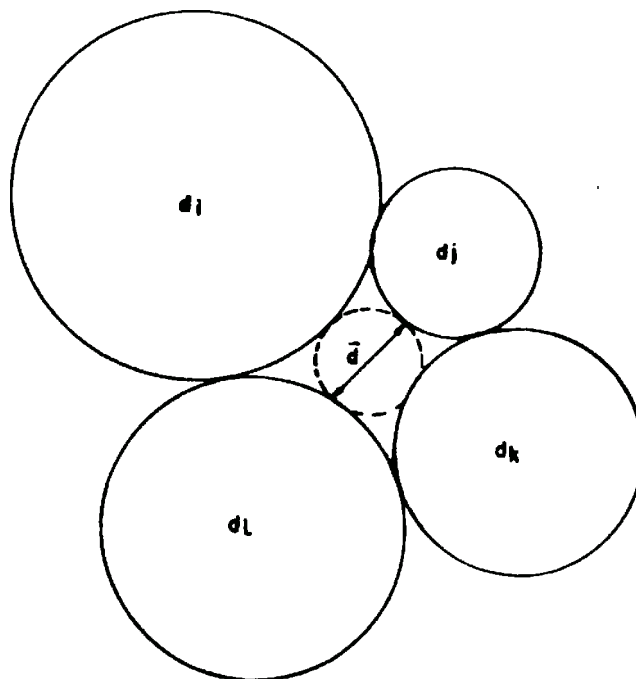
$$P(i,i,i) = 1 \times p_i^3 \quad (2.1.2)$$

$$P(i,i,j) = 3 \times p_i^2 \times p_j \quad (2.1.3)$$

$$P(i,j,k) = 6 \times p_i \times p_j \times p_k \quad (2.1.4)$$



a - ESTADO DENSO



b - ESTADO MENOS DENSO

FIG. 2.11 - ESQUEMAS DE VAZIOS DE FILTROS ADOPTADOS POR SILVEIRA
(1964, 1966)

Quando o agrupamento é do tipo $C_{i,j,i}$ o valor do diâmetro do vazio é igual a $0,155.D_i$. Mas quando o agrupamento é de outro tipo, face à complexidade da resolução analítica para o cálculo de d_v , o autor, neste primeiro trabalho, lançou mão do artifício de resolver graficamente cada combinação, fixando uma relação entre os diâmetros. Tanto a relação dos diâmetros, quanto o diâmetro do vazio, foram relacionados com o menor diâmetro D_1 . Por razões de simples semelhança, estas relações serão mantidas em qualquer escala desde que se conserve a relação dos diâmetros fixados. Desta forma é possível obter a distribuição dos vazios de um solo (curva porosimétrica). As relações obtidas graficamente são apresentadas nas Tabelas 2.1.1 a 2.1.3.

Uma vez determinada a curva de distribuição de vazios, o problema do carreamento se resume na comparação entre os pontos desta curva, d_v , e os da curva de distribuição granulométrica do material-base, (d) . As três situações possíveis são as seguintes :

- a.) $d > d_{v,max}$, isto é, os grãos não conseguem penetrar no filtro.
- b.) $d < d_{v,min}$, neste caso os grãos atravessam o filtro, qualquer que seja sua espessura
- c.) $d_{v,min} < d < d_{v,max}$ os grãos do material-base penetram no filtro até encontrar um vazio $d_v < d$.

Se em cada confronto (ou prova), a partícula caminha um espaço s , então o espaço total por ela percorrido será $n \times s$, onde n é o número de provas.

Caso a probabilidade de $d < d_v$ seja igual a p^n , então a probabilidade de ter o seu percurso interrompido após n confrontos é de $1 - p^n$.

TABELA 2.1.1: DETERMINAÇÃO DA CURVA DE VAZIOS

RELAÇÃO $(D_i/D_1) = 1:2:3:4:5$

d1		d2		d3		d4		d5	
P1		P2		P3		P4		P5	

AGRUPAMENTO	\bar{d} / d_1	\bar{d}	$\bar{P} \times 100\%$	$\Sigma \bar{P} \times 100\%$
d1 d1 d1	0,155			
d1 d1 d2	0,190			
d1 d1 d3	0,210			
d1 d1 d4	0,218			
d1 d1 d5	0,220			
d2 d2 d1	0,235			
d1 d2 d3	0,260			
d1 d2 d4	0,275			
d3 d3 d1	0,280			
d1 d2 d5	0,300			
d2 d2 d2	0,310			
d1 d3 d4	0,315			
d1 d3 d5	0,320			
d4 d4 d1	0,335			
d1 d4 d5	0,340			
d2 d2 d3	0,350			
d5 d5 d1	0,360			
d2 d2 d4	0,380			
d2 d2 d5	0,400			
d3 d3 d2	0,400			
d2 d3 d4	0,430			
d2 d3 d5	0,460			
d3 d3 d3	0,465			
d4 d4 d2	0,470			
d2 d4 d5	0,500			
d3 d3 d4	0,500			
d3 d3 d5	0,530			
d5 d5 d2	0,540			
d4 d4 d3	0,560			
d3 d4 d5	0,600			
d4 d4 d4	0,620			
d5 d5 d3	0,640			
d4 d4 d5	0,650			
d5 d5 d4	0,700			
d5 d5 d5	0,755			

TABELA 2.1.2: DETERMINAÇÃO DA CURVA DE VAZIOS

RELAÇÃO (D_i/D₁) = 1:2:4:6:8

d1		d2		d3		d4		d5	
P1		P2		P3		P4		P5	

AGRUPAMENTO	\bar{d}/d_1	\bar{d}	$\bar{P}_x 100\%$	$\Sigma \bar{P}_x 100\%$
d1 d1 d1	0,155			
d1 d1 d2	0,190			
d1 d1 d3	0,220			
d1 d1 d4	0,222			
d1 d1 d5	0,225			
d2 d2 d1	0,235			
d1 d2 d3	0,275			
d1 d2 d4	0,300			
d1 d2 d5	0,308			
d2 d2 d2	0,310			
d3 d3 d1	0,335			
d1 d3 d4	0,365			
d1 d3 d5	0,380			
d2 d2 d3	0,380			
d4 d4 d1	0,400			
d1 d4 d5	0,420			
d2 d2 d4	0,420			
d2 d2 d5	0,435			
d5 d5 d1	0,440			
d3 d3 d2	0,470			
d2 d3 d4	0,530			
d2 d3 d5	0,550			
d4 d4 d2	0,560			
d3 d3 d3	0,620			
d2 d4 d5	0,630			
d5 d5 d2	0,670			
d3 d3 d4	0,700			
d3 d3 d5	0,700			
d4 d4 d3	0,800			
d3 d4 d5	0,860			
d4 d4 d4	0,930			
d5 d5 d3	0,940			
d4 d4 d5	1,000			
d5 d5 d4	1,120			
d5 d5 d5	1,240			

TABELA 2.1.3: DETERMINAÇÃO DA CURVA DE VAZIOS
 RELAÇÃO $(D_i/D_1) = 1:2:4:8:16$

d1		d2		d3		d4		d5	
P1		P2		P3		P4		P5	

AGRUPAMENTO	\bar{d}/d_1	\bar{d}	$\bar{P} \times 100\%$	$\Sigma \bar{P} \times 100\%$
d1 d1 d1	0,155			
d1 d1 d2	0,190			
d1 d1 d3	0,220			
d1 d1 d4	0,225			
d2 d2 d1	0,235			
d1 d1 d5	0,250			
d1 d2 d3	0,275			
d1 d2 d4	0,308			
d2 d2 d2	0,310			
d1 d2 d5	0,320			
d3 d3 d1	0,335			
d1 d3 d4	0,380			
d2 d2 d3	0,380			
d1 d3 d5	0,400			
d2 d2 d4	0,435			
d4 d4 d1	0,440			
d2 d2 d5	0,450			
d3 d3 d2	0,470			
d1 d4 d5	0,475			
d2 d3 d4	0,550			
d5 d5 d1	0,560			
d2 d3 d5	0,617			
d3 d3 d3	0,620			
d4 d4 d2	0,670			
d2 d4 d5	0,760			
d3 d3 d4	0,760			
d3 d3 d5	0,870			
d5 d5 d2	0,880			
d4 d4 d3	0,940			
d3 d4 d5	1,100			
d4 d4 d4	1,240			
d5 d5 d3	1,340			
d4 d4 d5	1,520			
d5 d5 d4	1,880			
d5 d5 d5	2,480			

Caso se admita um nível de confiança P^{**} , isto é, se quiser ter P^{**} de confiança de que a partícula não passe após n confrontos, é necessário satisfazer à condição :

$$1 - p^n = P^* , \text{ onde } P^* = P^{**}/ 100 , \text{ obtendo-se :}$$

$$n = \frac{\log (1 - P^*)}{\log p} \quad (2.1.5)$$

O autor sugere que se adote a média geométrica dos diâmetros dos grãos do filtro ou então o D50, para o valor do percurso s em cada confronto, assim é possível calcular o percurso total da partícula no filtro, que é igual a :

$$S = n \times s \quad (2.1.6)$$

Fixado um nível de confiança, a análise da curva de penetração, $\log d \times S$ permite verificar se ocorre a retenção das partículas mais grossas do material-base (consequentemente dar uma primeira idéia se há o efeito de autofiltragem) e a partir de que comprimento de filtragem (S) a contaminação do filtro é praticamente nula. Silveira sugere que o dimensionamento do filtro seja feito somando-se ao comprimento S , uma espessura que satisfaça às condições hidráulicas do filtro, ou seja, sua capacidade de drenagem seja adequada.

Araken Silveira (1965) aplicou o conceito de corpo ativo de Kjellman (1964) do Swedish Geotechnical Institute, à sua metodologia, de modo a determinar a espessura do material-base que estará sujeito a ter seus grãos carreados.

Kjellman estudou a probabilidade de não-ocorrência de piping em uma camada de material-base adjacente a uma camada uniforme mais grossa (filtro) , cujos vazios possuam um diâmetro D .

Definiu corpo ativo, como uma coluna perpendicular à entrada (vazio d_v) , com diâmetro D e espessura T , cujos grãos poderiam penetrar através do vazio d_v .

Sendo n o teor de grãos $D = d_v$, que não podem penetrar no filtro, e admitindo que o volume desses grãos com seus vazios é $\pi D^3/4$, Kjellman concluiu que não haverá “piping” caso exista pelo menos um grão de diâmetro D no corpo ativo. A probabilidade de existir um grão (D) é :

$$s' = 1 - (1 - n)^{\alpha^2 T / D} \quad (2.1.17)$$

para todas as possíveis entradas existentes sobre uma área A , a probabilidade é igual a :

$$s'' = [1 - (1 - n)^{\alpha^2 T / D}] A / 4D^2 (3)^{1/2} \quad (2.1.18)$$

supondo-se que os grãos do filtro tenham diâmetro $4D$, o número de entradas é igual a $A / 4D (3)^{1/2}$

Araken Silveira estendeu esta idéias para o caso geral de análise de carreamento, quando o número de entradas (vazios), com diâmetro D , é igual a :

$$N = p_v \cdot n_f \cdot A / A_v \quad (2.1.19)$$

onde :

p_v = porcentagem de vazios no filtro com diâmetro D

n_f = porosidade do filtro

A_v = área do vazio com diâmetro D

A = área de contato entre material-base e filtro

O volume de uma partícula de diâmetro D com seus vazios é igual a :

$$V = \pi D^3 / 4 q \quad (2.1.20)$$

onde q é função da porosidade do material-base (n_b) e pode ser calculado pela expressão:

$$q = 6 (1 - n_b) / 4 \quad (2.1.21)$$

Assim sendo, o número de volumes em um corpo ativo é igual a $q \cdot \alpha^2 \cdot T / D$ através do enfoque de Kjellman, tem-se que :

$$s'' = [1 - (1-p) q \alpha^2 T / D]^N \quad (2.1.22)$$

$$s''^{1/N} = 1 - (1-p) q \alpha^2 T / D \quad (2.1.23)$$

$$D \cdot \log (1 - s'')^{1/N} = q \alpha^2 T \log (1 - p) \quad (2.1.24)$$

Para s próximo de um, tem-se que :

$$D \cdot \log (1 - s'') \cdot 1/N = q \alpha^2 T \log (1 - p) \quad (2.1.25)$$

$$\frac{T}{D} = \frac{1}{q \alpha^2} \frac{\log (1 - s'') + \log (1/N)}{\log (1 - p)} \quad (2.1.26)$$

Esta expressão permite calcular a espessura T do material-base sujeita ao arraste de seus grãos para o interior do filtro, o que permite compor a curva granulométrica da região contaminada do filtro e conseqüentemente sua nova distribuição de vazios.

A análise de carreamento do material-base para o interior da zona contaminada permite verificar se há ou não o fenômeno de autofiltragem e se o filtro é eficiente ou não.

Cumprir notar que a determinação da granulometria contaminada é função de diversos fatores tais como o intervalo de confiança adotado, os diâmetros do vazio e do corpo ativo considerados.

Araken Silveira (1966) verificou através de ensaios de laboratório, que para um filtro com uma espessura pré-determinada a granulometria do material que atravessa o mesmo, concordava bem com a granulometria determinada teoricamente, exceto no seu trecho superior, quando era mais grossa. Isto é, a sua teoria não levava em conta possíveis vazios maiores que o maior vazio no estado de compactação assumido.

Assim sendo, o autor verificou a necessidade de estudar estados menos densos que gerariam vazios maiores que os calculados no seu estudo inicial. Para tal, foi estudado o agrupamento de quatro partículas (estado menos denso) através do mesmo enfoque do estudo realizado para o estado de máxima compactidade (ver Figura 2.1.1). Para este estado, o número de agrupamentos (combinações com repetições) é de :

$$N = \frac{m(m+1)(m+2)(m+3)}{4!} \quad (2.1.27)$$

para $m = 5$, temos $N = 70$, e as probabilidades de ocorrência dos agrupamentos são:

$$p(i,i,i,i) = p_i^4 \quad (2.1.28)$$

$$p(i,i,i,j) = 4 p_i^3 p_j \quad (2.1.29)$$

$$p(i,i,j,j) = 6 p_i^2 p_j^2 \quad (2.1.30)$$

$$p(i,i,j,k) = 12 p_i^2 p_j p_k \quad (2.1.31)$$

$$p(i,j,k,m) = 24 p_i p_j p_k p_m \quad (2.1.32)$$

O autor observa que o estado menos denso raramente é atingido na prática a não ser que cuidados especiais sejam tomados e que vazios formados por 5 ou mais grãos são raros e facilmente destruídos por vibração e sugere, neste trabalho, que se adote uma curva porosimétrica média entre os dois estados estudados.

Quanto à metodologia proposta por Silveira , podem ser feitos os seguintes comentários :

a) Um empecilho à aplicação desta metodologia é o grande número de cálculos envolvidos na determinação da curva de vazios. Silveira e co-autores (1975) apresentam um programa em FORTRAN para o cálculo das curvas de vazios nos estados menos denso e de máxima compactidade, onde é possível discretizar a curva granulométrica em até dez diâmetros. Os autores sugerem a adoção dos diâmetros D_5 , D_{10} , D_{15} , D_{20} ... D_{95} , associando uma frequência de dez por cento para cada um.

Para o estado de máxima compactidade, o diâmetro do vazio é resolvido por um processo iterativo, enquanto que para o estado menos denso, o diâmetro do vazio é calculado como sendo o diâmetro da circunferência que apresenta a mesma área do vazio. Mais adiante, será apresentado um programa em QBASIC para microcomputador pessoal que permite o cálculo da porosimetria para o estado mais denso através de uma solução geométrica exata do arranjo de três partículas esféricas tangentes.

b) Nogueira (1981) fez análises de carreamento experimentais que mostraram uma boa concordância entre teoria e prática quando o filtro possui partículas esferoidais e uma concordância apenas razoável quando o filtro é constituído de brita (partículas lamelares e angulares) , mostrando a importância de se levar em consideração a forma das partículas.

Observa-se contudo que nos ensaios não foi utilizado um “side material” (ver Sherard e co-autores (1984)), que é uma massa de modelar ou material de granulometria mais fina no contato entre o filtro e as paredes do molde cilíndrico, com intuito de eliminar os vazios maiores que as partículas fazem junto à parede do molde, porque a sua superfície é côncava.

Este aspecto será novamente abordado ao se analisar os trabalhos de Wittmann (1979) e de Sherard e co-autores (1984) nos próximos itens.

2.2 - Trabalho de De Mello (1977)

De Mello(1977) em sua Rankine Lecture apresenta uma discussão sobre os trabalhos de Silveira(1964,1966), onde são feitas restrições ao emprego de sua teoria, principalmente à sua utilização no cálculo da porosimetria de filtros bem graduados.

A “incorreção” levantada por De Mello refere-se ao fato de que o cálculo das probabilidades de formação dos agrupamentos de partículas não deveria ser feita baseada na distribuição em massa obtida no ensaio de granulometria e sim na distribuição em função do número de partículas. Ele cita (ver Figura 2.2.1) que para um material com $CNU = D_{60}/D_{10} = 5,2$ (com base no trabalho de Marsal (1963)) , a fração 2,6% mais fina em massa pode representar 60% do número de partículas. A adoção da frequência em “massa” (volume) leva a porosimetrias mais “grossas” principalmente para filtros bem graduados. Nestes casos, como os grãos maiores são pouco numerosos, um agrupamento entre eles é difícil de ocorrer, por outro lado, o número de contatos com os grãos menores deve ser muito grande, formando arranjos densos.

Na Figura 2.2.1 apresenta-se o gráfico com a relação entre o $d_{v,85}$ e o D_{50} do filtro. Verifica-se que ela aumenta com o CNU, quando, segundo o exposto acima, deveria ser esperada uma tendência oposta.

Em função do exposto, De Mello julga inadequada a metodologia para cálculo da porosimetria proposta por Silveira, apesar dos resultados satisfatórios obtidos quando aplicada para filtros uniformes.

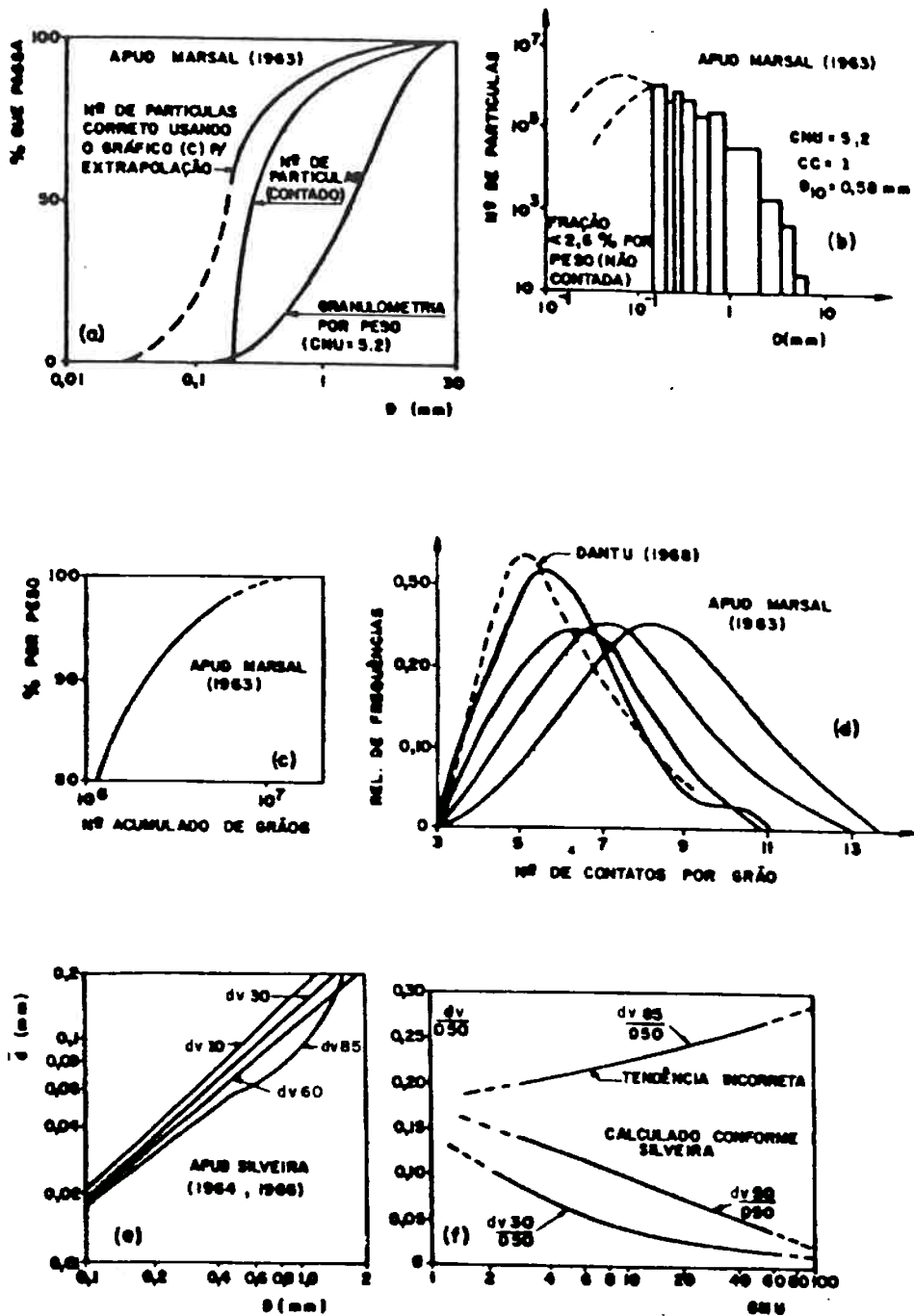


FIGURA 2.2.1-RESTRIÇÕES AO MÉTODO DE ARAKEN SILVEIRA, SEGUNDO DE MELLO (1977)

Com relação ao trabalho de De Mello, podem ser feitos os seguintes comentários :

Observa-se que, ao se estudar a probabilidade de encontrar uma partícula em um determinado volume de filtro, esta probabilidade depende do volume que esta partícula ocupa e portanto a curva de distribuição das partículas precisa ser feita em termos de volume. Admitindo que a massa específica das partículas é constante, a distribuição em massa obtida no ensaio de granulometria, pode ser associada à distribuição em volume.

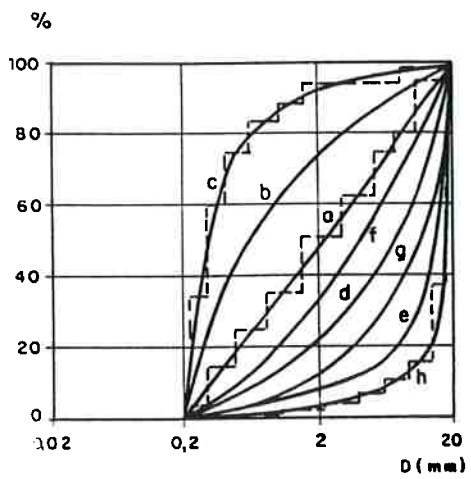
Por outro lado, quando se estuda a probabilidade de retirar uma partícula de um determinado volume (“sorteio”), esta probabilidade está associada ao número destas partículas existentes no volume (“urna”).

Conseqüentemente, a proposta de trabalhar com número de partículas não é correta, pois o modelo de “sorteio” não se aplica à análise de carregamento.

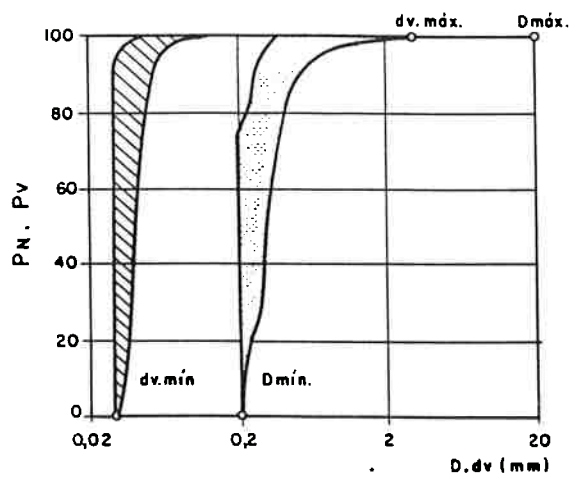
Outra forma de se verificar que o conceito de número de partículas não é aplicável, é que como o número de partículas é inversamente proporcional ao cubo do diâmetro, filtros com praticamente os mesmos diâmetros mínimos e máximos, terão praticamente a mesma porosimetria, independentemente de sua graduação(ver Figura 2.2.2) . Este aspecto será tratado com mais detalhe na análise do trabalho de Musso-Federico (1983) .

Por sua vez o modelo de Silveira apesar de ser coerente, não se ajusta bem a filtros bem graduados.

Esta questão ainda permanece em aberto, não tendo sido ainda resolvida nos trabalhos subsequentes sobre o tema, os quais serão apresentados nos próximos itens.



a - Curva Granulométrica em Massa



b - Curva Granulométrica em Número e Curva de Vazios em Número

FIGURA 2.2.2.- FILTROS DE MUSSO - FEDERICO (1.983)

2.3 - Trabalho de Wittmann(1979)

Wittmann (1979) apresenta um trabalho onde são abordados os aspectos geométricos referentes ao mecanismo de filtração.

Em uma primeira etapa é estudado um meio constituído de esferas homogêneas (D) admitindo que o meio poroso pode ser representado por seções planas. O modelo plano é então estendido para a terceira dimensão, que é o comprimento de filtração, o que é razoável quando admite-se que o processo de filtração é unidimensional.

Para estas hipóteses o número de partículas por unidade de volume de um filtro com porosidade nf é dado por :

$$N_v = \frac{\text{volume de solo}}{\text{volume de uma esfera}} = \frac{6(1 - nf)}{\pi D^3} \quad (2.3.1)$$

Ao se cortar um arranjo homodisperso, a probabilidade de cortar uma esfera e produzir uma determinada área é igualmente distribuída ao longo do diâmetro desta esfera. Pelo teorema da Média obtém-se uma área seccionada média igual a :

$$A_p = \frac{\pi D^2}{6} \quad (2.3.2)$$

Dividindo a fração sólida de uma área do arranjo por esta área seccionada média (A_m), tem-se que o número de partículas seccionadas ou tangenciadas na área é igual a :

$$N_a = \frac{1 - nf}{\pi D^2 / 6} = \frac{6(1 - nf)}{\pi D^2} \quad (2.3.3)$$

Admitindo que um poro na área seccionada é formado por três no máximo quatro partículas e que o número de partículas é muito grande, pode-se admitir que o número de poros é igual ao número de partículas com um erro pequeno. Dividindo a porcentagem de vazios na área por N_A , pode-se estimar que a área do poro médio é dada por :

$$A^* = \frac{n_f}{N_A} = \frac{n_f \pi D^2}{6(1 - n_f)} \quad (2.3.4)$$

$$A^* = \frac{\pi}{6} \cdot e \cdot D^2 \quad (2.3.5)$$

onde e, é o índice de vazios.

Em razão da convexidade dos grãos, o vazio possui um contorno côncavo, o qual necessita uma redução na sua área, quando se estuda a passagem de grãos esféricos através dele. Usando um coeficiente redutor α , o diâmetro médio do poro pode ser determinado através da expressão :

$$\frac{\pi d_p^2}{4} = \alpha A^* \quad (2.3.6)$$

onde A^* é dado pela equação 2.3.5, logo vem que :

$$d_p = D \left(\frac{2 \cdot \alpha \cdot e}{3} \right)^{1/2} \quad (2.3.7)$$

Estes conceitos podem ser estendidos para arranjos heterodispersos através das equações apresentadas na Tabela 2.3.1

Para verificar essas equações e determinar a porosimetria de materiais granulares, foram preparadas amostras constituídas de esferas e de um pedregulho natural. As amostras eram preenchidas com Araldite e cortadas em fatias após o endurecimento da resina.

TABELA 2.3.1

EQUAÇÕES PROPOSTAS POR WITTMANN(1979)

NV = N^o DE PARTÍCULAS POR UNIDADE DE VOLUME

$$NV = \frac{6(1-n_f)}{\pi \sum_{i=1}^m p_{N,i} d_i^3} = \frac{6(1-n_f)}{\pi \sum_{i=1}^m \frac{p_{m,i}}{\sum_{j=1}^m p_{m,j} / d_j^3}}$$

NA = N^o DE PARTÍCULAS POR UNIDADE DE ÁREA

$$NA = \frac{6(1-n_f)}{\pi \sum_{i=1}^m p_{N,i} d_i^2} = \frac{6(1-n_f)}{\pi \sum_{i=1}^m \frac{p_{m,i} / d_i}{\sum_{j=1}^m p_{m,j} / d_j^3}}$$

A_p = ÁREA MÉDIA DOS VAZIOS (POROS)

$$A_p = \frac{\pi \cdot e}{6} \sum_{i=1}^m p_{N,i} \cdot d_i^2 = \frac{\pi \cdot e}{6} \sum_{i=1}^m \frac{p_{m,i} / d_i}{\sum_{j=1}^m p_{m,j} / d_j^3}$$

d_p = DIÂMETRO MÉDIO DOS VAZIOS (POROS)

$$d_p = \sqrt{\frac{2}{3} \alpha e \sum_{i=1}^m p_{N,i} d_i^2} = \sqrt{\frac{2}{3} \alpha e \sum_{i=1}^m \frac{p_{m,i} / d_i}{\sum_{j=1}^m p_{m,j} / d_j^3}}$$

OBS: p_m = PERCENTAGEM CORRESPONDENTE A DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR MASSA.
 p_N = PERCENTAGEM CORRESPONDENTE A DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR NÚMERO DE PARTÍCULAS

Para as amostras compostas de esferas houve uma boa concordância entre os valores experimentais e os calculados. Entretanto, os valores de N_v e N_a calculados para o pedregulho foram muito diferentes dos valores obtidos experimentalmente. Verificou-se que o volume dos grãos do pedregulho obtido a partir do ensaio de peneiramento, que admite que as partículas são esféricas, diferia muito do volume real dos grãos. Esta diferença explicaria o erro na previsão dos valores de N_a e N_v . Um coeficiente de ajuste que trouxe uma boa concordância entre os resultados experimentais e teóricos foi o quociente entre o volume real e o volume “esférico” determinado a partir do peneiramento.

A determinação da porosimetria do pedregulho foi obtida de duas formas:

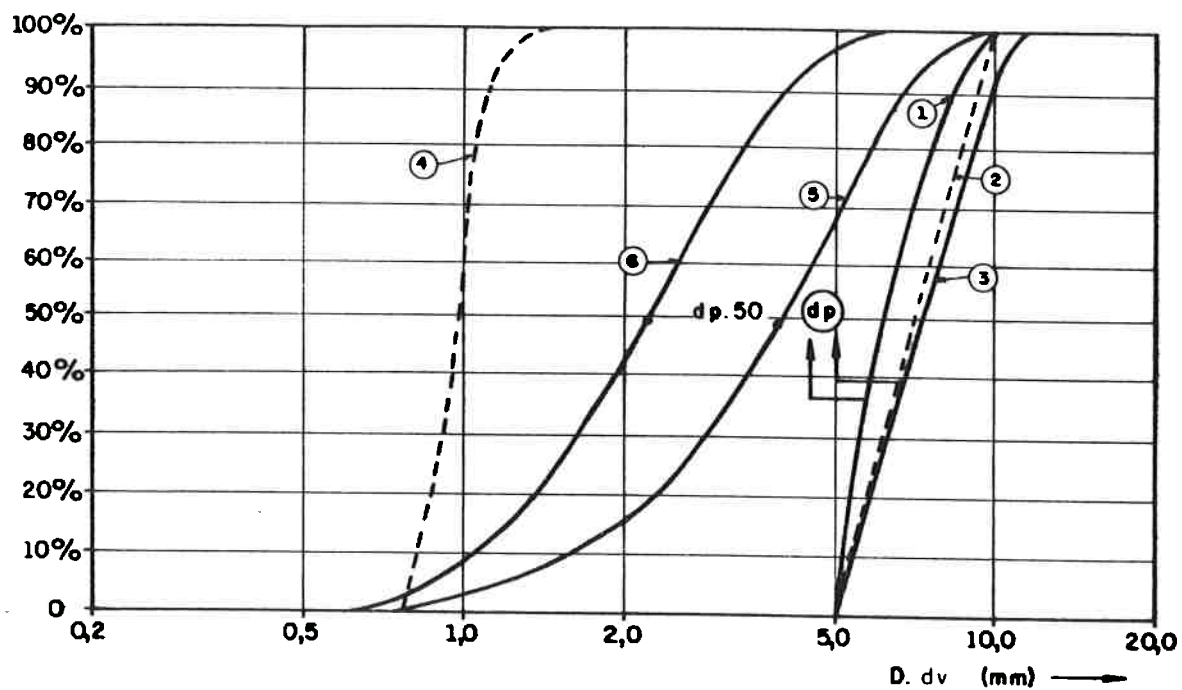
a. Admitia-se que o poro era formado pelo arranjo de 3 ou no máximo 4 partículas.

Utiliza-se um planímetro para medir a área entre as partículas;

b. o “diâmetro” do poro era igual ao diâmetro da maior circunferência capaz de ser inscrita no espaço formado pelo agrupamento de 3 ou 4 partículas. Este procedimento fornece a porosimetria reduzida, conforme o conceito expresso pela equação 2.3.6.

Segundo Wittmann, a comparação entre as distribuições porosimétricas obtidas pelos dois métodos fornece uma boa avaliação do valor do coeficiente de ajuste α (ver Figura 2.3.1), onde são apresentadas as curvas porosimétricas obtidas para o pedregulho natural.

Uma vez determinada a porosimetria do filtro, com base na análise de carreamento de Silveira (1964), o autor verificou que é possível determinar o modo que as áreas dos poros se estreitam ou se alargam ao longo de um poro-canal, ou seja, ao longo de um canal de fluxo d’água, propondo a seguinte abordagem para o problema.



- 1 - GRANULOMETRIA POR NÚMERO DE GRÃOS A PARTIR DA DISTR. POR MASSA
- 2 - GRANULOMETRIA POR MASSA
- 3 - GRANULOMETRIA REAL POR NÚMERO DE GRÃOS
- 4 - POROSIMETRIA CONFORME SILVEIRA (1965)
- 5 - POROSIMETRIA MEDIDA (DIÂMETRO EQUIVALENTE À ÁREA MEDIDA)
- 6 - POROSIMETRIA REDUZIDA ($\alpha = 0,3$)
- 7 - d_p = DIÂMETRO DO VAZIO MÉDIO CONFORME WITTMANN

FIGURA 2.3.1- RESULTADOS DO TRABALHO DE WITTMANN (1979)

A probabilidade de um vazio ser menor que um determinado vazio d_v , é P . Conseqüentemente, a probabilidade de encontrar no plano seguinte, após ter percorrido uma certa distância, um outro vazio que seja igual ou superior a d_v , é igual a $(1 - P)$. Para n confrontos esta probabilidade é igual a :

$$P^n = (1 - P)^n \quad (2.3.8)$$

Admitindo um nível de confiança P^* para que o canal de fluxo fique com um diâmetro menor que d_v , tem-se que :

$$P^* = 1 - P^n = 1 - (1 - P)^n \quad (2.3.9)$$

$$n = \frac{\log (1 - P^*)}{\log (1 - P)} \quad (2.3.10)$$

Observa-se que esta equação é igual à equação 2.1.5 por Silveira, onde $p = 1 - P$ (p = probabilidade de encontrar um vazio maior que d_v).

As Figuras 2.3.2 e 2.3.3 apresenta a plotagem dessa equação e a redução da porosimetria com o número de confrontos. Verifica-se que a redução dos grandes vazios é feita após poucos confrontos enquanto que para a redução dos vazios menores é necessário um número elevado de confrontos.

O comprimento de filtragem pode ser obtido quando a distância percorrida entre cada confronto é conhecida. Uma vez que a existência de vazios em um filtro é proporcional a N_a e inversamente proporcional à N_v , o quociente N_a / N_v é uma boa estimativa do espaços percorrido, em cada confronto.

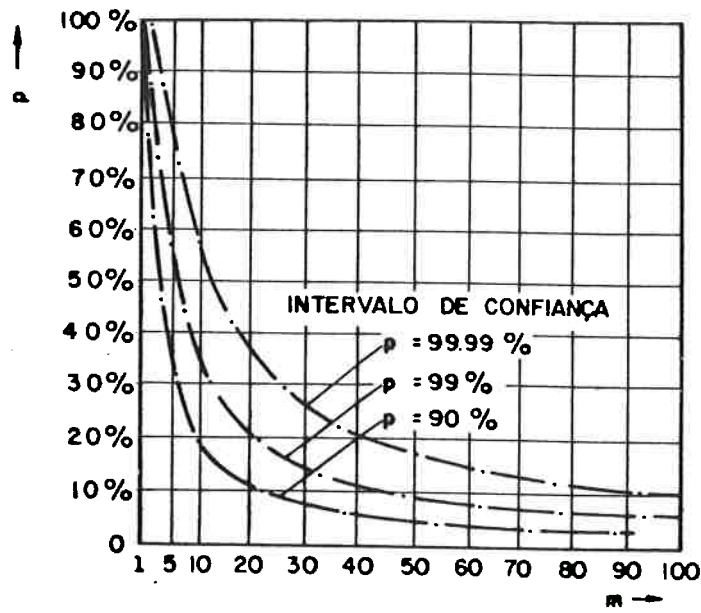


FIGURA 2.3.2 - REDUÇÃO DO COMPRIMENTO DE FILTRAGEM, SEGUNDO WITTMANN (1979)

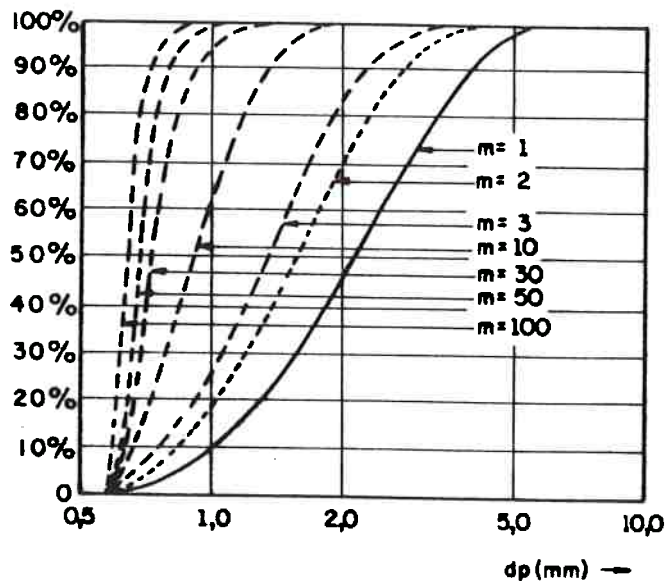


FIGURA 2.3.3- REDUÇÃO DA POROSIMETRIA DO FILTRO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE FILTRAGEM (m-1).s, SEGUNDO WITTMANN (1979)

Para testar sua teoria, Wittmann realizou ensaios de carreamento experimentais, e relata (não apresenta) que obteve resultados próximos aos previstos pela teoria, utilizando níveis de confiança superiores a 99 %.

Quanto ao trabalho de Wittmann podem ser feitos os seguintes comentários :

a) Os diâmetros dos vazios obtidos pela metodologia de Wittmann não são os diâmetros de controle, ou seja aqueles que permitem ou não o transporte de uma partícula através do filtro. Por exemplo, em um agrupamento de três partículas esféricas com diâmetros (D_i, D_j e D_k), o vazio de controle ocorre no plano formado pelo centro das três partículas e possui um diâmetro igual ao da circunferência tangente às esferas (circunferências) de diâmetro D_i, D_j e D_k . Pela metodologia de Wittmann, o plano aonde é feito o corte do corpo de prova é aleatório e dificilmente será coincidente com o plano onde ocorre o vazio de controle. Isto explica porque os diâmetros da “porosimetria plana” possuem uma maior faixa de variação que os obtidos através da metodologia de Silveira (ver Figura 2.3.1).

b) A determinação do vazio como sendo o diâmetro da circunferência de mesma área do vazio não é fundamentada em nenhum aspecto do processo de filtragem, conseqüentemente deve ser abandonada.

c) O trabalho de Wittmann mostra que a forma das partículas influencia a porosimetria do filtro e há a necessidade de coeficientes de ajustes para materiais com formas que se afastem muito da forma esferoidal .

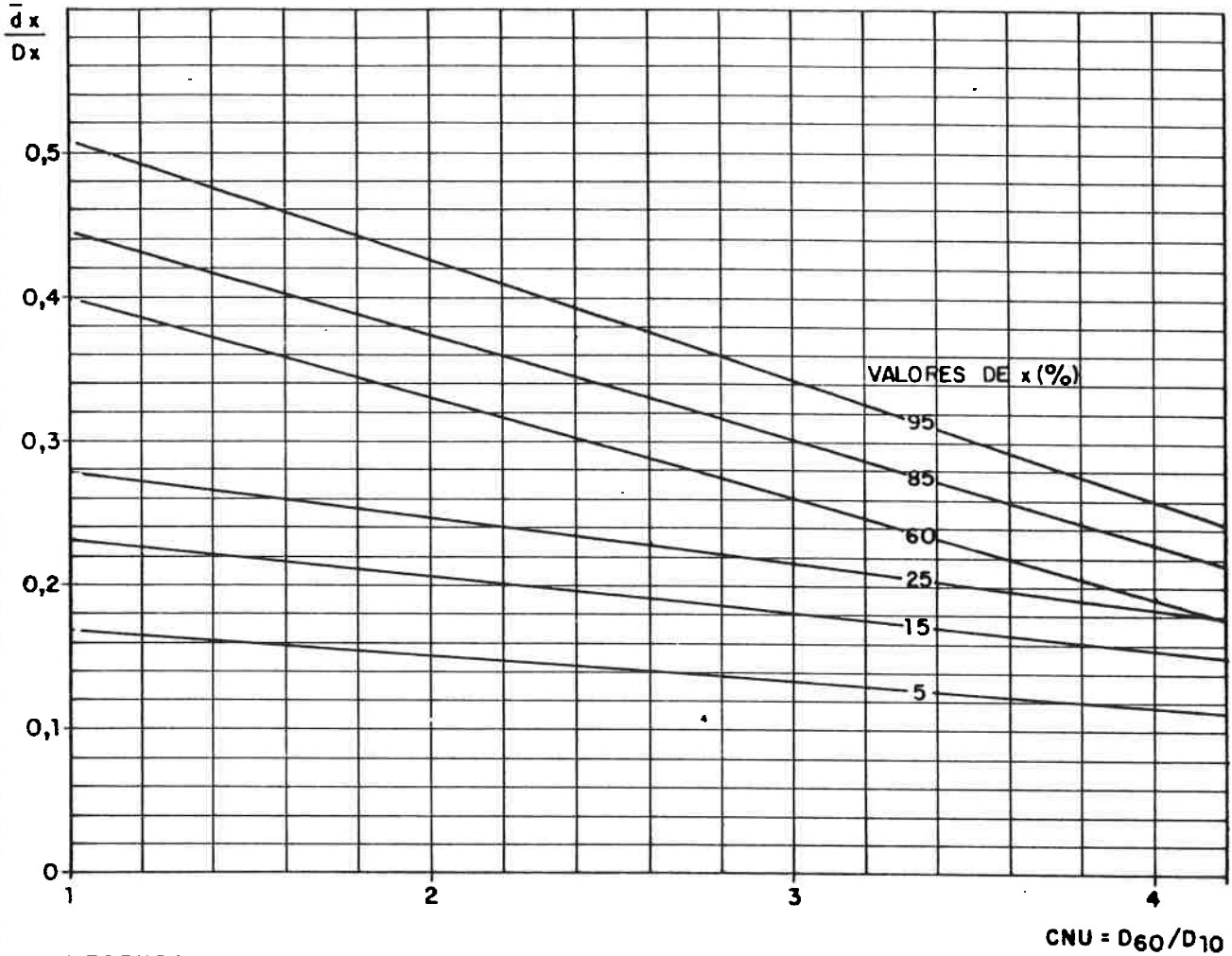
Para a obtenção dos parâmetros N_a e N_v do pedregulho ensaiado, Wittmann sugere como coeficiente de ajuste a relação entre o volume real (obtido através da pesagem de um número conhecido de grãos) e o volume esférico equivalente.

d) A medida de porosimetria de um filtro é um trabalho exaustivo e requer do técnico que a realiza, um conhecimento do problema, para definir quais são os vazios formados pelo agrupamento das partículas.

Humes(1985 e 1986b) ao estudar a porosimetria das transições (britas) da Barragem Pedra do Cavalo pela metodologia de Wittmann, apresenta um ábaco (relações dv_x/Dx em função do CNU, que permite estimar a “porosimetria plana” do filtro. A análise deste ábaco (ver Figura 2.3.4) mostra que à medida que o material é melhor graduado (CNU aumenta) a porosimetria torna-se mais fina (dv_x/Dx diminui) .

e) Ainda quanto à influência da forma das partículas, Humes (1985) apresenta a comparação entre a porosimetria experimental do pedregulho ensaiado por Wittmann e a porosimetria obtida através das relações dv_x/Dx determinadas para britas (ver Figura 2.3.5). Verifica-se que a curva porosimétrica para a hipótese de partículas angulares (britas) está à esquerda da curva porosimétrica experimental para $dv < dv_{75,exp}$ e apresenta comportamento oposto para $dv > dv_{75,exp}$. Isto permite inferir que as curvas porosimétricas obtidas para pedregulhos e britas de mesma granulometria são semelhantes, sendo que a curva porosimétrica da brita abrange uma maior gama de dimensões de vazios e é um pouco mais fina.

Este resultado explica porque as permeabilidades de materiais com grãos angulares são inferiores ou muito próximas às permeabilidades de materiais com grãos arredondados e mesma granulometria. Estas diferenças de permeabilidades foram verificadas por Bertram (1940) ao comparar as permeabilidades de uma areia artificial (angular) com a areia de Ottawa (arredondada), e por Sherard e co-autores (1984), ao comparar permeabilidades de britas com pedregulhos arredondados



LEGENDA

D = DIÂMETRO DO MATERIAL DE FILTRO
 \bar{d}_x = DIÂMETRO DO PORO DO FILTRO
 x = VALOR DA PORCENTAGEM DE OCORRÊNCIA DE DIÂMETROS MENORES QUE \bar{d}_x ou D_x

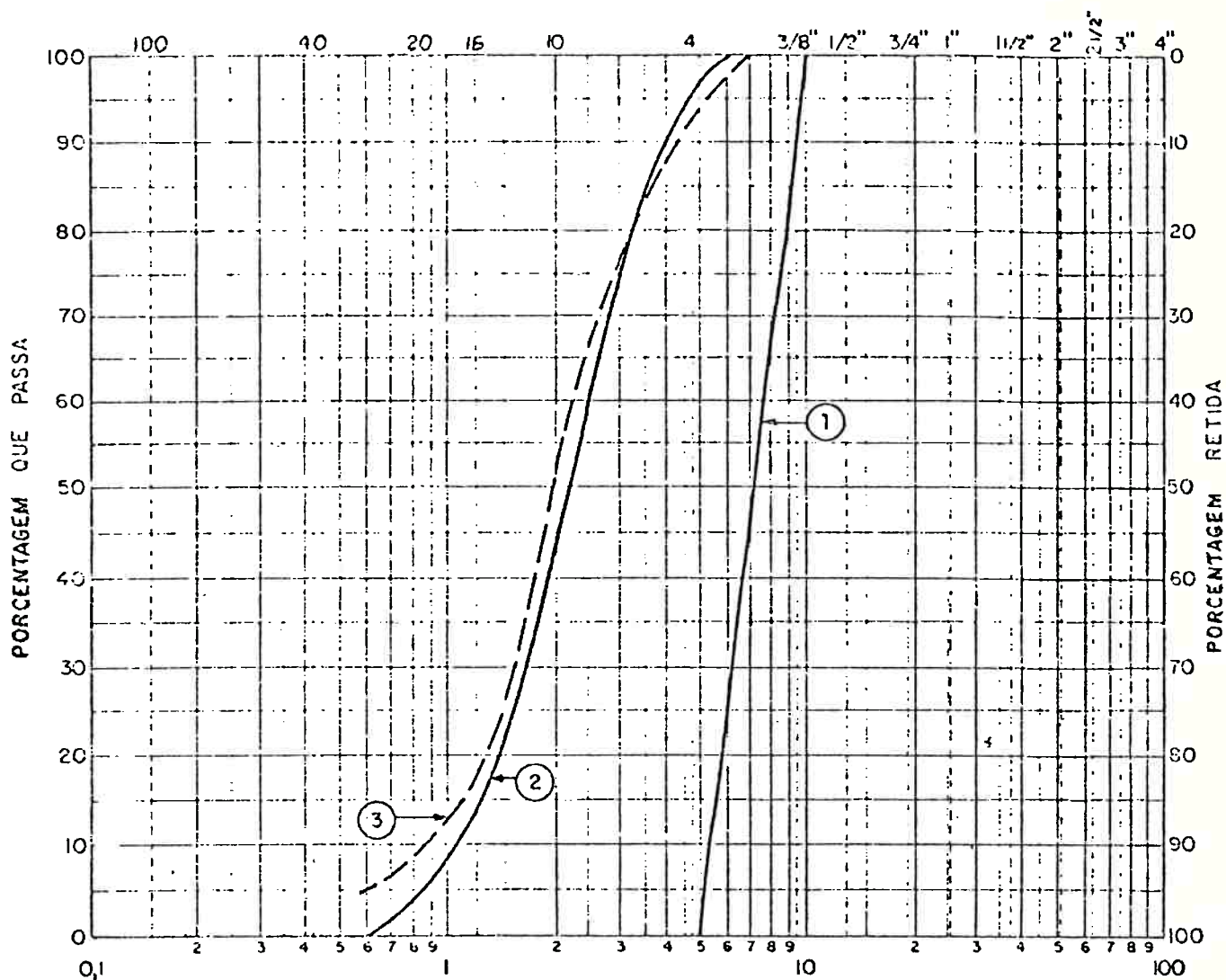
REGRESSÕES LINEARES		
$\bar{d}_x/D_x = K = a \cdot CNU + b$		
x (%)	a	b
5	-0,018	0,186
15	-0,026	0,259
25	-0,032	0,310
60	-0,070	0,471
85	-0,074	0,521
90	-0,085	0,598

CNU = D₆₀/D₁₀

APUD HUMES (1985)

FIGURA 2.3.4 - ÁBACO PARA CÁLCULO DA POROSIMETRIA DE UM MATERIAL DE FILTRO.

PEDREGULHO (WITTMANN)



A.B.N.T.	AREIA FINA	AREIA MÉDIA	A. GROSSA	PEDRISCO	BRITA 1	B. 2	BRITA 3	B. 4	B. 5
M.I.T.	A. FINA	AREIA MÉDIA	AREIA GROSSA	PEDREGULHO					

- ① - CURVA GRANULOMÉTRICA EM MASSA
- ② - CURVA POROSIMÉTRICA EXPERIMENTAL
- ③ - CURVA POROSIMÉTRICA CALCULADA PELO ÁBACO DA FIGURA 2.3.4

FIG. 2.3.5: CURVAS GRANULOMÉTRICA E POROSIMÉTRICA DO PEDREGULHO ENSAIADO POR WITTMANN (1.979)

2.4 - Trabalho de Musso-Federico (1983)

Neste trabalho é feita uma retrospectiva do trabalho de Silveira (1964) e para uma série de materiais de filtro com mesmos valores de $D_{min} = 0,2\text{mm}$ e $D_{max} = 20\text{mm}$ (ver Figura 2.4.1), são calculadas as curvas de distribuição de vazios a partir da frequência em massa e da frequência em números de partículas para o estado de máxima densidade.

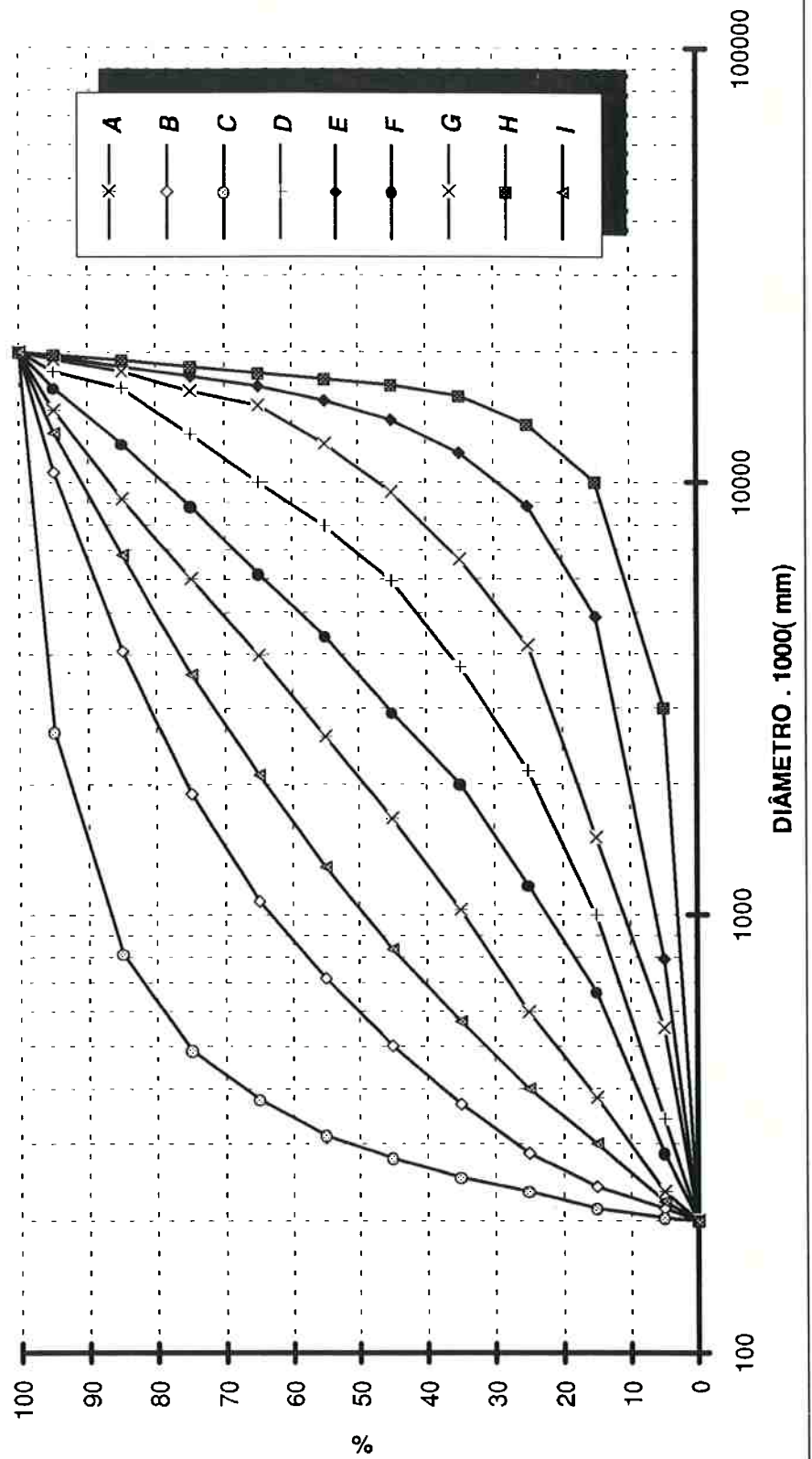
O valor do diâmetro do vazio é calculado através da expressão :

$$\frac{(2/D_i)^2 + (2/D_j)^2 + (2/D_k)^2 + (2/d_v)^2}{(2/D_i) + (2/D_j) + (2/D_k) + (2/d_v)} = 0,50 \quad (2.4.1)$$

que fornece uma solução exata para o cálculo do vazio esférico tangente (d_v) inscrito em três esferas de diâmetros D_i, D_j e D_k .

Conforme mostra a Figura 2.2.2 ao se utilizar a percentagem em número de partículas, tanto a distribuição granulométrica como a distribuição de praticamente idênticas para todos os materiais ensaiados vazios passam a ser, pois para todos 70 a 80% do número de partículas está compreendido no intervalo entre $D_{min} = 0,2 \text{ mm}$ e $D = 0,3\text{mm}$. Isto resulta que os vazios do filtro se concentram no intervalo $d_v = (0,2 - 0,3) \cdot 0,155 \text{ (mm)}$ ou seja entre 0,031 e 0,046 mm.

FIG. 2.4.1 - FILTROS ESTUDADOS POR MUSSO-FEDERICO



Os autores recomendam que para se avaliar de uma maneira mais apropriada a distribuição de vazios que seja adotada a frequência numérica ponderada, ou seja :

$$f_i = \frac{P_{vi} \cdot d_{vi}}{\sum_{j=1}^m p_{vj} \cdot d_{vj}} \quad (2.4.2)$$

Os autores não apresentam os motivos em que se basearam para fazer esta ponderação. Justificam este procedimento porque deste modo as relações $d_{v,85}/d_{v,50}$ e $d_{v,50}/d_{v,10}$ apresentam uma tendência de redução com o aumento do CNU (tendência intuitivamente correta segundo De Mello (1977)) ao contrário do que ocorre quando se analisa esses valores a partir da frequência de partículas em massa(volume), conforme proposto por Silveira. (ver Figura 2.4.2).

Neste trabalho também é apresentado um modelo probabilístico para a análise de carreamento onde se considera que em um confronto entre uma partícula do material-base e um poro do filtro, não há possibilidade de se repetir este confronto qualquer que seja o resultado do confronto, ou seja admite que os confrontos não são independentes. Por este enfoque a determinação do número n de confrontos para que haja o bloqueio de uma partícula do material-base é dada pela equação :

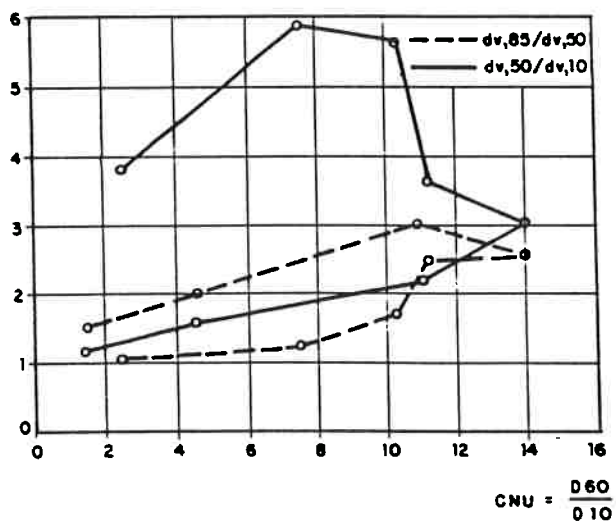
$$N_v \ln N_v - B \ln B + \ln (1 - P^*) = (N_v - n) [\ln N_v + \ln (1 - n/N_v)] + (B - n) [\ln B + \ln (1 - (n/B))] \quad (2.4.3)$$

onde:

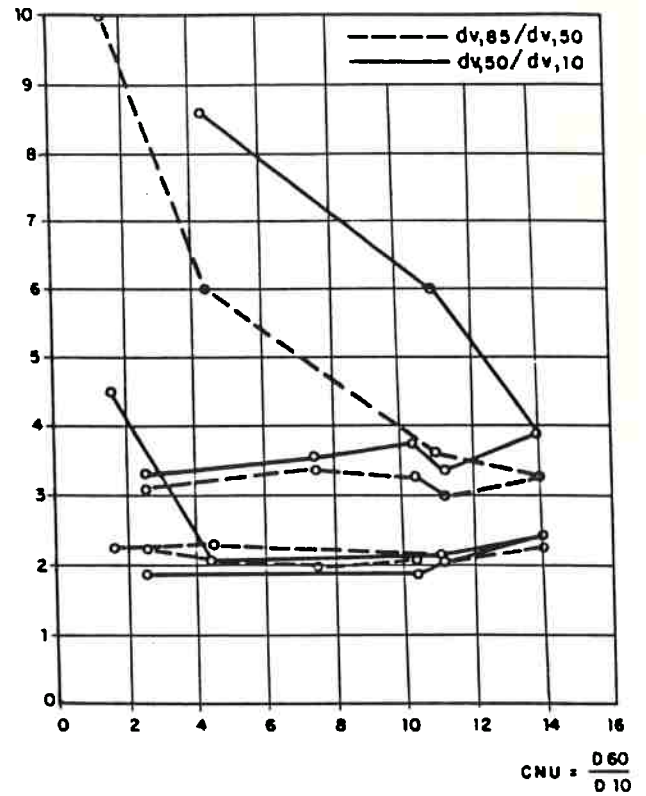
N_v = número total de vazios do filtro

B = número de vazios com $d_v > D$

P^* = intervalo de confiança



a - Granulometria em Massa/Volume



b - Granulometria em Número

FIGURA 2.4.2 - GRÁFICOS $d_{v,x}/d_{v,y}$ versus CNU (apud Musso-Federico-1.983)

Esta expressão quando $(1 - (n/N_v))$ e $(1 - (n/B))$ são próximos de um e n é insignificante em relação tanto a B e quanto a N_v , é igual a :

$$N_v \ln N_v - B \ln B + \ln(1 - P^*) = (N_v - n) \ln N_v + (B - n) \ln B \quad (2.4.4)$$

e através do manuseio desta última equação obtém-se :

$$n = \frac{\ln(1 - P^*)}{\ln(B/N_v)} = \frac{\ln(1 - P^*)}{\ln p} \quad (2.4.5)$$

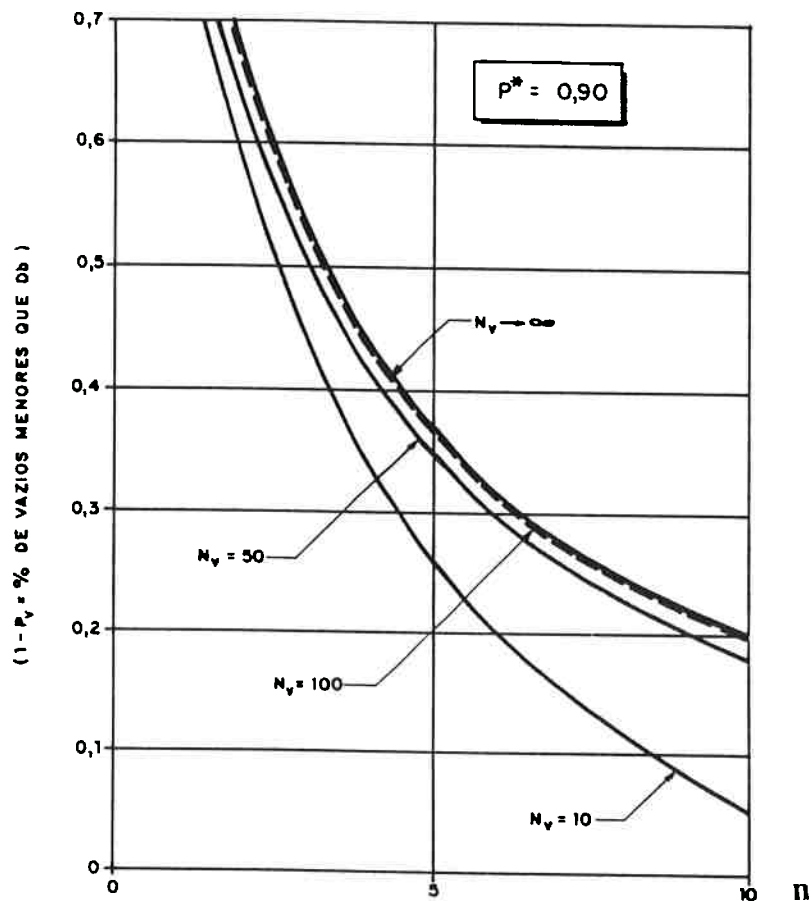
que coincide com a equação (2.1.5) deduzida por Silveira para a hipótese de que os confrontos são independentes.

Na Figura 2.4.3 apresenta-se os valores de n calculados pela equação 2.4.4 para diversos valores de N_v (número de vazios do filtro) e para um intervalo de confiança de 90%. Verifica-se que os valores de n são inferiores daqueles calculados admitindo que os confrontos são independentes (curva para N_v tendendo a infinito).

Os autores recomendam a utilização da hipótese de confrontos independentes uma vez que ela é conservadora, apresenta uma equação mais simples de aplicar e além do mais, o número de vazios do filtro (N_v) normalmente é muito grande.

Quanto ao trabalho de Musso-Federico podem ser feitos os seguintes comentários :

a) O trabalho é baseado em um conceito errôneo que é o de considerar a frequência de ocorrência das partículas estar associada ao número de partículas.



n = número de confrontos para que $d_v < D_b$
 D_b = diâmetro da partícula do material-base
 APUD MUSSO - FEDERICO (1.983)

FIGURA 2.4.3
 VARIAÇÃO DO NÚMERO DE CONFRONTOS COM O NÚMERO DE
 VAZIOS (N_v)

O uso da frequência em número de partículas faz com que o tamanho dos poros seja comandado exclusivamente pelos menores diâmetros, fazendo que uma areia média com pedregulhos (Filtro C), apresente uma porosimetria quase idêntica à de um pedregulho com areia média e grossa (Filtro H), o que não é verdade.

Esta consideração é baseada no modelo probabilístico de sorteio, que, conforme visto no item 2.2, não é correto, pois não leva em consideração as características físicas de cada partícula. Tal hipótese leva a resultados inexatos, como por exemplo que o “vazio de controle” de um filtro ser função exclusivamente das partículas inferiores ao D5 em massa, conforme sugere Kenney et all (1985).

Em vista do exposto, não se recomenda a adoção deste enfoque para o estudo de problemas de filtragem.

b) Um aspecto positivo deste trabalho é o de apresentar uma metodologia para a análise de carreamento admitindo que os confrontos não são independentes. Verificou-se que quando o número de confrontos (n) necessário para reter uma partícula do material-base (d) é muito pequeno em relação ao número total de vazios, o valor de n é o mesmo tanto para a hipótese de confrontos independentes quanto dependentes.

A diferença entre estes enfoques é que para confrontos independentes, analisa-se a possibilidade de encontrar d_v menor que d em relação a todos os vazios (N_v), enquanto que, para confrontos não-independentes, analisa-se a mesma possibilidade em relação aos poros possíveis de serem encontrados, ($N_v -$ vazios já confrontados).

Naturalmente quando o número de vazios confrontados (n) é muito menor que N_v , tem-se que $N_v \cong N_v - n$, e os números de confrontos são praticamente iguais.

Observa-se que como a adoção da hipótese de confrontos independentes é a favor da segurança e de cálculo mais simples, a sua utilização é recomendada.

2. 5 - Trabalho de Sherard e co-autores (1984)

Sherard e co-autores desenvolveram uma extensa pesquisa experimental para determinar critérios de filtro com base em relações granulométricas no laboratório do Soil Conservation Service em Lincoln - Nebraska.

Dentro desta pesquisa, para visualizar a geometria dos vazios (canais de fluxo) de pedregulhos, preparou-se amostras cilíndricas, de um pedregulho com diâmetro = 15 cm e altura = 13 cm, que eram preenchidas com cera quente. Após o resfriamento da cera em um congelador, a amostra era cortada em pedaços e os pedregulhos eram retirados, formando um “esqueleto de cera”.

A observação do “esqueleto de cera” do pedregulho ($3/8" < D < 1"$) e $D_{15} = 11\text{mm}$, mostrou que :

- a. Em um percurso de 25 a 50 mm (2 a 5 D_{15}) os canais de fluxo tinham aproximadamente as mesmas dimensões máximas e mínimas. Todos os canais possuíam seções transversais muito irregulares e as suas dimensões se repetiam várias vezes a cada 10 D_{15} de percurso.
- b. Medidas grosseiras mostram que a dimensão mínima é da ordem de 0,09 a 0,18 D_{15} .
- c. O “diâmetro médio” dos canais de fluxo é igual a 0,25 a 0,35 D_{15} e a máxima dimensão desses canais de fluxo contínuos é igual a 0,6 D_{15} .
- d. No contato cilindro-pedregulho os canais de fluxo eram maiores que os canais internos.

Ressalta-se que as relações propostas de Sherard e co-autores, foram feitas em caracter preliminar, por estarem baseadas no resultado do ensaio de um único material. Em princípio este resultado só pode ser extrapolado para filtros uniformes com CNU próximos ao ensaiado ($CNU = 1,7$).

Um aspecto muito importante desta pesquisa é a comprovação de que no contato cilindro-filtro os vazios são maiores que os canais internos, uma vez que a superfície do cilindro é côncava, e que tal fato pode comprometer o resultado de um ensaio de filtragem. Tanto que os autores reproduziram ensaios de Karpoff (1955), utilizando um “side material” constituído de um material fino ou massa de modelar colocado junto à parede do cilindro, e não houve carreamento do material-base, ao contrário do relatado no trabalho original.

Este aspecto pode explicar a divergência encontrada por Silveira (1966) nos ensaios de carreamento, que foi a passagem pelo filtro de partículas maiores que as esperadas, que o levaram a estudar um estado menos denso.

Observa-se que a metodologia proposta só é viável para materiais granulares grossos. Mesmo nestes materiais parece ser difícil a obtenção de porocanais contínuos com extensão representativa, uma vez que a retirada dos grãos pode danificar o esqueleto de cera. Outra dificuldade, é definir neste esqueleto, o que é um vazio e qual a sua dimensão de controle.

Caso fosse possível produzir um filtro com partículas constituídas de um material resistente (que pudesse ser compactado) e que imerso em um solvente, se dissolvesse sem alterar o material de preenchimento dos vazios, a caracterização e medidas dos poros-canais talvez pudesse ser feita com uma precisão adequada.

2.6 - Trabalho de Musso-Federico (1985)

Musso e Federico apresentam um modelo para caracterizar o meio poroso de um material baseado em métodos de Estatística Mecânica onde é introduzido o conceito de “estado provável” . No trabalho de 1983 destes autores, foram apresentados alguns resultados preliminares deste modelo, sem que o mesmo fosse apresentado com maiores detalhes, o que foi feito em 1985.

Para aplicar este novo conceito é necessário considerar que o número de partículas do material é muito grande e são conhecidos os valores de sua porosidade n_f , o volume do poro mínimo ($V_{mín}$) e o volume do poro máximo ($V_{máx}$).

O intervalo dos volumes de vazio entre $V_{mín}$ e $V_{máx}$ é dividido em q subintervalos, cada um contendo N_j vazios de volume V_j , que são associados a uma frequência F_j igual a :

$$F_j = N_j / N_v \quad (2.6.1)$$

onde N_v é o número total de vazios.

Conforme Musso-Federico, quando a população de vazios N_v é muito grande, ela pode ser considerada igual ao número total de partículas N_p . Observa-se que o volume de todos os vazios do material do filtro depende de sua porosidade (n_f) . Assim sendo, a distribuição do número N_j de vazios de cada um dos Q subintervalo V_j , precisa obedecer às seguintes condições de compatibilidade :

$$\sum_{j=1}^Q N_j = N_p \quad (2.6.2.a)$$

$$\sum_{j=1}^Q N_j V_j = \eta_f V_t \quad (2.6.2.b)$$

onde V_t é o volume total do material.

Conforme já visto em 2.3, o número de partículas com diâmetro D_i que possui uma percentagem em massa P_{mi} é igual a :

$$N_i = \frac{6 V(1-\eta_f)}{\pi} \frac{P_{mi}}{D_i^3} \quad (2.6.3)$$

Logo :

$$N_p = \frac{6 V_t (1 - \eta_f)}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{P_{mi}}{D_i^3} \quad (2.6.4)$$

Observa-se que uma configuração dada (macro- estado) do sistema pode ser obtida de diferentes maneiras (micro-estados) nas quais o número N_j pode ser associado aos volumes V_j . Admitindo que existem N_1 tipos de vazios com volume V_1 , N_2 com volume V_2, \dots , os possíveis micro-estados podem ser obtidos por análise combinatória como :

$$W = \frac{Np!}{N1! N2! \dots NQ!} \quad (2.6.5)$$

O número W de micro-estados que conduz a uma configuração (macro-estado) é proporcional à probabilidade de ocorrência do macro-estado. Esta probabilidade não é conhecida em geral, entretanto o grau de incerteza sobre o conhecimento relativo ao estado do material independentemente da distribuição $N_j(V_j)$ é expresso pela teoria da informação, como :

$$E = k \ln W \quad (2.6.6)$$

onde k é uma constante e a função E funciona de modo análogo à entropia da termodinâmica, sendo também denominada de entropia na teoria da informação. Por esta teoria, a distribuição mais provável $N_j(V_j)$ é aquela que maximiza a entropia (equação 2.6.5) com as condições de contorno dadas pelas equações 2.6.1.a e 2.6.1.b.

Os autores sem entrar em detalhes dos aspectos matemáticos, indicam que a condição de máximo pode ser obtida pelo método dos multiplicadores de Lagrange, conduzindo a :

$$N_j = Np \frac{e^{-\beta V_j}}{\sum_{j=1}^Q e^{-\beta V_j}} \quad (2.6.7)$$

onde a lei de distribuição de Maxwell-Boltzman é aplicável e conduz a :

$$F_j = \frac{N_j}{N_p} = \frac{e^{-\beta V_j}}{\sum_{j=1}^Q e^{-\beta V_j}} \quad (2.6.8)$$

$$V_j = V_{\text{mín}} + \ln C (j - 1) \quad (2.6.9)$$

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{V_{\text{mín}} - V_m}{V_{\text{mín}} - V_m + \ln C} \right)}{\ln C} \quad (2.6.10)$$

$$C = \frac{1 + \Delta V}{\Delta V} \quad (2.6.11)$$

(ΔV é o incremento considerado do volume do vazio)

$$V_m = \frac{n_f \cdot V_t}{N_p} \quad (V_m = \text{volume médio}) \quad (2.6.12)$$

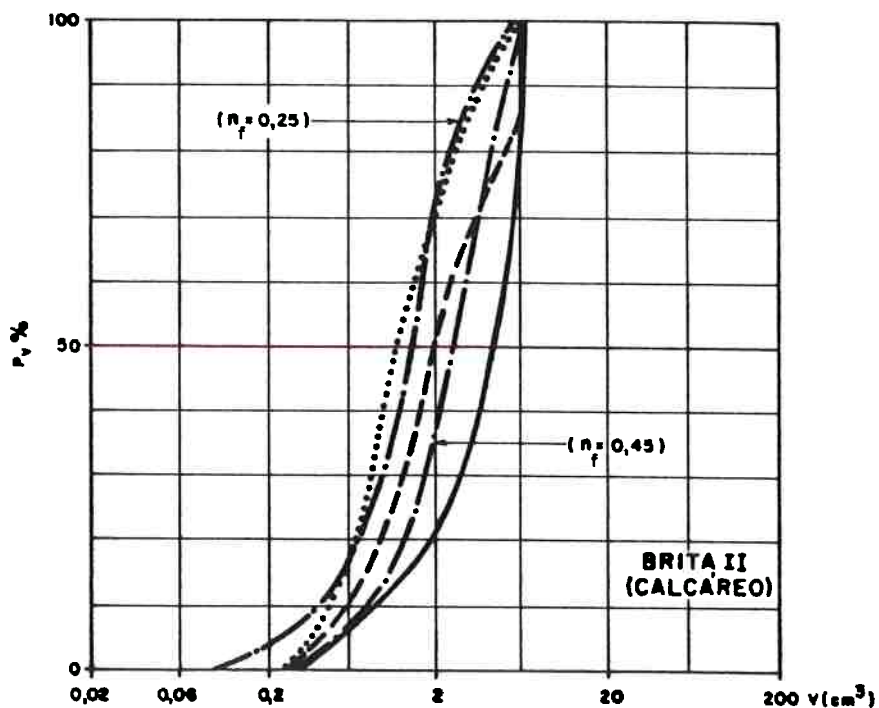
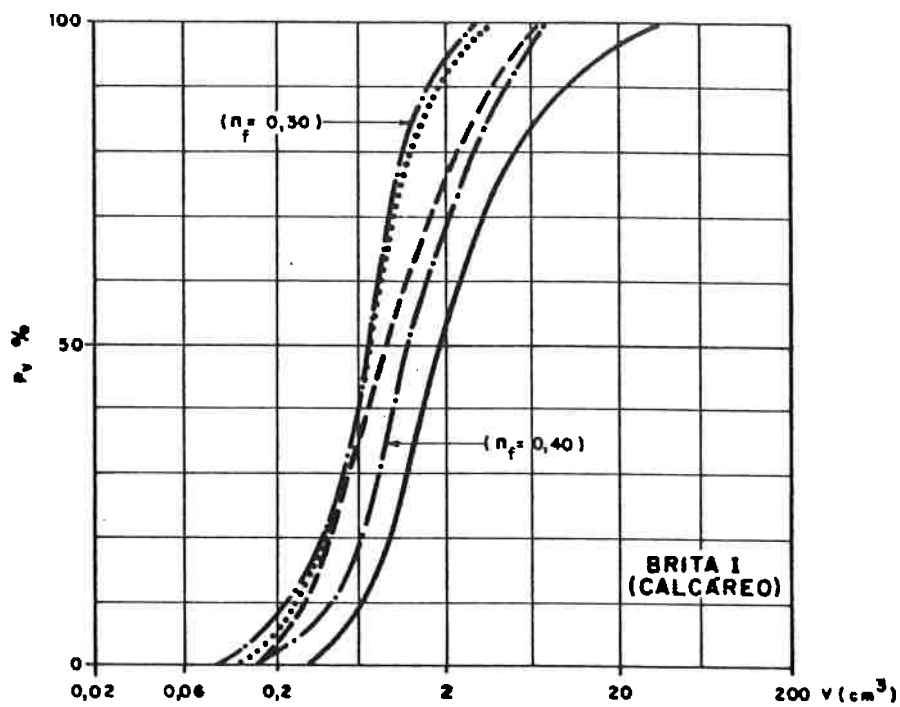
Para verificar a metodologia proposta, os autores compararam os valores calculados com os obtidos experimentalmente por Kesdi (1968) e verificaram que para haver uma aproximação dos resultados teóricos com os experimentais (ver Figura 2.6.1), a frequência F_j deveria ser transformada em frequência acumulada P_v pela equação :

$$P_v = \left(\sum_{i=1}^n V_i F_i \right) / \sum_{i=1}^Q V_i F_i \quad (2.6.13)$$

Um aspecto interessante do método proposto é o de poder levar em conta a porosidade do filtro no cálculo da distribuição dos vazios (ver Figura 2.6.1), todavia existem restrições ao seu uso que são as seguintes :

a) Os autores postulam que uma vantagem do método é que não são feitas hipóteses simplificadoras quanto à forma e ao tipo de agrupamento das partículas. Todavia para o cálculo do número total de partículas (N_p), adota-se que elas são esféricas.

Não é especificado como é feito o cálculo dos valores dos volumes dos vazios mínimos e máximos (V_{\min} e V_{\max}). Caso seja adotada a hipótese de que estes vazios são resultantes do agrupamento de três partículas com D_{\min} e D_{\max} respectivamente e se considerar o vazio esférico, uma brita com grãos angulares e um pedregulho arredondado, com a mesma curva granulométrica, terão a mesma porosimetria do mesmo modo que a teoria proposta por Silveira (1964).



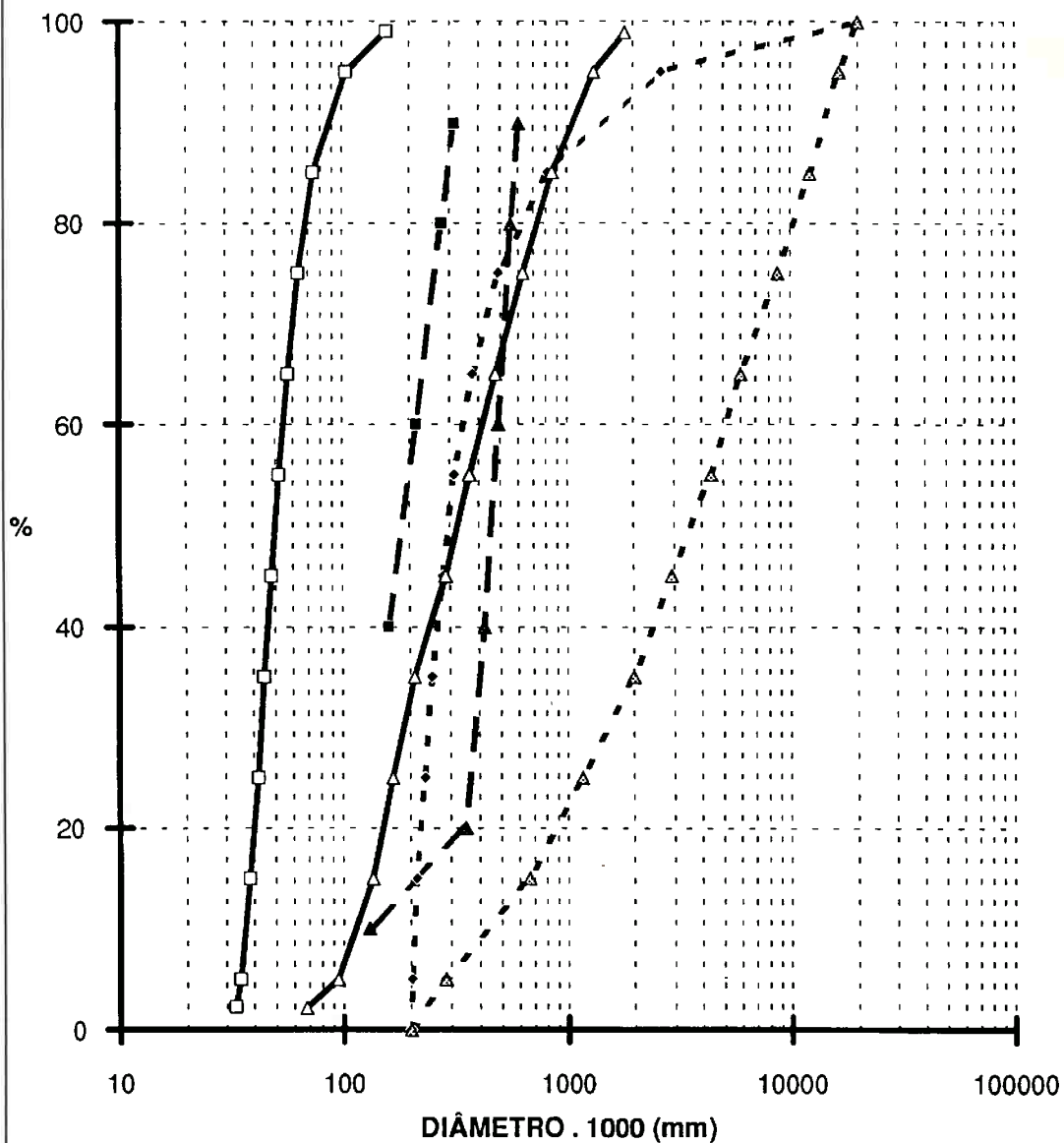
- fofo
 - denso
 - teórica
 - granulometria em volume
- } experimental

FIGURA 2.6.1 - CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS E DE VAZIOS EM VOLUME:
 EXPERIMENTAL : KESDI (1968)
 TEÓRICA : MUSSO-FEDERICO (1965)

b) A grande limitação da metodologia proposta é que a porosimetria obtida é a distribuição dos vazios em termos de **VOLUME** e não em termos da dimensão de passagem. Conforme já frisado na introdução deste capítulo, a curva de vazios que interessa para estudos de filtração é aquela que fornece a dimensão que controla a passagem ou retenção de uma partícula do material-base que se deseja proteger. Observa-se que a adoção da hipótese que estes vazios fossem esféricos, mesmo para valores pequenos de porosidade, obtém-se diâmetros equivalentes ora menores ora maiores que os obtidos pela hipótese de estado denso de Silveira (1964), conforme mostra a Figura 2.6.2 .

c) A adoção da distribuição em número de partículas conduz a resultados que se afastam dos valores experimentais de Kesdi. A adoção da distribuição ponderada de vazios faz com que os resultados teóricos se aproximem do experimental, fazendo supor que é em função deste fato, que no trabalho anterior (Musso-Federico(1983)) é adotado o mesmo ajuste.

**FIG 2.6.2 - COMPARAÇÃO ENTRE POROSIMETRIAS
OBTIDAS PELO ENFOQUE DE ENTROPIA (DIÂMETRO
EQUIVALENTE) E DE SILVEIRA**



—■—	C:	—□—	C:	—◆—	C:
	VAZIOS/EN		VAZIOS/SIL		GRANULO
	TROPIA		VEIRA		METRIA
—▲—	F:	—△—	F:	—△—	F:
	VAZIOS/EN		VAZIOS/SIL		GRANULO
	TROPIA		VEIRA		METRIA

2.7 - Trabalho de Tsutyia (1987)

Tsutyia desenvolveu um trabalho partindo do princípio que filtros bem-graduados ($CNU > 2$), tem uma estrutura primária formada pelos grãos de sua fração grossa, cujos vazios são preenchidos por partículas da fração fina, de modo a se obter um arranjo denso.

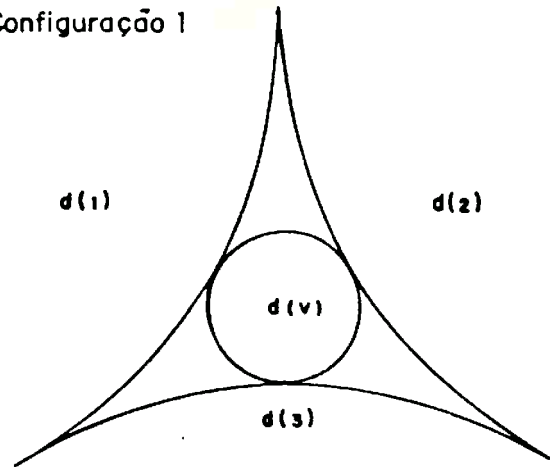
O autor apresenta o seguinte modelo para o preenchimento dos vazios da fração grossa e cálculo dos vazios restantes (vazios formados entre os grãos da fração grossa e os grãos da fração fina de preenchimento, e entre os grãos de preenchimento):

a) Calcula-se a distribuição de vazios da fração grossa (que possui $CNU=2$) pela teoria de Silveira(1964).

b) O espaço correspondente ao vazio dado pela teoria de Silveira, seria ocupado por uma partícula da fração fina, gerando 3 vazios restantes, formados pelos agrupamentos constituídos desta partícula com 2 grãos da fração grossa (ver Figura 2.7.1).

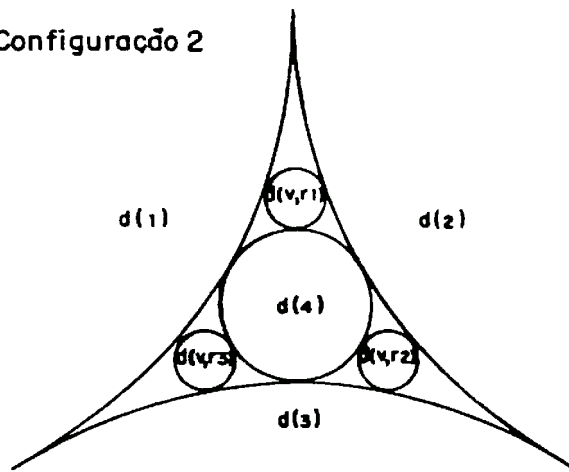
c) Por raciocínio análogo, considera-se que cada diâmetro do vazio restante é o de uma outra partícula da fração fina,(2° iteração), o qual gera mais 3 vazios restantes, e assim por diante.

Configuração 1



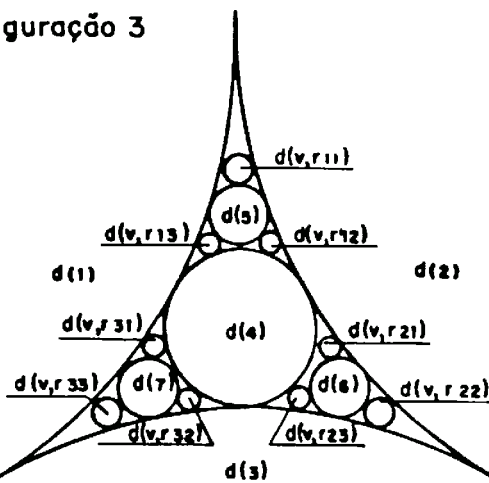
a - Diâmetro de Vazio Tangente segundo Silveira, 1964

Configuração 2



b - Diâmetros de Vazios Restantes de Primeira Iteração

Configuração 3



c - Diâmetro de Vazios Restantes de Segunda Iteração

FIGURA 2.7.1- ESQUEMA PARA CÁLCULO DOS VAZIOS, SEGUNDO TSUTUYIA (1.987)

Tsutyia apresenta um algoritmo de cálculo dos diâmetros dos vazios restantes e considera que a frequência de ocorrência de cada um deles, é dada pela equação :

$$P_v = \frac{3!}{3^n \cdot r_i! \cdot r_j! \cdot r_k!} \cdot (p_i^{r_i}) (p_j^{r_j}) (p_k^{r_k}) \quad (2.7.1)$$

onde n , é o número de iterações; p_i , p_j e p_k são frequências associadas às probabilidades de ocorrência dos diâmetros d_i , d_j e d_k e r_i , r_j e r_k são, respectivamente, o número de vezes que ocorrem estes diâmetros.

A análise desta equação mostra que a frequência de ocorrência dos vazios é função exclusiva da fração grossa do material , o que não é verdade.

Observa-se que, mesmo neste modelo, a partir da terceira iteração já ocorrem vazios em que nenhum grão da fração grossa participa na formação. A inconsistência do modelo é que filtros bem-graduados teriam a sua frequência de ocorrência dos vazios governada apenas pela sua fração grossa, independentemente do restante da composição granulométrica, uma vez que a formação dos vazios restantes passa a ser um problema geométrico, que é função do número de iterações realizadas.

Face às restrições conceituais expostas, este modelo deve ser desconsiderado para o cálculo da curva de distribuição de vazios de filtros de proteção.

2.8 - Trabalho de Atmatzidis (1989)

Neste trabalho pondera-se que a probabilidade de encontrar um vazio com um determinado diâmetro dv ao invés de ser associada à sua probabilidade volumétrica, conforme indica Silveira (1964), deveria ser associada à área transversal do vazio de diâmetro dv .

Atmatzidis sugere que se calcule a curva de probabilidade dos vazios a partir da curva granulométrica do filtro, segundo os procedimentos propostos por Silveira.

A esta curva de distribuição de vazios seria associada uma curva de probabilidade obtida através do seguinte raciocínio :

a) a curva de distribuição de vazios (ver Figura 2.8.1) é transformada em uma curva descontínua, dividindo-a em m partes, cada uma representada por seu diâmetro médio e possuindo uma percentagem de ocorrência P_{vi} (raciocínio análogo ao que Silveira adota para obter a curva de distribuição de vazios a partir da curva granulométrica em massa).

b) A probabilidade de uma partícula do material encontrar um vazio com diâmetro d_{vi} é igual a :

$$P_i = \frac{N_i \cdot d_{vi}^2}{\sum_{j=1}^m n_j \cdot d_{vj}^2} = \frac{\text{Área transversal dos vazios } d_{vi}}{\text{Área transversal de todos os vazios}} \quad (2.8.1)$$

onde N_i é o número de vazios com diâmetro d_{vi}

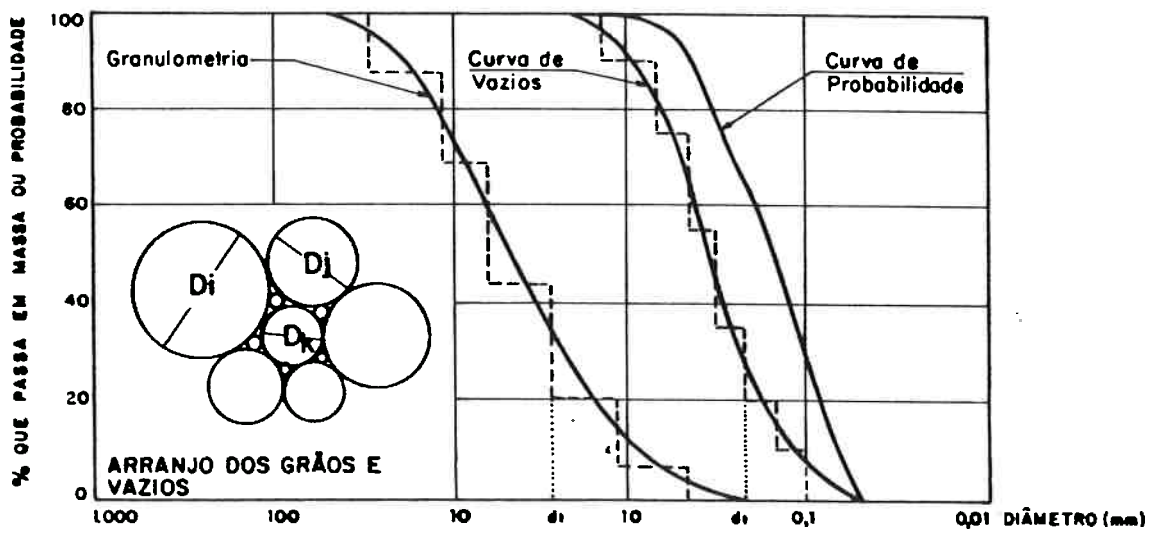


FIGURA 2.8.1 - CURVAS DE VAZIOS CONFORME ATMATZIDIS (1.989)

c) a percentagem de ocorrência P_{vi} pode ser expressa como o quociente entre o volume de todos os vazios d_{vi} e o volume de todos os vazios (V_v) que conduz a :

$$P_{vi} = \frac{N_i \cdot v_i}{\sum_{j=1}^m N_j \cdot v_j} = \frac{N_i (\pi d_{vi}^3 / 6)}{V_v} = \frac{(\pi / 6) N_i d_{vi}^3}{(\pi/4)K \sum_{j=1}^m N_j \cdot d_{vj}^2} \quad (2.8.2)$$

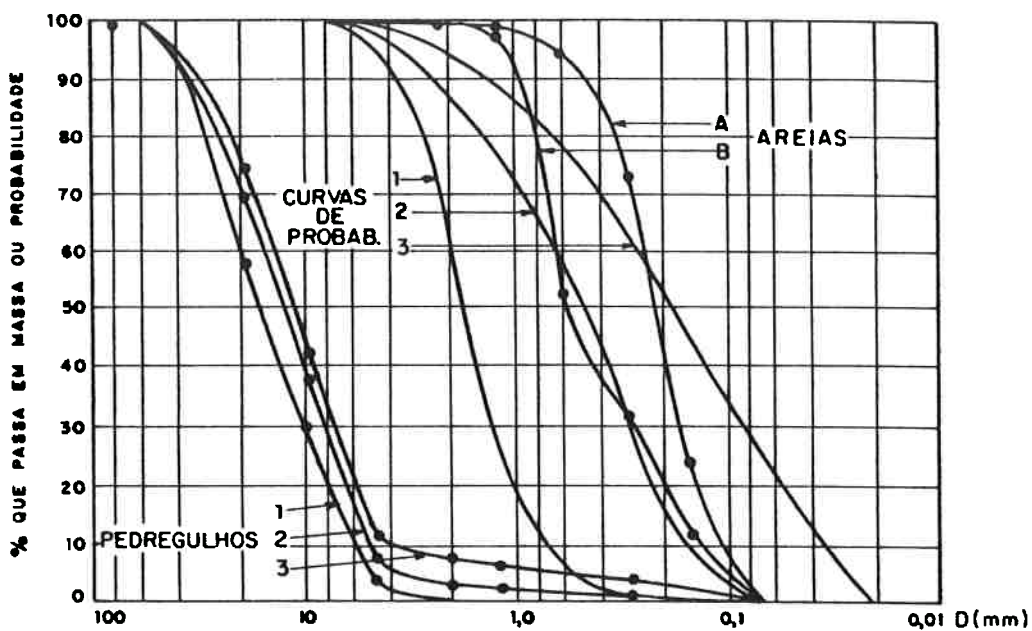
desde que se admita que o volume total de vazios é igual à área transversal dos vazios multiplicado por fator geométrico (K) que possui unidade de comprimento.

d) Dividindo a equação (2.8.1) pela equação (2.8.2) obtém-se :

$$\frac{P_i}{P_{vi}} = \frac{3K}{2 d_{vi}} \text{ ou } P_i = C \cdot \frac{P_{vi}}{d_{vi}}, \text{ onde } C * \sum_{j=1}^m \frac{P_i}{d_{vi}} = 1 \quad (2.8.3)$$

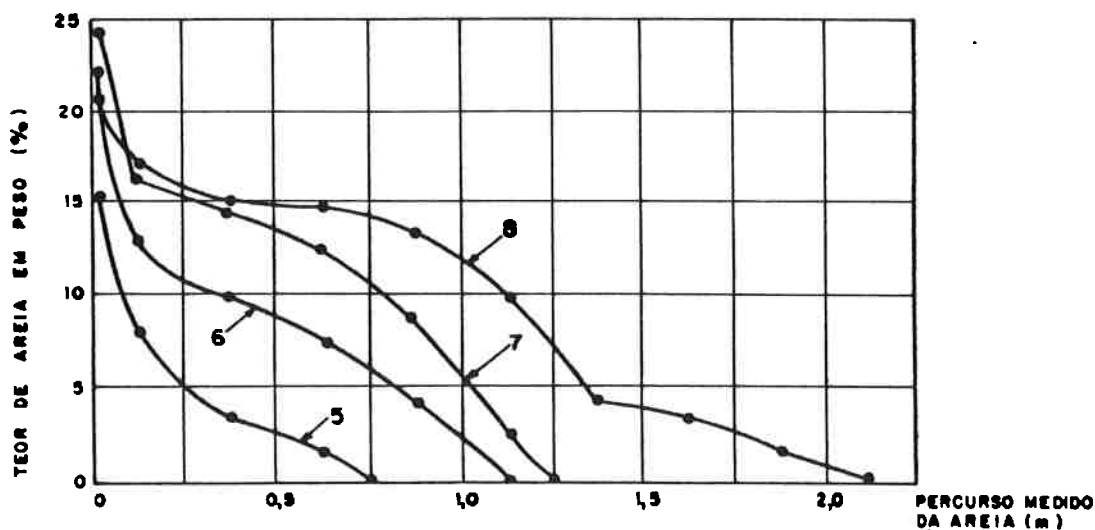
Para verificar sua proposta, Atmatzidis fez uma série de ensaios de laboratório onde estudou a migração de areia em pedregulhos com diferentes teores de areia (0 a 8%).

Os resultados dos ensaios apresentados no trabalho (ver Figuras 2.8.1 e 2.8.2) referem-se a curvas de teor de areia em massa versus distância da interface areia x pedregulho, sem discriminar a granulometria da areia presente no pedregulho.



a - Materiais Ensaídos

ENSAIO	5	6	7	8
MATERIAIS	A,3	A,2	B,1	A,1
TEOR DE AREIA EM PESO	8%	4%	0%	0%
PERCURSO MÁX. DA AREIA (cm)	75	110	125	215
MASSA CARREADA DE AREIA (Kg)	3,17	7,88	9,25	14,5
TEMPO PARA CESSAR ARRASTE (h)	3,25	3,50	3,00	6,50



b - Resultados dos Ensaios

FIGURA 2.8.2 - RESULTADOS DO TRABALHO DE ATMATZIDIS (1.989)

Observa-se ainda que devem ter sido utilizados equipamentos com grandes dimensões uma vez que mediu-se percursos de até 215cm e as massas de areia que penetraram no pedregulho atingiram até 14,5kg e o transporte de areia cessava após 3 a 6 horas de ensaio.

O autor observa que, quando o teor de areia foi de 4%, os percursos previstos e observados foram próximos para todo o intervalo de variação dos diâmetros das areias ensaiadas. Todavia, quando o teor de areia era de 0%,(pedregulho limpo) , os percursos previstos foram maiores que os observados e quando o teor de areia foi de 8% ocorreu o oposto.

Também foi observado que o término do processo de migração de areia em todos os ensaios, ocorria quando nos primeiros 5 a 7cm do pedregulho adjacente à areia , o teor de areia torna-se elevado (em torno de 20% em massa).

Quanto ao trabalho de Atmatzidis podem ser feitos os seguintes comentários :

a) ao se analisar o corte transversal esquemático de um filtro mostrado na Figura 2.8.1,a hipótese de que a probabilidade de encontrar um vazio é proporcional à sua área transversal intuitivamente parece ser lógica.

Todavia , para obter a expressão desta probabilidade, na equação 2.8.2 para o cálculo do volume do vazio de diâmetro d_{vi} , ele é admitido esférico , $(\pi d_{vi}^3/6)$, enquanto que para o cálculo do volume total de vazios (V_v), admite-se que ele é igual ao produto da área do círculo de diâmetro d_{vi} versus um fator K com unidade de comprimento, ou seja, admite-se que o vazio é cilíndrico , o que mostra uma falta de coerência na dedução do valor da probabilidade P_i .

b) Não é possível uma análise detalhada dos resultados dos ensaios de carreamento, de areia x pedregulho, pois são apresentadas curvas de teor de areia x percurso, sem que se discrimine a granulometria da areia retida ao longo da espessura do pedregulho.

Outro aspecto que deve ser observado é que a curva de distribuição de vazios do pedregulho se altera, torna-se mais “fina”, à medida que a areia é retida.

Por este motivo, em ensaios de carreamento, os percursos experimentais que devem ser comparados com os previstos, são aqueles que ocorrem imediatamente após o início do fluxo, quando a porosimetria do filtro é “limpa”, isto é, não foi alterada pela captura de partículas do material-base e conseqüente formação de camadas de autoretenção.

2.9 - Trabalho de Silveira (1993)

Silveira propõe a determinação da curva de distribuição de vazios através da retro-análise de ensaios de carreamento utilizando a metodologia proposta em seu trabalho de 1964 (ver item 2.1).

De acordo com esta teoria o número de confrontos necessários para uma partícula de diâmetro db^* ter o seu transporte interrompido é igual a :

$$n = \frac{\log(1 - P^*)}{\log p} \quad (2.9.1)$$

e o percurso no interior do filtro é :

$$S = n \times s \quad (2.9.2)$$

Das equações (2.9.1) e (2.9.2) obtém-se :

$$\log p = \log (1 - P^*) \times (s/S), \quad (2.9.3)$$

onde , conforme já apresentado no item 2.1 , p é a percentagem de vazios igual ou maior que db^* e s é o percurso por confronto .

Esta equação mostra que para cada espessura S de um filtro de proteção, pode-se associar um par de valores de db^* e p , sendo que P^* representa a probabilidade com que db^* tenha um percurso igual a S .

Silveira mostra que é possível determinar pares de valores (dv,p) da porosimetria de um filtro de proteção através de ensaios de carreamento de uma solução de material-

base, desde que se faça a determinação da granulometria do material que atravessa este filtro.

O raciocínio utilizado por Silveira é o seguinte :

Seja d_c um diâmetro característico da granulometria do material que atravessa um filtro de espessura T . Caso se adote d_c tal que a sua percentagem p_c de partículas menores ou iguais a d_c , seja próxima de 100% pode-se afirmar que praticamente $d_c = d_b^*$ e $T=S$, e associando-se o valor de p calculado através da equação 2.9.3 à sua percentagem de vazios, obtém-se um ponto da porosimetria do filtro .

Realizando-se ensaios para diferentes espessuras de filtro, conforme ilustra a Figura 2.9.1, é possível obter outros pares de pontos e assim determinar a sua curva de distribuição de vazios .

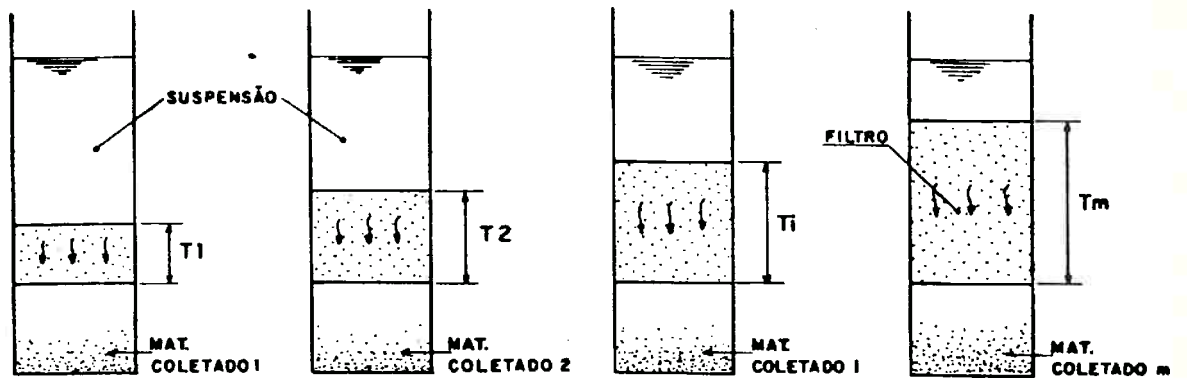
Apesar da simplicidade da metodologia proposta, Silveira observa que certos cuidados merecem atenção, tais como :

a) A suspensão a ser utilizada e as espessuras T_i devem ser cuidadosamente escolhidas para cobrir todo o intervalo da curva de vazios e facilitar a percolação.

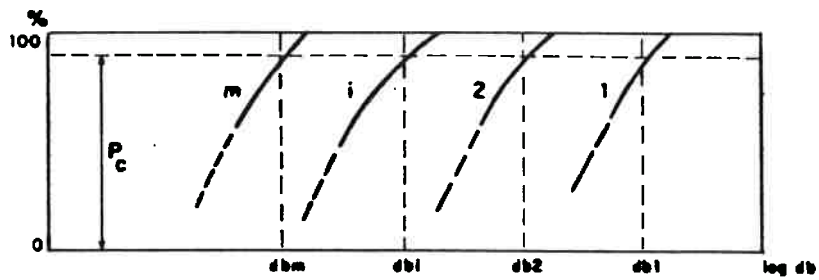
b) A quantidade de material coletado deve ser a mínima necessária para a determinação de sua granulometria, sendo que somente a sua fração grossa é que interessa.

O material deve ser coletado na primeira frente de percolação, quando o filtro está “limpo”, isto é, não foram retidas partículas no interior do filtro, o que altera a sua porosimetria.

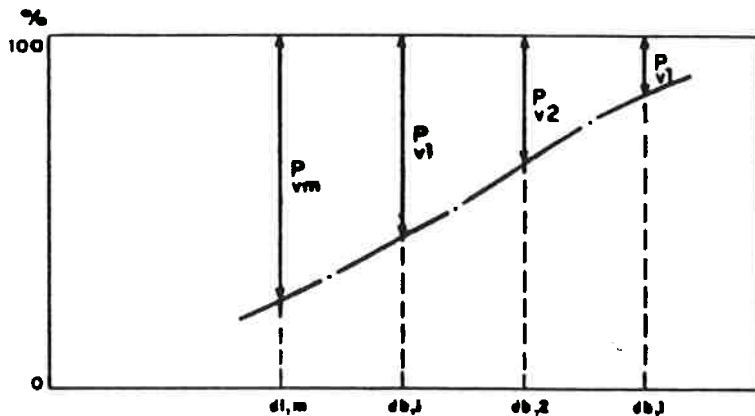
Para atender a estes requisitos, o autor recomenda a utilização de equipamentos de grande dimensão.



a - Ensaio de Carreamento com Filtros com diversas Espessuras



b - Granulometria em Massa do Material Coletado



$$\log P_{vi} = \frac{\log(1 - P_i)}{T_i} \cdot s$$

c - Cálculo da Porcentagem de Vazios Pvi

FIGURA 2.9.1 - TRABALHO DE SILVEIRA (1.993)

c) No atual estágio de conhecimento o valor do percurso unitário (s) não está bem definido, sendo sugerido a média geométrica (D_g) como uma primeira aproximação. Silveira observa que o valor de s pode ser utilizado como um fator de ajuste e que sua determinação deve ser melhor pesquisada .

Soria e co-autores (1993) apresentam resultados de ensaios feitos conforme as recomendações de Silveira, tendo sido obtido uma curva de distribuição de vazios próxima à prevista pela teoria de Silveira (1964).

Estes ensaios seguiram os seguintes procedimentos:

- Foram utilizados filtros com $CNU=2.4$ constituído de areia e pedregulho com espessura maior ou igual a $2 D_{max}$.
- As partículas do material-base eram maiores que $0,037\text{mm}$ (peneira 400) de modo a tornar possível utilizar somente peneiramento para a análise granulométrica do material que atravessa o filtro e minimizar efeitos não geométricos na retenção de partículas pelo filtro.
- O diâmetro máximo do material-base era igual ao diâmetro mínimo do filtro.
- Utilizou-se um cilindro de CBR com um permeâmetro acoplado para os ensaios (ver Figura 2.9.2).
- O filtro era compactado de modo a atingir um estado denso.
- Fazia-se percolar água da rede pública, com uma carga constante de 8 cm. Ao mesmo tempo a suspensão com material-base era introduzida no permeâmetro. O tempo de percolação foi de 10 a 20 segundos aproximadamente.
- Todo o material que passava pelo filtro era recolhido e seco em estufa.

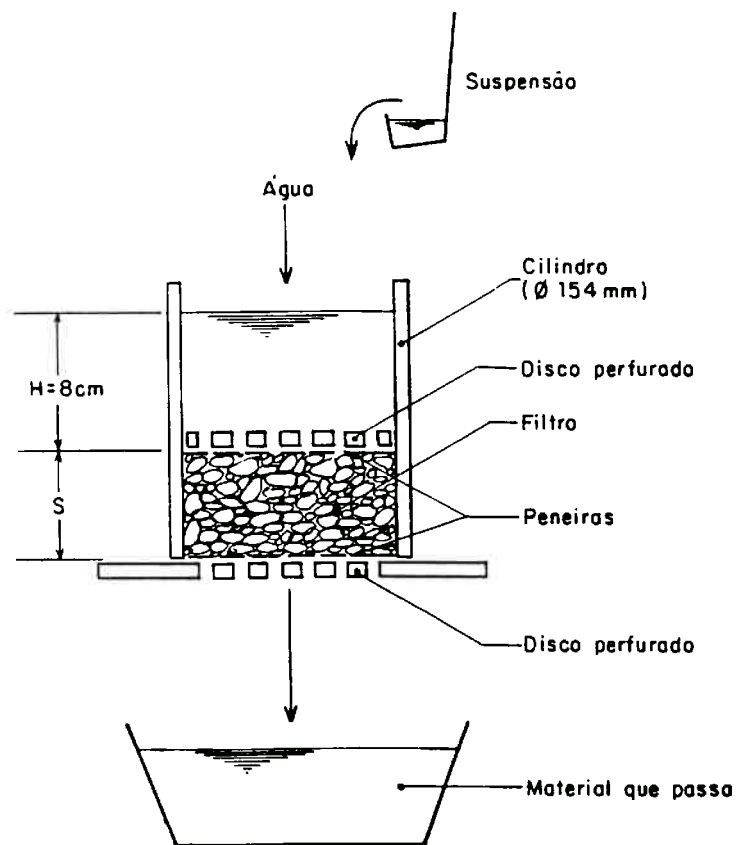


FIGURA 2.9.2 - ESQUEMA DO ENSAIO DE SORIA ET AL (1.993)

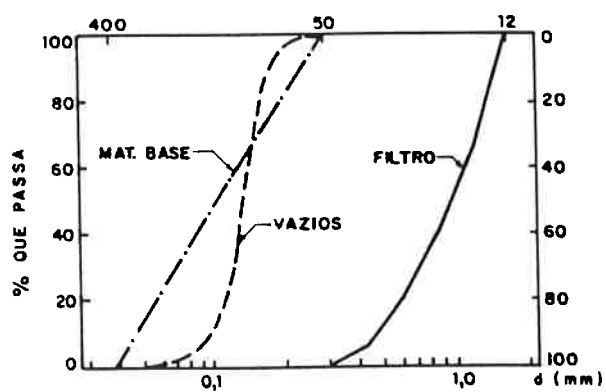


FIGURA 2.9.3 - MATERIAIS ENSAIADOS

Na Figura 2.9.3 apresenta-se a curva granulométrica do filtro ensaiado.

Na Figura 2.9.4 apresenta-se um exemplo de determinação da curva de vazios pela metodologia em questão.

Na Figura 2.9.5 são apresentadas a variação das porosimetrias em função dos fatores intervenientes na retro-análise tais como: o intervalo de confiança, o percurso por confronto e o tipo de material-base utilizado .

Os resultados obtidos mostram que esta linha de pesquisa é muito promissora , mas conforme os próprios autores observam, este primeiro ensaio deve ser visto como uma investigação preliminar da abordagem de Silveira .

A análise dos resultados apresentados permite tecer os seguintes comentários:

a - A forma do material-base usado na suspensão é muito importante na mobilidade das partículas (ver Peter(1970) e Humes(1985)) e, conseqüentemente, na determinação da porosimetria . Quanto mais esférica a partícula, mais grossa foi a porosimetria obtida .

b - A precisão da análise granulométrica do material que atravessa o filtro é vital para a metodologia proposta .

Para se obter resultados adequados deve-se escolher o diâmetro característico dc com pc próximo de 100% , entretanto, os trechos extremos das curvas granulométricas são os que apresentam maior dispersão (vide De Mello (1977)). Para melhorar a precisão da análise granulométrica seria interessante coletar uma quantidade maior de material-base, por outro lado, quanto maior é esta quantidade, maior é a possibilidade de bloqueio dos vazios pela primeira frente de percolação, o que interfere na porosimetria .

Com uma série de ensaios comparativos certamente será possível obter a solução mais adequada. Sugere-se a utilização do maior número de peneiras possível e a adoção de pc próximo de 98% , mesmo quando se adota intervalos de confiança maiores que 98% na retro-análise .

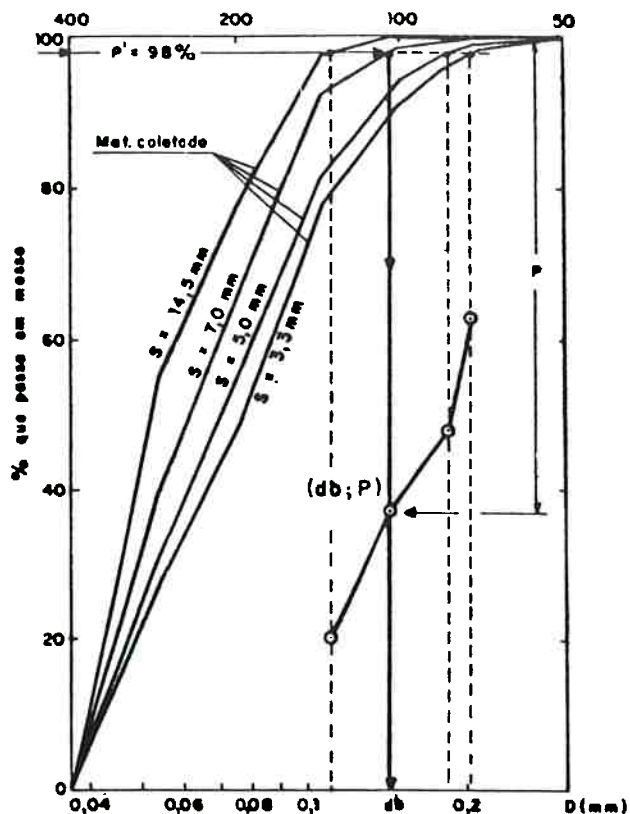


FIGURA 2.9.4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE CURVA DE VAZIOS

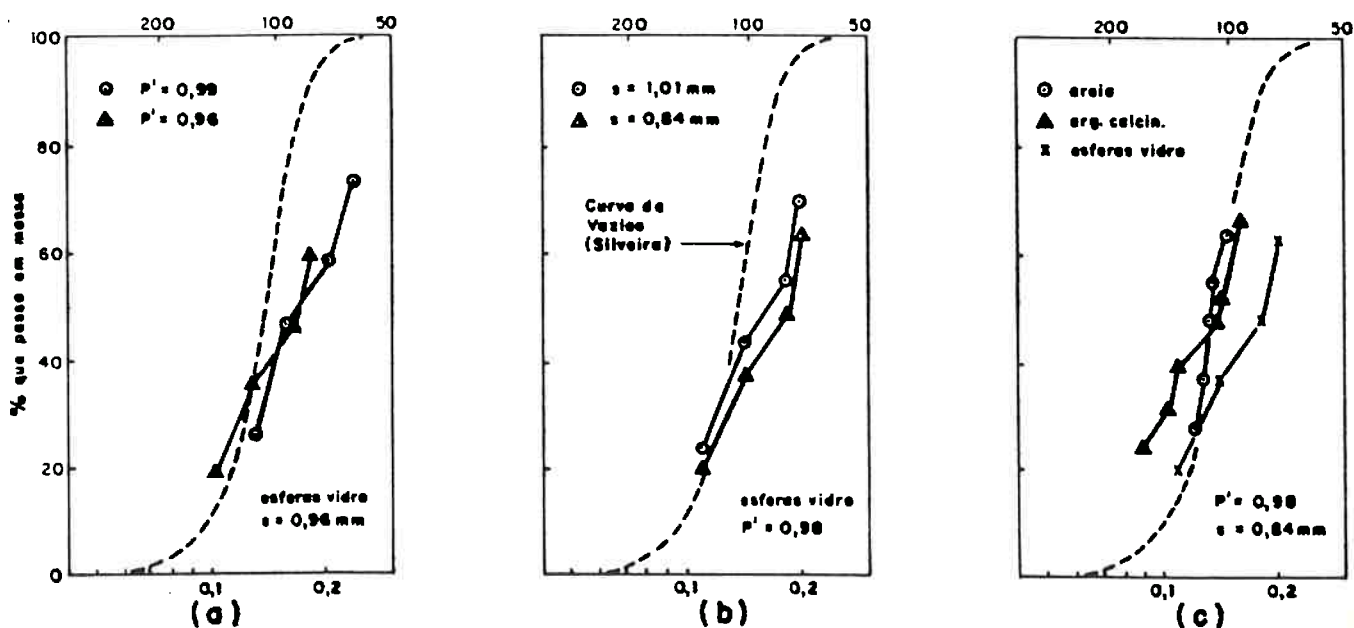


FIGURA 2.9.5 - FATORES INTERVENIENTES NA CURVA DE VAZIOS

- a - Intervalo de confiança
- b - Percurso unitário
- c - Material base

c - Observa-se que o valor de p calculado pela equação 2.8.3 é diretamente proporcional ao valor do percurso unitário (s).

Conforme ressaltado por Silveira a obtenção de s é uma questão aberta, sendo sugerido pelo mesmo a média geométrica (D_g).

Para o filtro ensaiado ($CNU = 2,3$) a média geométrica é igual ao D_{40} , a média ponderada pela porcentagens em massa é igual ao D_{55} , obtendo-se valores próximos ao D_{50} inicialmente proposto por Silveira (1964)

No trabalho de Wittman (ver item 2.3) é sugerido para o valor de s o quociente entre o número de partículas por unidade de área e o número de partículas por unidade de volume ($s = N_a / N_v$). Utilizando as expressões fornecidas na Tabela 2.3.1 em função da distribuição em massa das partículas, obtém-se :

$$s = N_a / N_v = \Sigma p_{mi} / \Sigma (p_{mi} / D_i) = D_h \quad (2.9.4)$$

onde D_h é a média harmônica dos diâmetros ponderada pela porcentagem de massa . Para o filtro em questão D_h é igual ao D_{39} .

A média harmônica também foi obtida como sendo representativa da dimensão média dos grãos de um material granular por Aberg (1992a), ao estudar qual a corda média (g) em uma seção de um pedregulho natural arredondado, sendo g a intersecção de uma linha imaginária e o volume do grão (ver item I.8 do Anexo I).

Para um grão individual Aberg obteve $g = D/2$, sendo D o diâmetro do ensaio de peneiramento. Ao generalizar para a curva granulométrica , obteve que $g_m = D_h / 2$, isto é, a dimensão média representativa é a média harmônica .

Tendo em vista o exposto, sugere-se que o percurso por confronto seja adotado igual à média harmônica. Para uma estimativa preliminar de D_h , pode-se utilizar os resultados obtidos para as transições da Barragem Pedra do Cavalo por Humes (1986b) : $D_h = D_{50}$ para CNU menor que 2 e $D_h = D_{35}$ para CNU entre 2 e 5 .

d - Conforme relatado por Soria e co-autores não foram tomados cuidados especiais para eliminar os maiores vazios que se formam no contato do filtro com a parede do molde . Com isto a porosimetria obtida pode ser mais grossa que a real . Este aspecto é muito importante e deve ser levado em consideração nas pesquisas futuras .

Ressalta-se que a retro-análise de ensaios de carreamento é uma linha de pesquisa muito importante não só para a determinação direta da curva de vazios de um filtro, como para aferir as soluções analíticas para uma questão de tão grande importância , uma vez que nem sempre é viável a realização de ensaios.

3 - Discussão dos Trabalhos sobre a Determinação da Curva de Distribuição de Vazios e dos Fatores Intervenientes

Neste capítulo, a partir da discussão dos fatores intervenientes no cálculo da curva de distribuição de vazios, será feita uma análise crítica dos trabalhos apresentados no capítulo anterior.

Observa-se que em razão do grande número e complexidade dos fatores intervenientes, a determinação da porosimetria de um filtro através de um modelo determinístico exato, é uma tarefa praticamente impossível, sendo necessário lançar mão de hipóteses simplificadoras e de um enfoque probabilístico para se obter soluções adequadas.

Entre os principais fatores intervenientes na porosimetria de um filtro de proteção destacam-se :

- a) Conceito de vazio de controle
- b) Caracterização das partículas do filtro quanto à sua forma e dimensão.
- c) Compacidade do filtro.
- d) Hipótese para o cálculo da frequência de ocorrência dos vazios de controle.

A seguir, serão analisados estes aspectos, sendo que face à inter-relação entre os mesmos, quando necessário, eles serão tratados de forma integrada.

3.1 - Conceito de Vazio de Controle

Os vazios de um filtro são os espaços formados entre os agrupamentos das partículas, os quais são intercomunicados entre si. A passagem de uma partícula do material-base, através de um vazio é condicionada pela sua menor dimensão, a qual é denominada de vazio de controle ou passagem.

O conceito de vazio de controle é bem definido no modelo de Silveira (1964), que o define como o diâmetro da circunferência tangente ao agrupamento de três partículas esféricas tangentes entre si (estado denso). Esta circunferência ocorre no plano formado pelo centro das três partículas.

No estado menos-denso, Silveira (1966), ao se analisar o agrupamento de quatro partículas, é necessário admitir que o centro da quarta partícula esteja no mesmo plano que o centro das outras três, o que conduz a uma distorção na distribuição espacial dos grãos, não possuindo o mesmo sentido físico que o modelo anterior.

No trabalho de Wittmann (1979), o plano onde é feita a medida da circunferência tangente ao agrupamento dos grãos é aleatório, pois é o plano onde o corpo de prova foi seccionado. Logo, as passagens determinadas são superestimadas, uma vez que em poucos casos haverá coincidência entre o plano de seccionamento e o plano onde ocorre o vazio de controle.

No trabalho de Musso-Federico(1985), a determinação da curva de vazios é feita em termos de volume, o que não permite verificar se uma partícula do material-base passa ou é retida no vazio. O cálculo do diâmetro da esfera de mesmo volume que o vazio, superestimarà a passagem, conforme mostrado na Figura 2.6.2.

Os trabalhos de Musso-Federico (1983) e de Atmatzidis (1989), sob este aspecto, são extensões do trabalho de Silveira (1964), diferenciando-se do mesmo no que se refere à obtenção da frequência de ocorrência dos vazios de controle.

3.2 - Sobre a Forma e Dimensão das Partículas dos Filtros

A análise granulométrica feita segundo a teoria clássica de Mecânica dos Solos, associa a cada partícula de solo um diâmetro nominal, admitindo que ela seja esférica. No ensaio de peneiramento, o diâmetro nominal é igual à abertura da peneira e no ensaio de sedimentação, o diâmetro nominal é igual ao diâmetro da esfera que sedimenta com a mesma velocidade de queda.

Esta hipótese está presente nos trabalhos de Silveira (1964,1965,1966) para o cálculo do diâmetro dos vazios e quando admite que a distribuição em volume pode ser associada à distribuição em massa da análise granulométrica. Também está presente no trabalho de Musso-Federico (1983) para o cálculo da distribuição em número de partículas e, no trabalho de 1985 destes autores, para o cálculo do número total de partículas (N_p); que é admitido igual ao número total de vazios (N_v).

Como no trabalho de Atmatzidis (1989), a determinação da frequência de ocorrência de vazios é feita a partir da curva de distribuição de vazios de Silveira (1964), a simplificação de considerar as partículas esféricas também está presente.

Esta simplificação só não está presente nas determinações experimentais da curva de distribuição de vazios de Wittmann (1977) e Silveira (1993).

No trabalho de Wittmann, ao se analisar os vazios formados pelo agrupamento de 3 ou 4 partículas em um corte transversal do filtro, não é feita nenhuma hipótese quanto à forma das partículas. Entretanto, o plano onde é feita a medida do “diâmetro” do vazio (admite-se que a partícula do material-base é esférica), não é necessariamente o plano em que ocorre o “diâmetro de controle” do vazio, que é a característica que interessa no problema de filtragem. Consequentemente, a “porosimetria plana” obtida superestima os diâmetros dos vazios do filtro.

A definição exata do que é o vazio de controle e de sua dimensão (diâmetro) que regula a passagem de um grão do material-base é obtida apenas para a hipótese de Silveira (1964), que admite que as partículas são esféricas e tangentes (três a três) entre si.

Uma observação interessante quanto à importância da forma das partículas é feita por Wittmann que no cálculo de N_a e N_v (número de partículas por unidade de área e volume), onde recomenda-se como coeficiente de ajuste, o coeficiente de forma (r_v), igual à relação entre o volume real e o volume esférico da partícula obtido através do seu diâmetro nominal. Marsal (1963) apresenta um estudo detalhado de diversos materiais granulares, onde ele apresenta coeficientes de forma : lineares (r_l = relação entre dimensão média e diâmetro nominal), de área (r_a = relação entre área lateral medida e a área lateral esférica) e de volume (r_v) como definido acima.

Para um pedregulho subangular de andesito com diferentes granulometrias, foram obtidos os seguintes valores:

$$\begin{aligned} r_l &= 0,92 \text{ a } 1,04 \quad (r_{lm} = 0,95) \\ r_a &= 0,73 \text{ a } 1,31 \quad (r_{am} = 1,06) \\ r_v &= 0,49 \text{ a } 0,89 \quad (r_{vm} = 0,76) \\ r_v' &= 0,78 \text{ a } 0,97 \quad (r_v'm = 0,87) \end{aligned}$$

sendo $r_v' = \text{volume real} / \text{volume esférico}$ com $D = D_m$

$D_m = \text{média das três dimensões principais.}$

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para o cálculo do fator de forma r_v' , tendo sido obtido valores entre 0,40 e 0,69 para britas, com um valor médio em torno de 0,60, que são próximos aos calculados para elipsóides de revolução.

Apesar do trabalho árduo (é necessário determinar o coeficiente de ajuste para cada fração granulométrica do filtro), e possível obter coeficientes de ajustes à forma dos grãos para o cálculo da frequência de ocorrência dos mesmos em volume. Este aspecto merece ser alvo de futuras pesquisas.

Tendo em vista o exposto neste item e no anterior, a hipótese de admitir as partículas esféricas é necessária para o cálculo analítico do diâmetro de controle e permite agilizar o cálculo da distribuição das partículas através dos ensaios correntes de peneiramento e sedimentação. Deve se levar em consideração ao se analisar o cálculo de porosimetria, que, quanto mais próxima de uma esfera for a forma da partícula, mais preciso será o resultado e vice-versa.

3.3 - Quanto à Compacidade do Filtro

O trabalho pioneiro de Silveira (1964) admite o filtro no estado de máxima compacidade, o que conduz a agrupamentos de três partículas tangentes entre si. Em 1966, apresenta um estudo de um estado menos denso, onde estuda o agrupamento de quatro partículas tangentes entre si.

O enfoque de entropia de Musso-Federico (1985) permite introduzir a porosidade do filtro (n_f) no cálculo da porosimetria. Todavia, conforme visto no item 3.1, esta metodologia possui a restrição de que a distribuição de vazios obtida é em volume e não em função do “diâmetro” do vazio de controle, que é a característica que interessa nos problemas de filtragem.

Assim sendo, as teorias existentes limitam a determinação da porosimetria a filtros (densos), bem compactados, que é a condição mais freqüente em obras geotécnicas.

3.4 - Determinação da Frequência de Ocorrência dos Vazios

Conforme visto no item 3.1, as metodologias de Wittmann (1977) e de Musso-Federico (1985) não determinam a dimensão de controle do vazio, conseqüentemente, estas metodologias têm de ser vistas com reserva para estudos de filtros de proteção.

No trabalho de Wittmann a freqüência dos “vazios planos” é obtida por contagem e no trabalho de Musso-Federico a freqüência dos volumes dos vazios é obtida através do conceito de entropia. Observa-se que para os valores calculados por Musso-Federico se ajustassem aos valores experimentais de Kesdi (1968), foi necessário ponderar a freqüência obtida pelo volume do vazio (ver equação 2.6.13) .

A determinação da porosimetria do filtro de proteção em termos de “diâmetro de controle”, só é possível através dos enfoques de Silveira(1964) e Silveira (1993).

Através da realização e interpretação de ensaios de carreamento segundo as diretrizes dadas por Silveira (1993) é possível a determinação da porosimetria, ou seja, dos diâmetros dos vazios de controle e da sua freqüência de ocorrência.

Estes ensaios requerem cuidados especiais e ainda não estão sistematizados, conforme ressalta Soria e co-autores (1993), que são os primeiros pesquisadores a realizarem este tipo de ensaio.

A determinação analítica da “dimensão” de controle é possível através do enfoque de Silveira (1964) mas, conforme exposto no item 2.2, há uma polêmica quanto à maneira de determinar a freqüência de ocorrência dos vazios de controle. Para este cálculo, Silveira sugere a utilização da curva de distribuição das partículas em termos de volume, enquanto De Mello (1977) e Musso-Federico (1983), recomendam a curva de distribuição em número de partículas.

A escolha do enfoque é função do problemas que se quer resolver. Por exemplo, sejam os seguintes problemas :

Problema A : Seja uma urna com um número N_1 de esferas D_1 , N_2 de esferas D_2 N_n de esferas D_n . A probabilidade de retirar uma esfera D_i é proporcional ao número N_i de esferas deste tipo existentes na urna, independentemente das dimensões D_i de cada partícula.

Neste caso, simulação de um sorteio, deve-se utilizar a frequência em número, para estudar o problema.

Problema B : Seja uma urna com um número N_1 de esferas com diâmetro D_1 , N_2 esferas de diâmetro D_2 N_n com esferas de diâmetro D_n . Seja um ponto P aleatório, situado no interior da urna, a probabilidade deste ponto pertencer a uma esfera com diâmetro D_i , é proporcional ao volume que estas esferas ocupam no interior da urna.

Neste caso, deve-se utilizar a frequência em volume, para estudar o problema.

Ao se analisar a probabilidade de formar agrupamentos de partículas no interior de um filtro de proteção (“urna”), a probabilidade de encontrar um agrupamento não está associada ao número de cada partícula, pois o modelo não é de sorteio. Assim este enfoque, não tem fundamento probabilístico.

Observa-se que ao se adotar este enfoque as curvas granulométricas dos filtros estudados por Musso-Federico (1983), que possuem $D_{\text{mín}} = 0,20\text{mm}$ e $D_{\text{max}} = 20,0\text{ mm}$, com diferentes graduações (ver Figura 2.2.2) são praticamente coincidentes e conseqüentemente as suas curvas porosimétricas, o que não é intuitivamente correto. Para corrigir este comportamento, estes autores sugerem a adoção de uma curva de vazios ponderada, onde :

$$P_{vi} = \frac{d_{vi} \cdot F_i}{\sum_{i=1}^Q d_{vi} \cdot F_i} \quad (3.4.1)$$

Este ajuste aumenta a frequência dos vazios maiores e reduz a frequência dos vazios menores, mas não é suficiente para que as curvas porosimétricas fiquem melhor graduadas.

Uma vez que este enfoque não tem base probabilística e que os resultados obtidos através de sua aplicação, diferem dos que seriam esperados, ele deve ser abandonado nos problemas de filtragem.

O enfoque de Silveira possui base probabilística todavia sua aplicação para filtros bem graduados fornece resultados diferentes dos esperados, conforme mostra De Mello (1977) (ver Figura 2.2.1)

Atmatzidis (1989) procura corrigir este aspecto através do seguinte raciocínio :

Ao se analisar um plano que contém os centros das partículas que se agrupam para formar os vazios, verifica-se a probabilidade de encontrar um vazio é proporcional à sua área. Assim admitindo-se que a curva de distribuição de vazios de Silveira é volumétrica (na verdade esta curva já é a associada à de probabilidade, segundo Silveira), calcula-se a curva de probabilidade em área associando a cada diâmetro de vazio d_{vi} uma frequência igual a :

$$P_i = \frac{p_{vi}/d_{vi}}{\sum_{j=1}^m p_{vj} / d_{vj}} \quad (3.4.2)$$

para dedução desta equação, conforme visto no item 2.6, admitiu-se que o volume do vazio, V_v , é esférico enquanto que para obter o volume total de vazios, ao invés de se efetuar

$$\sum_{j=1}^n V_j \quad ,$$

admite-se que o vazio é igual à área transversal do vazio no plano em que o diâmetro é máximo multiplicado por um fator K constante, independentemente do valor do diâmetro d_{vi} .

Apesar da falta de coerência na dedução, o resultado final é interessante pois ele reduz a frequência dos maiores vazios e aumenta a dos menores vazios em filtros bem-graduados, que seria o ponto falho da metodologia proposta por Silveira.

Tendo em vista o exposto, o cálculo da frequência dos vazios de controle não está devidamente equacionado.

No Capítulo 4, será apresentada uma nova proposta para esta questão, pela qual, mesmo para filtros bem-graduados, os resultados obtidos são intuitivamente corretos.

3.5 - Resumo dos Pontos Principais

As metodologias propostas por Wittmann (1977) e Musso-Federico (1985) apresentam a restrição de não calcularem a “dimensão de controle” do vazio que é o parâmetro que condiciona o processo de filtração (passagem ou bloqueio da partícula do material-base que é carregada), assim não devem ser utilizados em problemas de filtração.

Para o cálculo do diâmetro de controle dos vazios, o enfoque proposto por Silveira (1964) para filtros densos é satisfatório, apesar da hipótese simplificadora de que as partículas são esféricas.

Quanto à determinação da frequência de ocorrência desses vazios, a obtenção da mesma a partir da curva granulométrica em função do número de partículas deve ser descartada face à falta de fundamento probabilístico de tal hipótese e uma vez que os resultados obtidos são incoerentes.

A determinação da frequência de ocorrência dos vazios a partir da curva granulométrica em volume/massa apresenta resultados satisfatórios para filtros pouco a medianamente graduados, todavia, para filtros bem-graduados os resultados são insatisfatórios.

Atmatzidis sugere uma correção na distribuição de Silveira, mas obtida com premissas inconsistentes.

O processo de retro-análise de ensaios de carregamento proposto por Silveira (1993) é interessante desde que tomados os cuidados apresentados no item 2.9, mas nem sempre é viável a realização dos ensaios.

Este quadro mostra que o trabalho pioneiro de Silveira é o que apresenta maiores vantagens entre os trabalhos analisados para o cálculo da porosimetria, mas, verifica-se a necessidade de reavaliar as hipóteses de cálculo da frequência dos vazios, visando encontrar um modelo mais adequado.

Esta análise será apresentada no próximo capítulo, e o resultado da mesma, é uma nova proposta para a determinação da distribuição dos vazios.

4 - Nova Proposta para a Determinação da Curva de Distribuição dos Vazios

4.1 - Uma Nova Proposta

No trabalho pioneiro de Silveira a probabilidade de se ter um vazio com diâmetro d_v era igual à probabilidade da tangência das três partículas de diâmetro D_i , D_j e D_k , ou seja, é a probabilidade da formação dos agrupamentos $(D_i D_j D_k)$. Como se admite que as posições relativas das partículas são independentes, a probabilidade de se obter um agrupamento é o produto das probabilidades de ocorrência de cada um desses diâmetros $(P_i \times P_j \times P_k)$, multiplicado por um fator k que leva em conta que existem diversas maneiras de se combinarem estas partículas.

A probabilidade de ocorrência de cada partícula é associada à sua distribuição em volume, conforme visto no item 3.4 (solução para o Problema B).

Ao invés de pensar no volume total do filtro, imaginemos somente o volume dos seus vazios, ou seja uma rede de poro-canais.

Cada vazio pertencente a um poro-canal é limitado pelas superfícies de três partículas que são tangentes entre si, conseqüentemente a probabilidade de que uma partícula seja fronteira de um vazio é proporcional à sua área lateral e não ao seu volume, uma vez que os seus pontos internos não participam na formação dos vazios (partículas sólidas ou ocas produzem o mesmo vazio).

Ou seja, a probabilidade de tangência das três partículas deve ser associada à sua distribuição em superfície lateral e não à sua distribuição em volume.

A distribuição das partículas em função da área lateral é obtida através da expressão

$$PA_i = \frac{P_{m_i} / D_i}{\sum_{j=1}^m P_{m_j} / D_j} \quad (4.1)$$

facilmente obtida a partir da distribuição granulométrica em peso / volume, quando admite-se que as partículas do filtro são esféricas, conforme apresentado a seguir :

Seja um filtro com volume V , constituído por partículas com diâmetro D_1 e percentagem em massa P_{m1} , partículas com diâmetro D_2 e percentagem em massa P_{m2} , ... partículas de diâmetro D_n e percentagem em massa $P_{m,n}$.

A massa das partículas D_i é dada por:

$$M_i = P_{m,i} \times V_p \cdot \delta \quad (4.2)$$

onde:

V_p = volume das partículas D_i

δ = massa específica das partículas.

Sendo conhecida a porosidade do filtro (n_F), vem que:

$$V_p = V - n_F \cdot V = V (1 - n_F) \quad (4.3)$$

(4.3) em (4.2), resulta:

$$M_i = P_{mj} \cdot V (1 - n_F) \delta \quad (4.4)$$

Por outro lado, o valor de M_i pode ser obtido através do produto do número de partículas (N_i) pela massa de cada partícula.

$$M_i = N_i (\pi D_i^3 / 6) \cdot \delta \quad (4.5)$$

Igualando (4.4) e (4.5):

$$N_i = \frac{6 \cdot V}{\pi} \cdot (1 - n_F) \frac{P_{mj}}{D_i^3} \quad (4.6)$$

Conhecido o número de partículas, a área lateral das partículas D_i é dada por:

$$AL_{,i} = N_i \cdot \pi D_i^2 = 6 V (1 - n_F) \frac{P_{m,i}}{D_i} \quad (4.7)$$

A porcentagem em área lateral das partículas D_i é dada por:

$$P_{Ai} = \frac{A_{Li}}{\sum_{j=1}^n A_{Lj}} = \frac{P_{m,i} / D_i}{\sum_{j=1}^n P_{mj} / D_j}$$

que é a equação 4.1 apresentada anteriormente.

Observa-se que a equação 4.1 também pode ser obtida quando a análise da probabilidade de encontrar uma partícula para formar o agrupamento que gera o vazio, é feita em um plano hipotético β , que contém todos os centros das partículas. Para esta hipótese, a probabilidade de encontrar uma partícula de diâmetro D_i , é proporcional à área transversal que estas partículas ocupam no plano β .

4.2 - Verificação da Proposta

4.2.1 - Comparação entre as Porosimetrias Obtidas Pelas Diversas Metodologias .

Para a verificação da proposta, será feita a aplicação da metodologia proposta para os filtros estudados por Musso-Federico (1983 e 1985) .

Nas Figuras 4.2.1 e 4.2.2 são apresentadas as distribuições granulométricas em massa e em área das partículas . Observa-se que serão analisados somente os materiais A , B , C , F e I , uma vez que os demais materiais (D, G , E e H) não apresentam estabilidade interna, que é uma condição necessária para um material ser utilizado como filtro. No item I.12 do Anexo I, são apresentadas as verificações pelos critérios de Sherard (1982) e Kenney-Lau (1985) , que mostram a falta de estabilidade interna destes filtros.

Na Figura 4.2.3 são apresentadas as curvas de distribuição dos vazios calculadas através da nova proposta .

Para estes cálculos desenvolveu-se o Programa Filtro para computador pessoal na linguagem QBASIC, a partir do trabalho de Federico (1988) . Através deste programa é possível calcular a porosimetria de um filtro , discretizando a sua curva granulométrica em até 10 diâmetros . Para o cálculo do diâmetro do vazio formado pelo, agrupamento de 3 partículas tangentes é usada a equação 2.4.1 apresentada por Musso-Federico (1983).

Este programa também permite a análise de carreamento segundo a teoria de Silveira (1964), efetuando o cálculo automático do percurso de 50 partículas com diâmetros compreendidos no intervalo $d_{v,min}$ e $d_{v,max}$. Fornece-se 3 opções para o valor do percurso unitário (s) : Média Harmônica ($D_h = N_a / N_v$) , Média Numérica ($D_{m,num}$) ou introdução de um valor imposto .

No Anexo III apresenta-se a listagem do programa e um exemplo de aplicação.

FIG. 4.2.1 - GRANULOMETRIAS EM MASSA DOS FILTROS ESTUDADOS POR MUSSO-FEDERICO

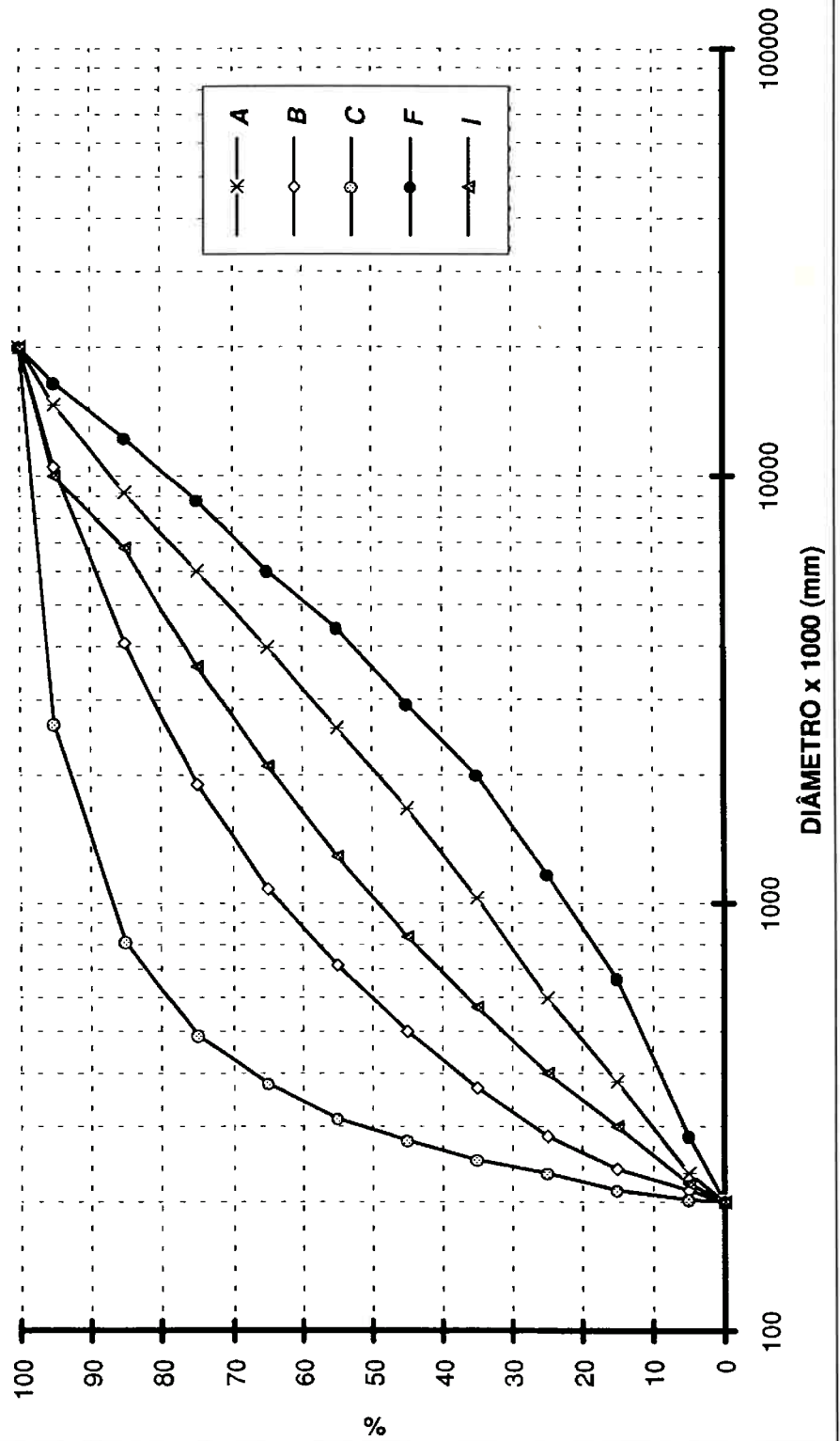


FIG. 4.2.2 - GRANULOMETRIAS EM ÁREA DOS FILTROS ESTUDADOS POR MUSSO - FEDERICO .

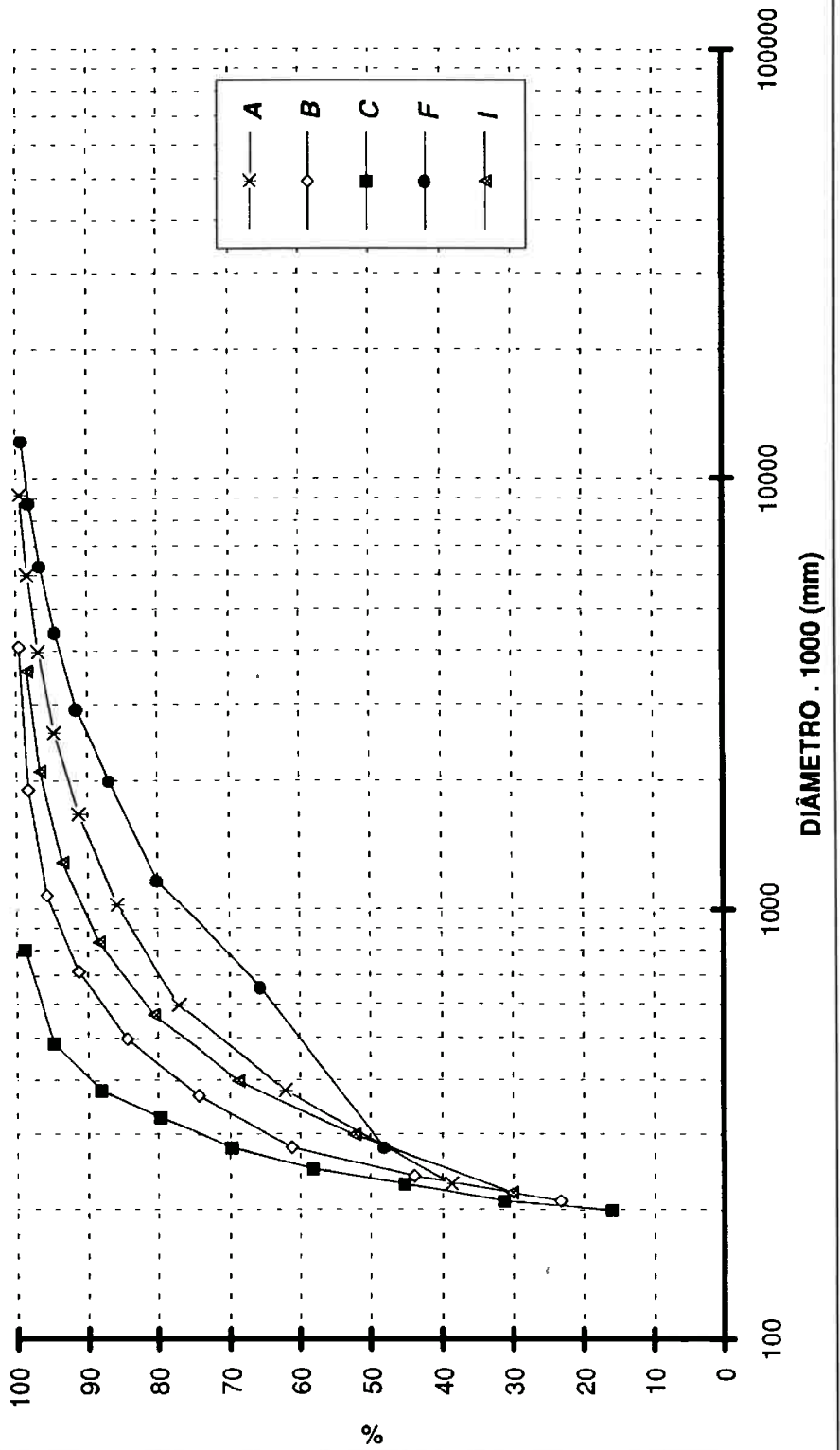
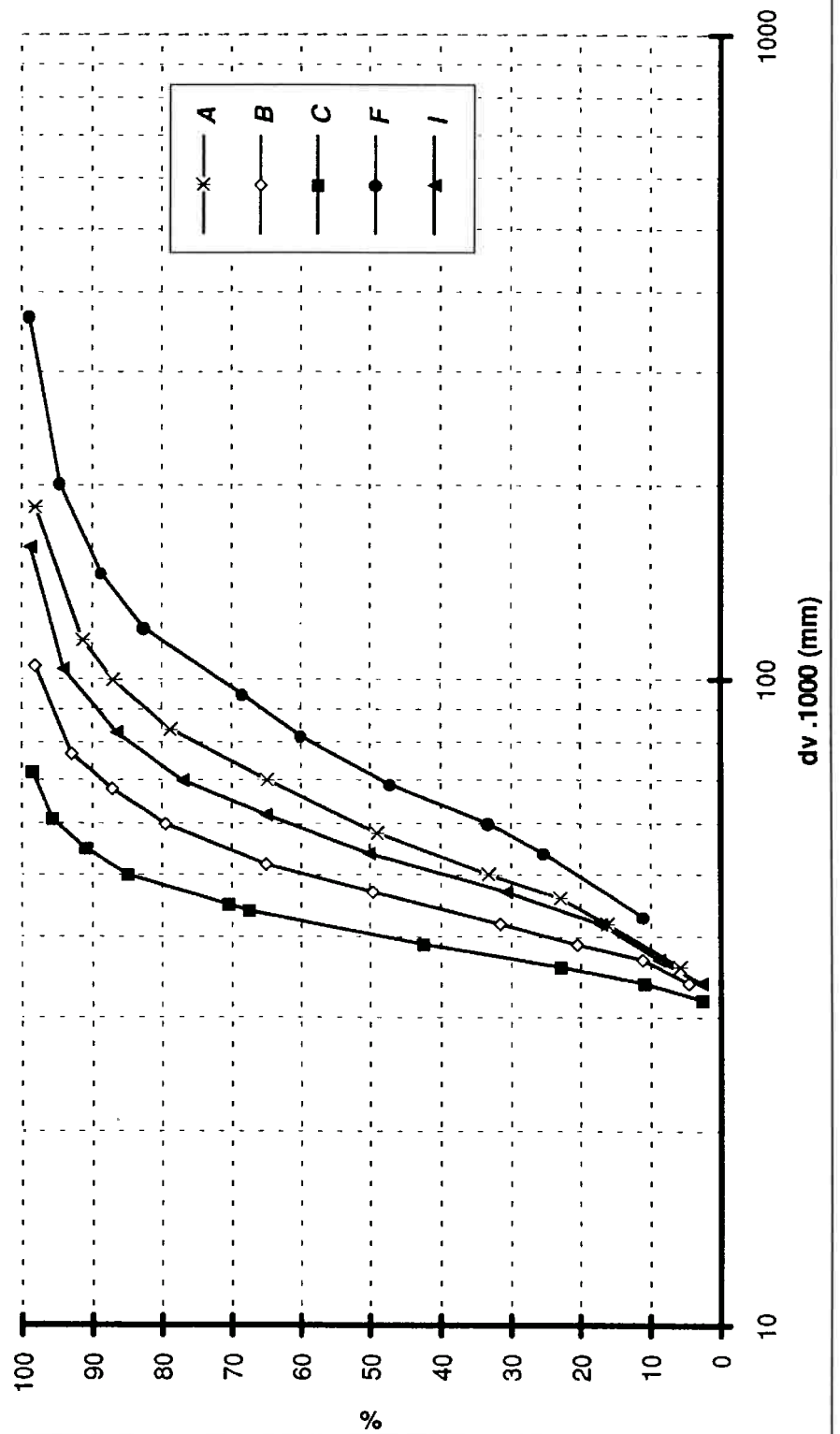


FIG.4.2.3 - DISTRIBUIÇÃO DOS VAZIOS DOS FILTROS DE MUSSO-FEDERICO EM FUNÇÃO DAS ÁREAS DAS PARTÍCULAS, CONFORME HUMES.



Nas Figuras 4.2.4 e 4.2.5, são apresentadas as curvas porosimétricas dos filtros estudados por Musso-Federico (1983 e 1985) calculadas admitindo o agrupamento de três partículas esféricas tangentes, para as hipóteses de frequência de ocorrência das partículas em :

- Volume-Massa - Silveira (1964)
- Número de Partículas - Musso-Federico (1983)
- Volume “Corrigido” - Atmatzidis (1989)
- Área Lateral - Humes (1995)

Verifica-se que :

a) A porosimetria em número de partículas é a mais fina, muito uniforme e é praticamente a mesma para todos os filtros , independentemente da sua graduação .

b) Para os filtros mais uniformes as porosimetrias obtidas pelos critérios de Silveira, Atmatzidis e Humes são muito próximas . A medida que o filtro passa a ser melhor graduado, a curva de Humes passa a ser mais fina que a de Silveira e, a de Atmatzidis, é praticamente uma curva média entre estas duas últimas .

A porosimetria obtida por Humes está de acordo com o pensamento de De Mello (1977) , apresentado no item 2.2 : “ Como os grãos maiores são pouco numerosos , um agrupamento entre eles é difícil de ocorrer , por outro lado , o número de contacto deles com grãos menores deve ser muito grande , formando arranjos densos “. Tal afirmação pode ser constatada ao se comparar as distribuições granulométricas em área (Figura 4.2.2) e em massa (Figura 4.2.1), quando se nota que na distribuição em área houve uma redução da frequência de ocorrência dos grãos maiores e conseqüente aumento da frequência dos grãos menores .

Este resultado é esperado uma vez que pelo enfoque proposto a probabilidade de uma partícula fazer parte de um agrupamento é igual ao quociente entre a sua probabilidade volumétrica e o seu diâmetro ($P_{ai} = P_{vi} / D_i$) .

No Anexo II é apresentado um estudo comparativo da distribuição granulométrica de solos granulares em função da mesma ser feita em função da massa, área lateral ou número de partículas, o qual salienta as diferenças que ocorrem em função da abordagem efetuada.

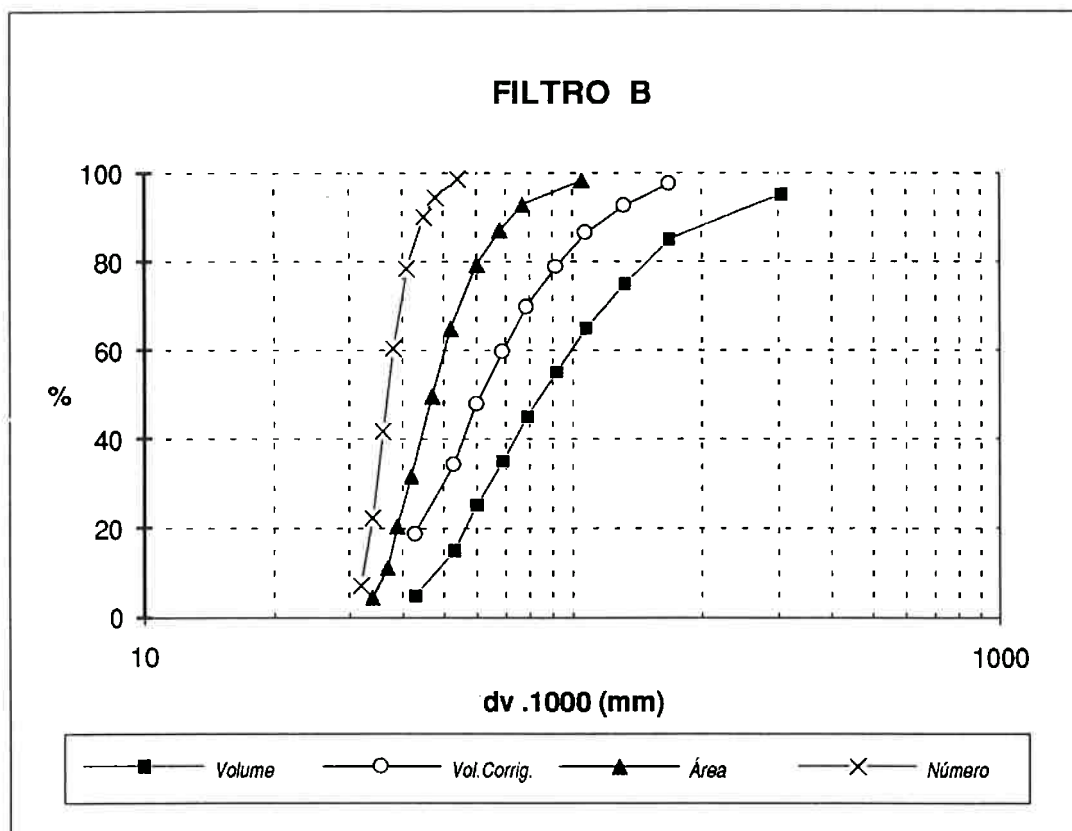
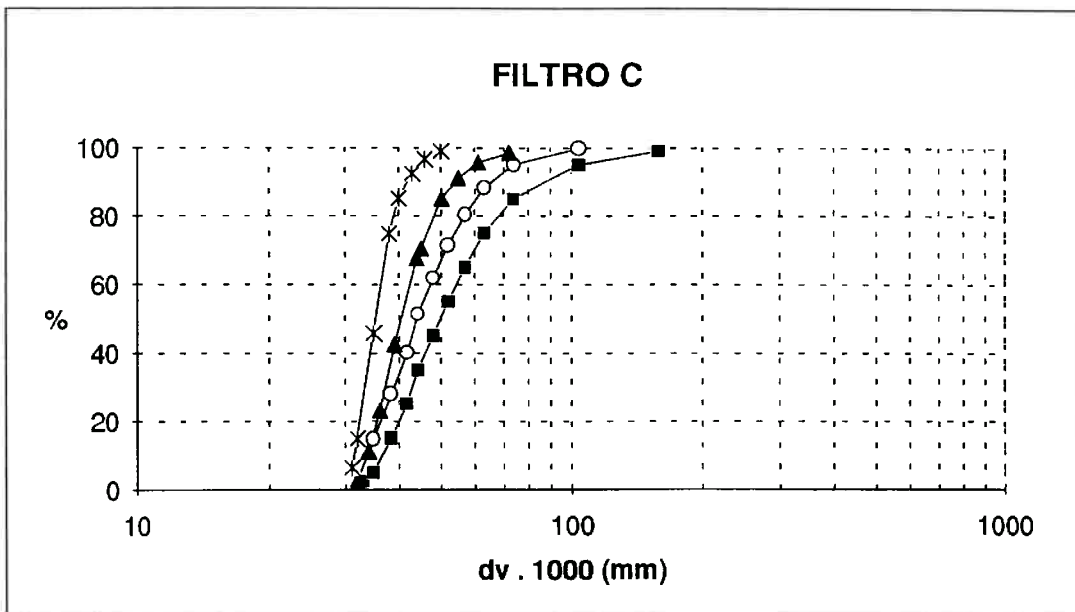


FIG- 4.2.4 - COMPARAÇÃO ENTRE AS POROSIMETRIAS CALCULADAS :

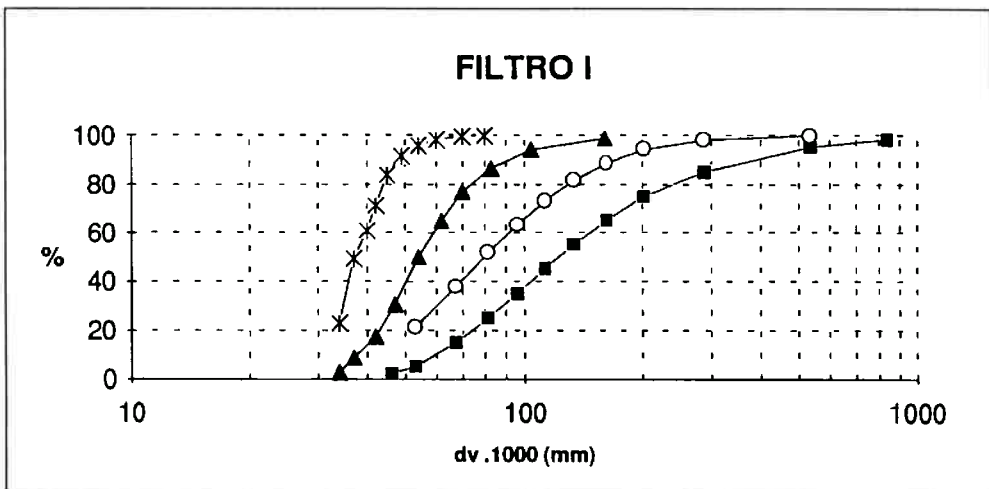
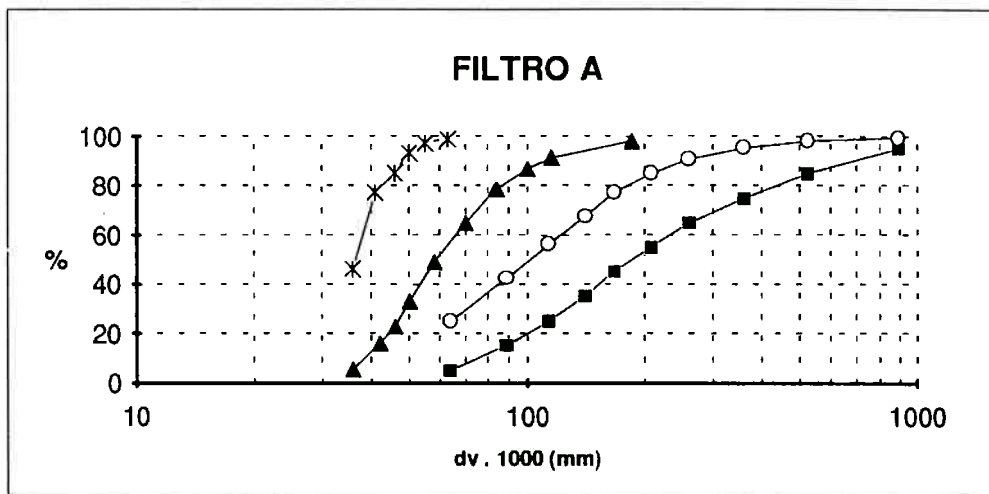
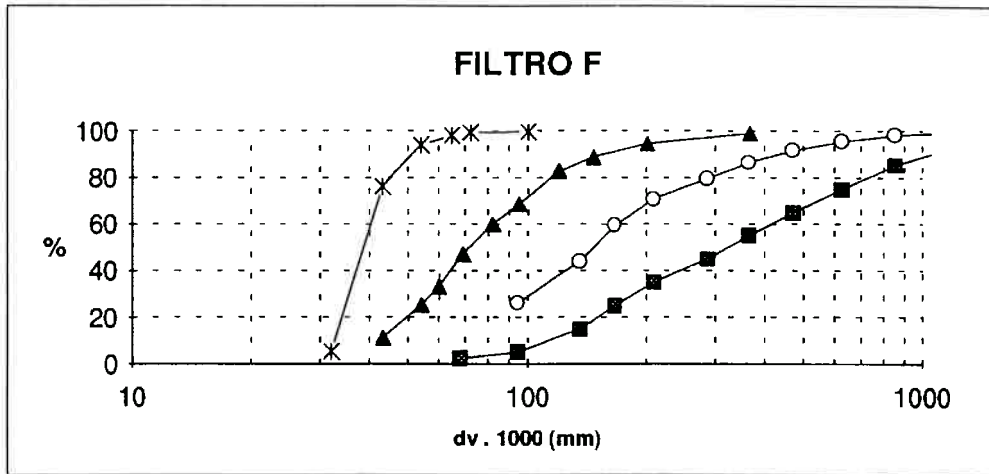


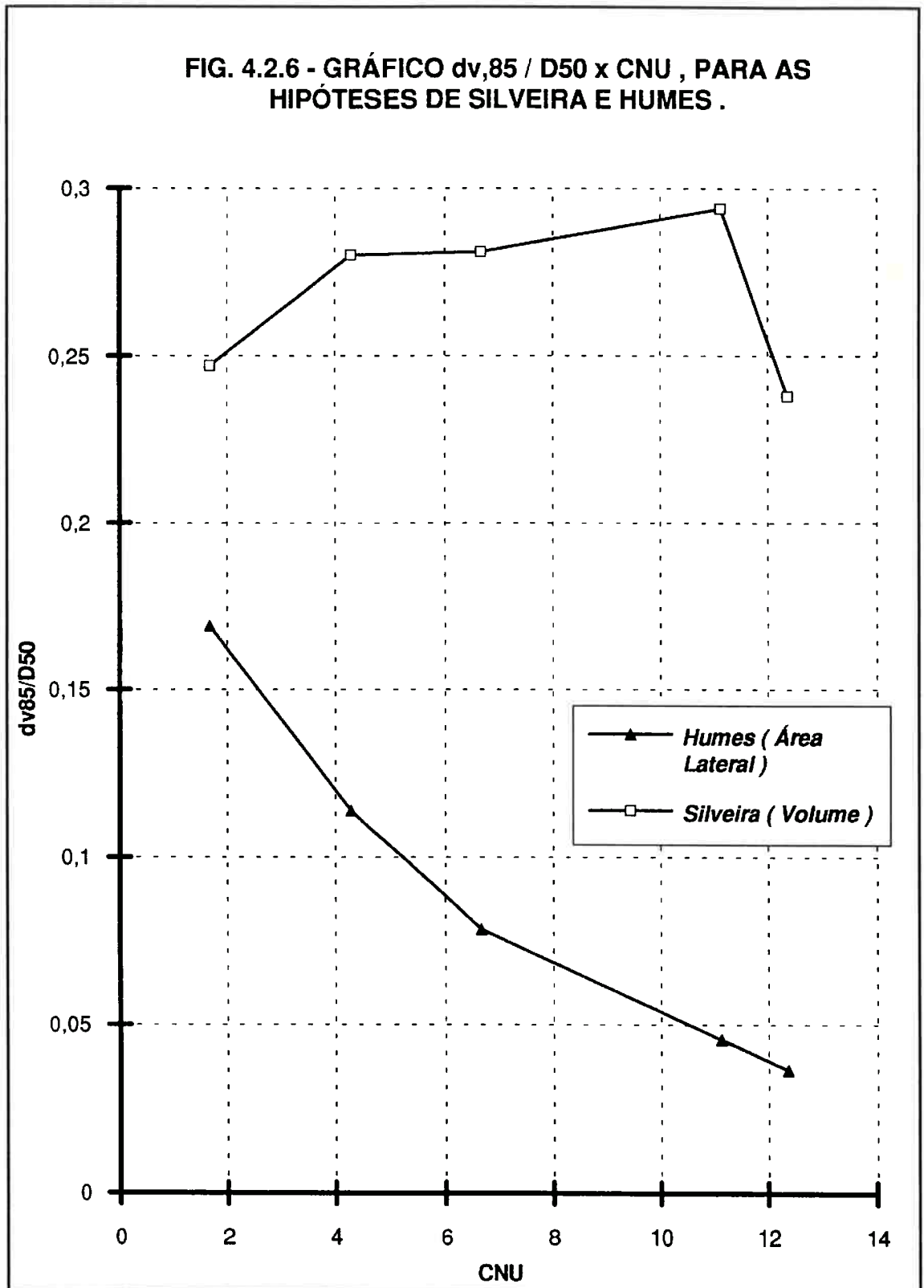
FIG. 4.2.5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS POROSIMETRIAS CALCULADAS
(Legendas na Figura 4.2.4)

4.2.2 - Tendência de Redução dos Maiores Vazios com a Graduação (CNU) do Filtro de Proteção .

Na Figura 4.2.6 apresenta-se para os filtros de Musso-Federico, o gráfico da relação $d_{v,85} / D_{50}$ versus o CNU obtida pela nova proposta. Verifica-se que esta relação decresce com o CNU , mostrando a tendência indicada por De Mello , de redução dos maiores vazios, o que não ocorre para a metodologia de Silveira .

Este resultado mostra que a nova proposta é adequada.

FIG. 4.2.6 - GRÁFICO $d_{v,85} / D50 \times \text{CNU}$, PARA AS HIPÓTESES DE SILVEIRA E HUMES .



4.2.3 - Comparação com a Determinação Experimental de Sória e co-autores.

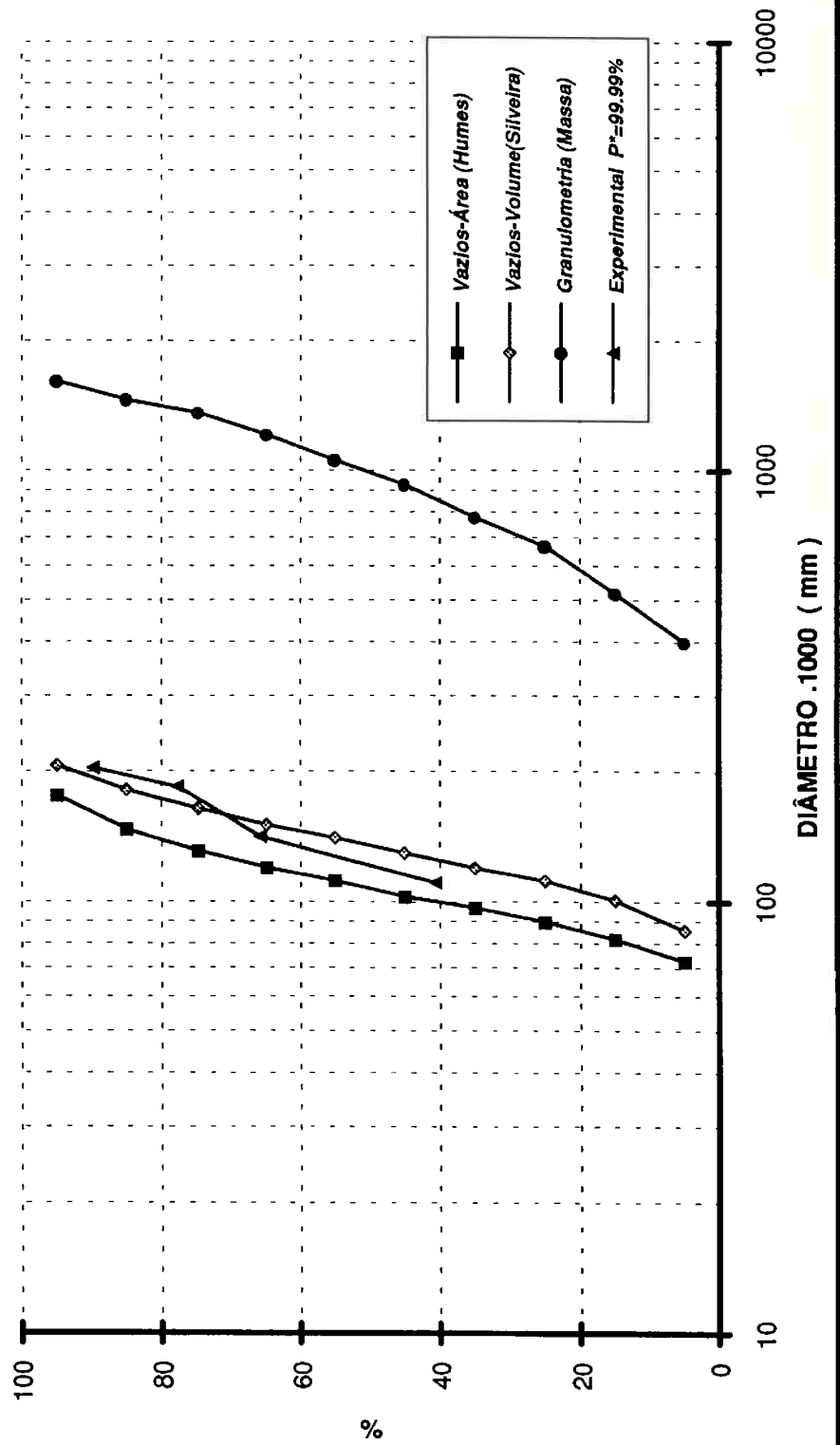
Na Figura 4.2.7 são apresentadas as distribuições de vazios calculadas pela metodologia pioneira de Silveira e pela metodologia proposta neste trabalho, bem como a curva obtida por retro-análise de um ensaio de carregamento, obtida por Sória e co-autores (ver item 2.9).

Verifica-se uma boa aderência entre a curva prevista e a experimental.. Observa-se que a curva experimental situa-se entre as curvas teóricas de Humes e Silveira.

Conforme visto no item 2.9, não foi utilizado um material de contacto (“side material”) no ensaio, logo, a porosimetria obtida na retro-análise pode ser mais grossa que a real, ou seja, com o “side-material” a curva experimental seria mais próxima ainda da calculada pela metodologia proposta.

Observa-se que como o filtro ensaiado apresenta um coeficiente de não-uniformidade baixo ($CNU = 2,3$), as diferenças entre as curvas de Silveira e a de Humes, não são sensíveis, como era de se esperar.

FIG. 4.2.7 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA EXPERIMENTAL DE SÓRIA E CO-AUTORES E AS CURVAS TEÓRICAS DE HUMES E SILVEIRA .



4.2.4 - Comparação com um Modelo Físico

Para testar a proposta , será utilizado um modelo físico simplificado, no qual é possível determinar o número de partículas e de vazios de controle (passagens).

O modelo é constituído por um grão esférico (G) com 20 cm de diâmetro , que será envolvido por grãos esféricos (g) , com 2 cm de diâmetro, segundo um arranjo tetraédrico, conforme mostra o esquema da Figura 4.2.8.

Observa-se que a concordância entre os resultados do modelo com aqueles previstos pela proposta desta tese, é uma condição necessária para verificar a validade da proposta , contudo, não é uma condição suficiente, pois o modelo é um caso particular.

a) Cálculo do número de grãos g necessários para envolver o grão G.

Seja a esfera hipotética com diâmetro $(20 + 2 = 22 \text{ cm})$ que passa pelo centro dos grãos menores que cobrem o grão maior.

$$\text{A área lateral dessa esfera é } \pi (D + d)^2 = 1520,5 \text{ cm}^2$$

A área que cada grão menor com seus vazios, ocupa nesta superfície, pode ser aproximada pela área do hexágono circunscrito a cada grão tipo g, que possui lado (L) igual a $d \times \sqrt{3} / 3$ e área $A_h = 6 (L \cdot d) / 2 = 3,464 \text{ cm}^2$.

Logo o número de grãos g para cobrir a esfera é igual a :

$$N1 = 1520,5 / 3,464 = 439$$

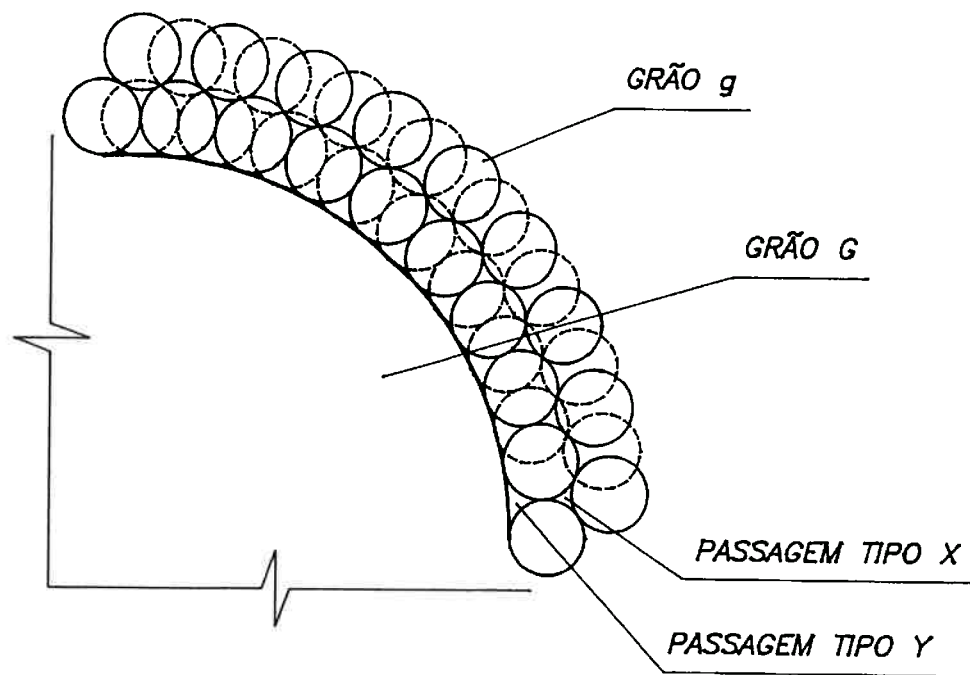


FIGURA 4.2.8. – ESQUEMA DO MODELO FÍSICO

b) Cálculo das Passagens formados pelo grão tipo (G) e uma camada de grãos tipo g.

Cada um dos N_1 grãos é tangenciado por 6 outros grãos, formando 6 passagens tipo X na “superfície” da esfera hipotética. Chama-se a passagem tipo X aquela formada pelo agrupamento de 3 grãos tipo g. Observa-se que cada passagem é contada 3 vezes, a medida que se considera cada um dos grãos formadores da passagem como o grão central (grão que é tangenciado por 6 outras partículas) . Portanto, o número destas passagens X é igual a $(439 \times 6) / 3 = 878$.

Cada grão central , com 6 outros grãos tangentes, formam 6 passagens tipo Y, formadas pelo agrupamento de 2 grãos tipo g e o grão tipo G.

Logo, com raciocínio análogo, tem-se $(439 \times 6) / 2 = 1317$ passagens tipo Y na superfície do grão maior.

c) Cálculo das Passagens das outras Camadas de Grãos tipo g.

Para as partículas menores que se localizariam nas camadas sobrejacentes à camada que está em contacto com o grão maior (G), verifica-se, ao se modelar este tipo de arranjo, (por exemplo, agrupando-se esferas de isopor) , que o número de passagens para cada grão central é igual a :

$N_p = (9 + 6 + 9) = 24$, ou seja, o grão central participa de 9 passagens ao entrar em contacto com 3 grãos da camada superior e mais 9 passagens com 3 grãos da camada inferior. Além das seis passagens formadas pela tangência do grão central com os outros seis grãos “adjacentes”. Como cada passagem é contada para cada um dos três grãos formadores do vazio de controle , o número de passagens por grão é :

$$N_g = 24 / 3 = 8.$$

Tendo em vista o exposto, conclui-se que :

$$N_y = 1317 \text{ (número de passagens tipo Y)}$$

$N_x = 878 + 8 (N_g - 439) = \text{número de passagens tipo X , onde } N_g \text{ é o número total de grãos menores (tipo g).}$

d) Verificação do Modelo

De modo análogo ao cálculo do número de grãos da primeira camada, serão calculados os números de grãos necessários para formar 2,4,6 e 8 camadas.

Para cada uma destas condições serão calculadas as frequências de ocorrência (F) das passagens X e Y, que serão comparadas com os valores previstos pelas hipóteses de Humes, Silveira e De Mello, ou seja a frequência do vazio é obtida em função da distribuição em área, volume ou número de partículas.

Observa-se que não é necessário que sejam formados arranjos concêntricos. Todavia, esta abordagem traz a vantagem de tornar fácil uma visualização do modelo físico.

Na Tabela 4.2.1, apresentam-se os resultados obtidos, verificando-se que as frequências calculadas pela proposta desta tese são muito próximas das obtidas no modelo, independentemente de se considerar a frequência numérica, volumétrica ou em área, o que não acontecesse com os valores calculados pelas hipóteses de Silveira e De Mello, principalmente para esta última hipótese.

Nº de Camadas	Nº de Grãos g	Vol. de Grãos g	% Vol. Grãos g	Nº de Passagens X	% de Passagens X	% de Passagens X	% de Passagens X	% de Passagens X
					Modelo	Humes	Silveira	de Mello
2	1023	4285,1	50,6	5550	80,8	77,3	25,5	99,7
4	2660	11142,2	72,7	18646	93,4	89,9	47,0	99,8
6	4921	20613,0	83,1	36774	94,9	94,3	62,1	99,9
8	7754	32479,9	88,6	59398	97,8	96,3	72,2	99,9

a - Distribuição em número de vazios (passagens)

Num de Camadas	Vol Passagens X	Volume Total	% em volume Passag. X	% Prevista Humes	% Prevista Silveira	% Prevista de Mello
2	86,6	156,4	55,4	77,3	25,5	99,7
4	290,9	360,6	80,7	89,9	47,0	99,8
6	573,6	643,4	89,2	94,3	62,1	99,9
8	926,5	996,3	93,0	96,3	72,2	99,9

b - Distribuição em volume dos vazios (passagens)

Num de Camadas	Area Passagens X	Area Total	% em area Passag. X	% Prevista Humes	% Prevista Silveira	% Prevista de Mello
2	418,9	643,5	65,1	77,3	25,5	99,7
4	1407,3	1632,0	86,2	89,9	47,0	99,8
6	2775,6	3002,2	92,5	94,3	62,1	99,9
8	4483,2	4707,8	95,2	96,3	72,2	99,9

c - Distribuição em área dos vazios (passagens)

TABELA 4.2.1 -- COMPARAÇÃO ENTRE VALORES PREVISTOS E OBTIDOS NO MODELO FÍSICO .

4.2.5 - Comportamento de Filtros Bem-Gradados

Na Figura 4.2.9 são apresentadas as curvas granulométricas e porosimétricas de três filtros com os mesmos 10% de finos e com coeficientes de não uniformidade de 3, 7 e 10.

Verifica-se que as distribuições de vazios obtidas são semelhantes, mostrando que o enfoque de considerar que a formação dos vazios é proporcional à área lateral das partículas do filtro, permite representar a situação que vazios formados pelo agrupamento de três partículas “grandes” tem uma probabilidade extremamente baixa de ocorrer.

Na Figura 4.2.10 apresenta-se a comparação entre estas porosimetrias e as obtidas através do enfoque de considerar que a formação dos vazios é proporcional ao volume das partículas (Silveira).

Verifica-se que para filtros muito graduados, pela hipótese de Silveira, existe uma porcentagem de vazios “grandes” maior que a esperada.

**FIG. 4.2.9 - Porosimetria de Filtros Bem-Graduados com Mesmos 10% de Finos
(conforme Humes)**

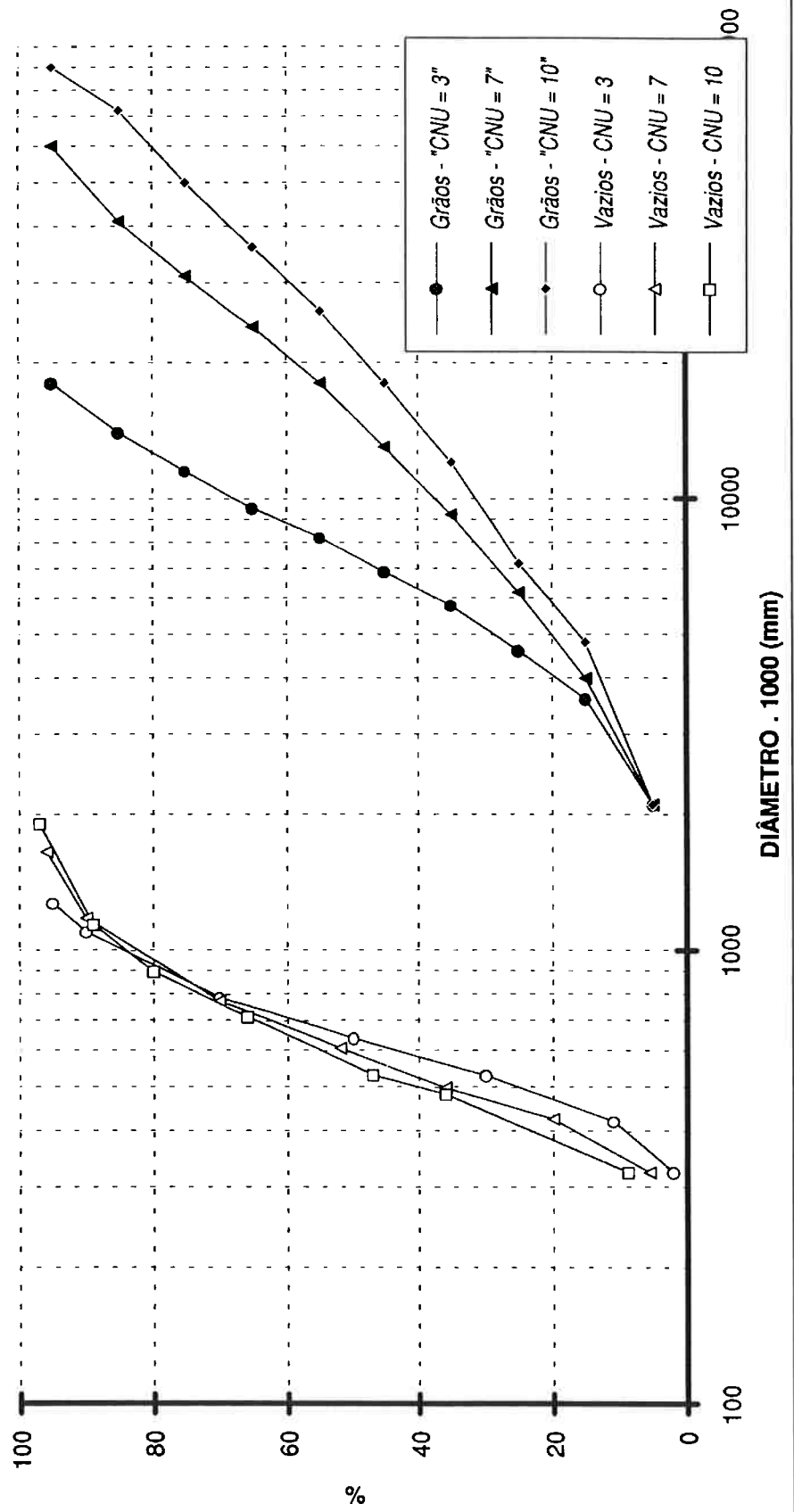
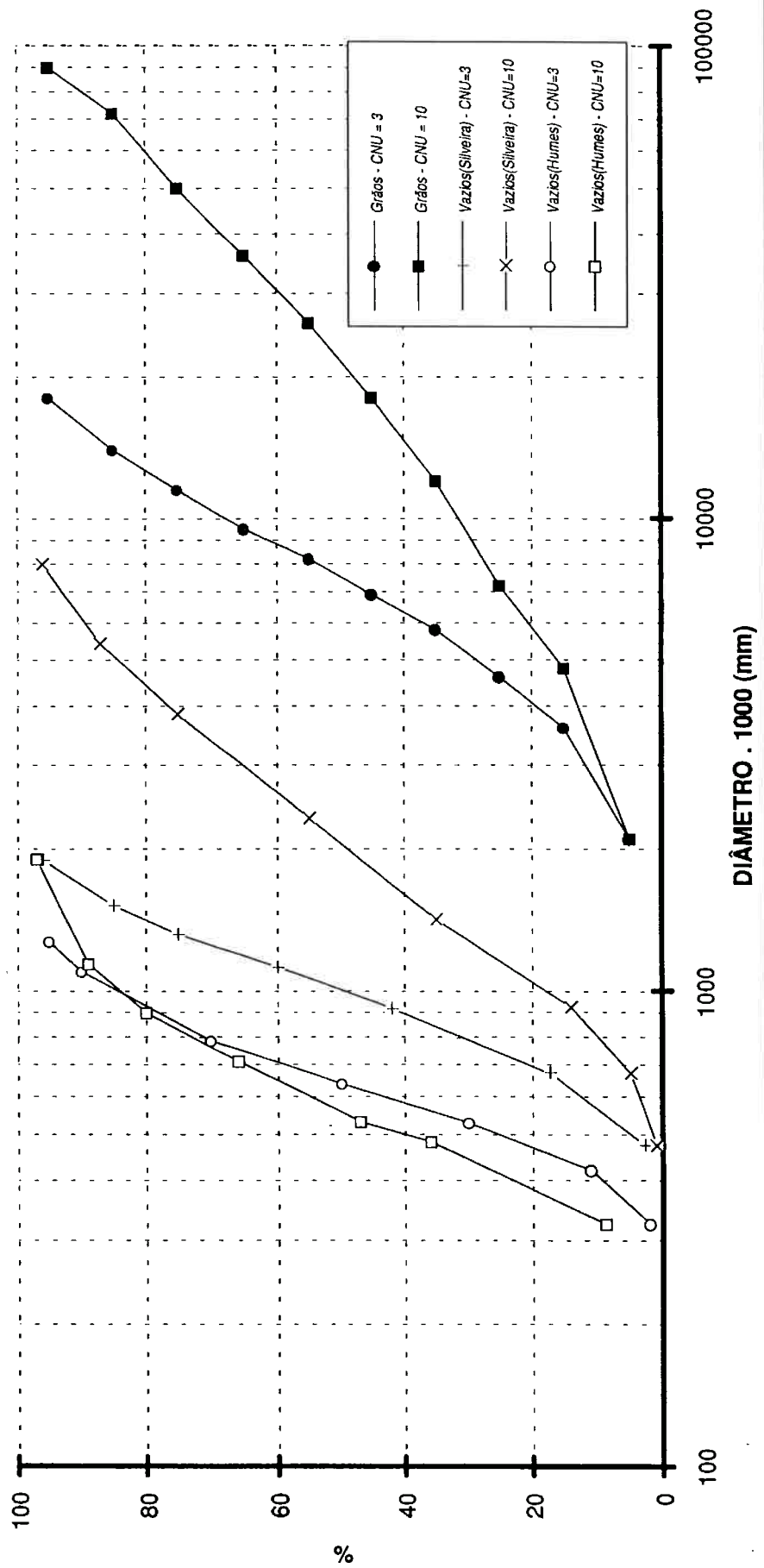


FIG. 4.2.10 - Comparação de Porosimetrias de Filtros Bem-Graduados, conforme Silveira e Humes



4.2.6 - Análise dos Ensaios de Filtros de Sherard e Co-Autores Através da Nova Proposta.

Sherard e co-autores (1984) realizaram uma extensa pesquisa experimental de filtros utilizando os equipamentos e materiais indicados nas Figuras 4.2.11 e 4.2.12 .

O desempenho dos filtros foram classificados em:

a) Filtro Eficiente : A quantidade de material-base carregada durante o fluxo de água ou a vibração, não foi significativa. A espessura e a aparência do material-base não se alteraram durante o ensaio.

b) Filtro Não-Eficiente : Uma quantidade significativa de material-base foi carregada durante os primeiros 60 segundos do ensaio e o carregamento ocorreu em uma taxa aproximadamente constante. Se o período do teste fosse grande, quase todo o material seria carregado.

c) Filtro Limite : uma quantidade não significativa de material-base atravessa o filtro durante o período de percolação de água, mas uma grande quantidade de material atravessa o filtro durante o período de vibração.

Os ensaios realizados (ver Figura 4.2.12) mostram que um limite bem definido é dado pela relação $D_{15}/d_{85} = 9$.

Para verificar se a proposta desta tese, é adequada para prever os resultados dos filtros ensaiados , foram efetuadas análises de carregamento utilizando as curvas de distribuição de vazios obtidas a partir da distribuição em área lateral das partículas dos filtros.

Na Tabela 4.2.6.1 , apresentam-se para um intervalo de confiança de 99.99 % , os resultados obtidos para a análise de carreamento de um grão com diâmetro igual a $d_t = D_{15/5}$, que é a relação de Terzaghi. Os resultados obtidos mostram que :

a) A condição é estável, uma vez que o percurso do grão d_t no interior do filtro varia de zero ($d_t > d_v, \text{mín}$) até no máximo 8,8 cm, ou seja, mesmo para um intervalo de confiança de 99,99% , o percurso é muito inferior à espessura do filtro de 17,5 cm.

b) Em média são necessários apenas 9 confrontos ($S \cong 9.D_{38}$), para que se bloqueie o “d85” do material-base para este nível de confiança.

c) Para a análise de carreamento, adotou-se o percurso unitário (s), igual à média harmônica ponderada (distribuição em massa) dos grãos.

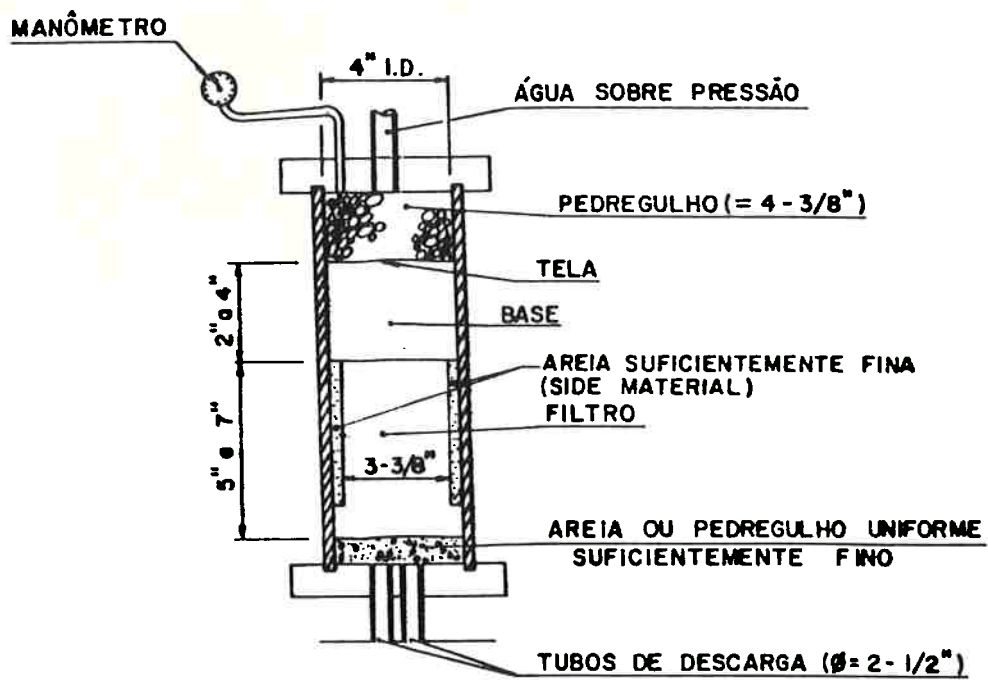


FIG. 4.2.11a - ESQUEMA DE ENSAIO POR SHERARD E COAUTORES(1984)

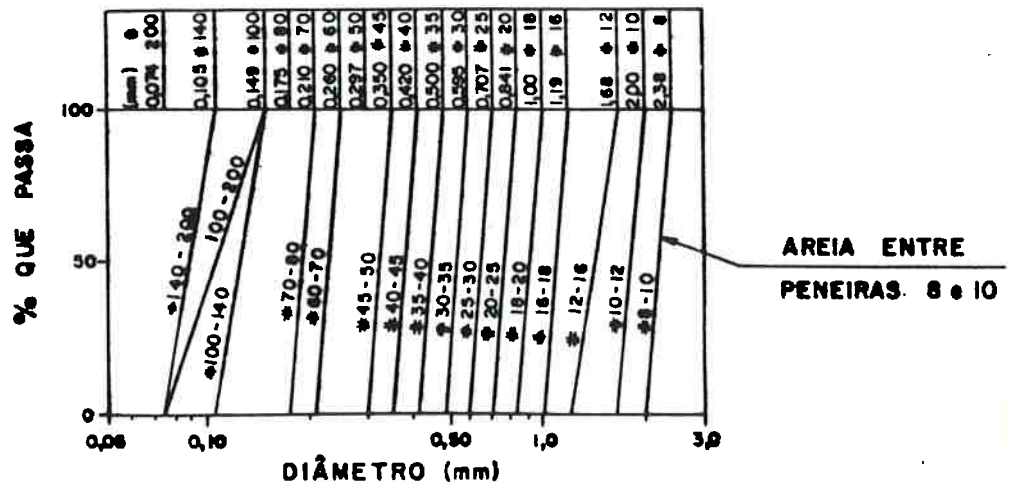
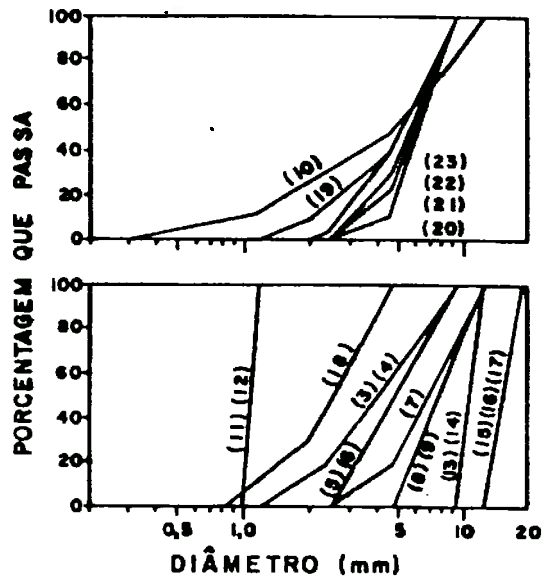


FIG. 4.2.11b - GRANULOMETRIA DAS AREIAS USADAS COMO MATERIAL - BASE POR SHERARD E COAUTORES(1984)



OBS: OS NÚMEROS ENTRE PARENTÊSES REFEREM-SE AO NÚMERO DO TESTE.

FIG. 4.2.12a - GRANULOMETRIA DOS FILTROS ENSAIADOS POR SHERARD E COAUTORES (1984)

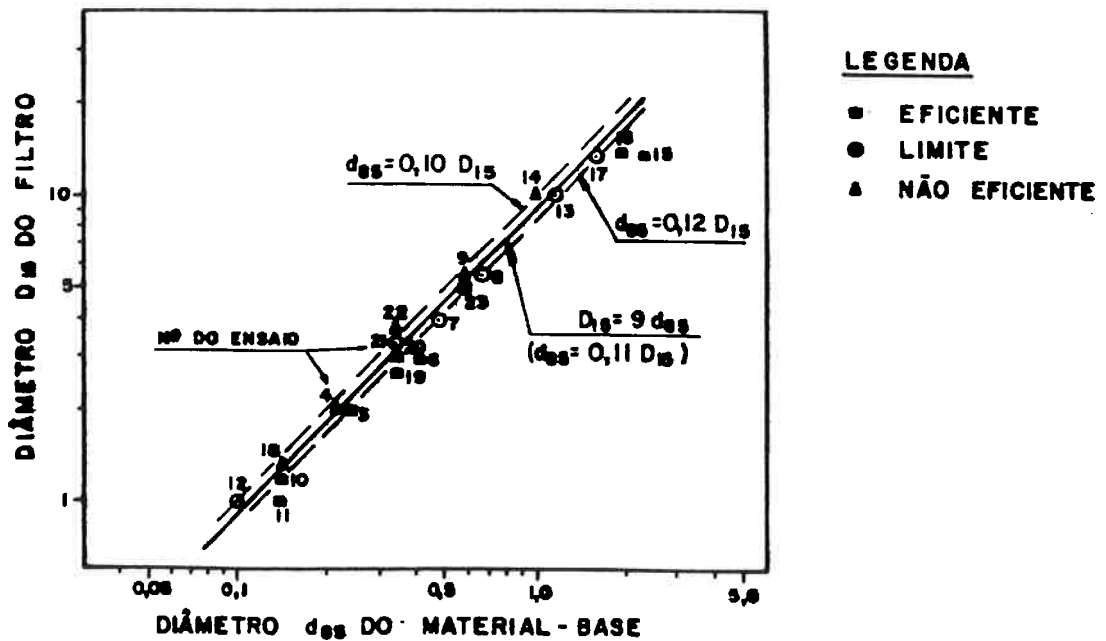


FIG. 4.2.12b - RELAÇÃO D15/d85 OBTIDA NOS ENSAIOS EFETIVOS POR SHERARD E COAUTORES (1984)

TABELA 4.2.6.1

**RESULTADOS DA ANÁLISE DE CARREAMENTO PARA O dt
DOS FILTROS ENSAIADOS POR SHERARD E CO-AUTORES**

FILTRO	D15 (mm)	Pv (%)	n=NÚM. DE CONFRONT.	S=PERC. (cm)	s=PERC. UNIT. (mm)	s=Dx x=%
3	2.2	58.7	11	3.75	3.41	D38
5	3.1	44.6	16	7.92	4.95	D33
7	4.2	56.4	12	7.32	6.10	D38
8	5.8	62.2	10	7.58	7.58	D44
10	1.45	85.5	5	1.15	2.29	D28
11	1.05	0.0	0	0.00	1.09	D43
13	10.0	0.0	0	0.00	11.1	D52
15	13.5	99.2	2	3.14	15.7	D42
18	1.3	44.9	16	3.38	2.11	D29
19	2.35	62.6	10	3.79	3.79	D31
20	5.0	73.5	7	4.28	6.12	D40
21	4.1	57.7	11	6.15	5.59	D36
22	3.4	42.2	17	8.79	5.17	D37
23	3.2	47.6	15	7.14	4.76	D38

TABELA 4.2.6.2**RESULTADOS DA ANÁLISE DE CARREAMENTO PARA O ds
DOS FILTROS ENSAIADOS POR SHERARD E CO-AUTORES**

FILTRO	D15 (mm)	Pv (%)	n=NÚM. DE CONFRONTOS	S=PERCURSO (cm)
4=5	2.2	4.2	214	73
7	4.2	1.2	763	465
8=9	5.8	0.0	Infinito	Infinito
11=12	1.05	0.0	Infinito	Infinito
14	1.05	0.0	Infinito	Infinito
15=17	13.5	0.0	Infinito	Infinito
18	1.3	99.2	2	242
21	4.1	1.1	835	467
22	3.4	0.2	4600	2378

Na Tabela 4.2.6.2, apresentam-se, para um intervalo de confiança de 99.99 %, os resultados obtidos para a análise de carreamento de um grão com diâmetro igual a $d_s = D_{15}/9$, que é a relação limite de Sherard e Co-autores. Os resultados obtidos mostram que:

a) A condição é instável , uma vez que o percurso do grão d_s no interior do filtro é sempre superior à espessura de filtro ensaiada.

b) Para a condição limite determinada nos ensaios, a porcentagem de vazios menores que d_s é nula ou muito pequena (inferior a 1,2%) , o que conduz a um número de confrontos infinito ($p_v = 0\%$) ou superior a 700 (percursos > 242 cm) , para encontrar um vazio menor que o “ d_{85} ” do material-base.

c) Somente para o Filtro 4 , que possui uma maior quantidade de finos, obteve-se uma porcentagem de vazios menores que d_s superior a 1,2%, (no caso $p_v = 4,2\%$), o que leva a um menor número de confrontos (214) e um percurso de 73,2 cm, mas que também é muito superior à espessura do filtro de 17,5 cm.

4.2.7 - Análise dos Ensaios de Carreamento de Atmatzidis.

Como uma verificação adicional da proposta deste trabalho, efetuou-se uma análise dos ensaios efetuados por Atmatzidis(1989), que estão apresentados nas Figuras 2.8.1 e 2.8.2 .

Observa-se que os pedregulhos usados como filtro, possuem um baixo teor de finos e de areia, que podem ser caracterizados pelas suas porcentagens menores que 4,8 e 2,0 mm, que são respectivamente : (12, 8 e 6%) e (8, 4 e 0%) .

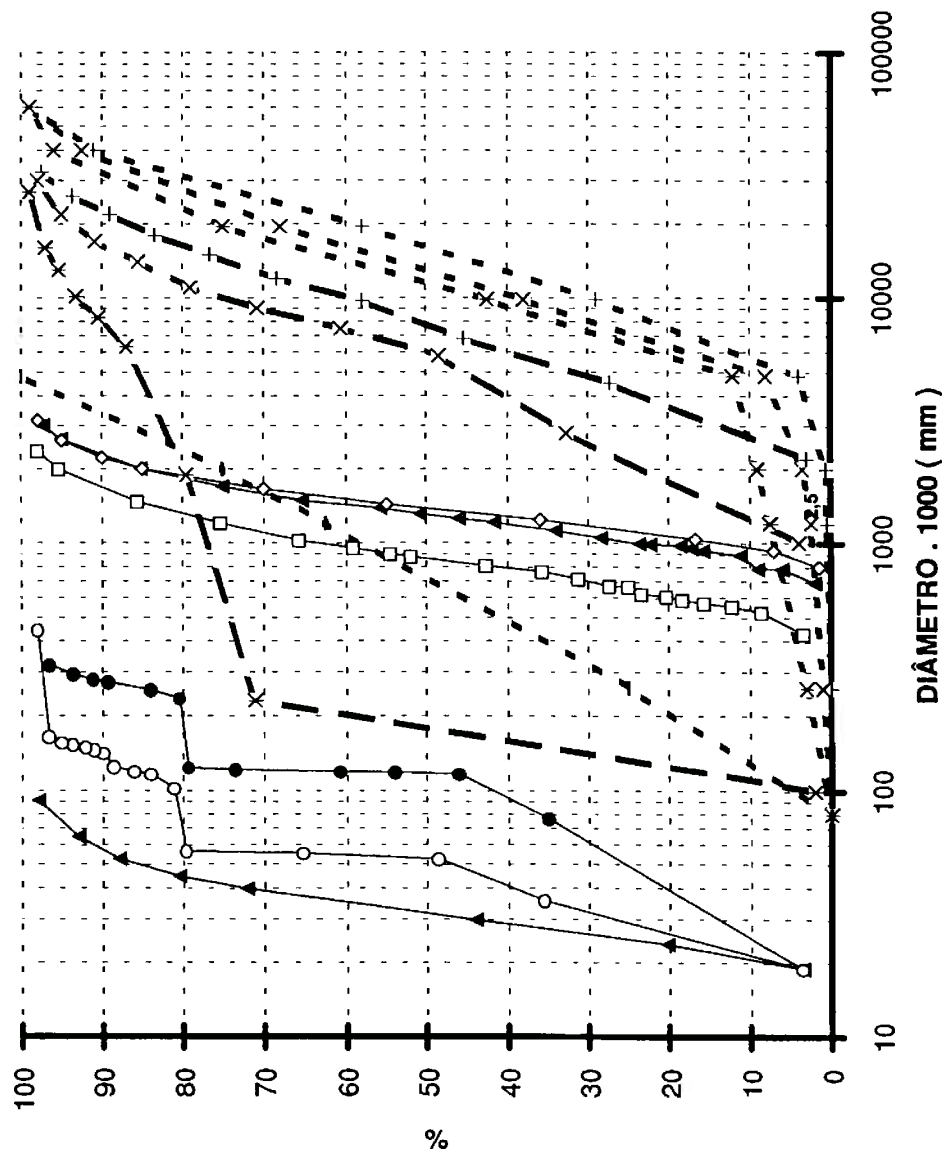
Para o cálculo das porosimetrias, adotou-se o critério de discretizar a curva granulométrica nos diâmetros 5, 10, 15.....85, 95%, cada qual com uma porcentagem de ocorrência em massa de 10%.

Na Figura 4.2.13 são apresentadas as curvas granulométricas e porosimétricas destes materiais, onde nota-se que o pedregulho G3 apresentou uma porosimetria descontínua. Inicialmente associou-se este comportamento ao fato de que os “finos”(% menor que 4,8 mm, que é o ponto onde a curva granulométrica quebra) terem sido representados por um único diâmetro ($D_5 = 0,50$ mm). Assim recalculou-se a porosimetria com a fração fina discretizada pelos diâmetros 0,23 e 1,90 mm, cada um com 6% de ocorrência em massa. O comportamento repetiu-se com o deslocamento da curva de vazios em direção aos menores diâmetros.

Para melhor interpretar este comportamento foram calculadas as porosimetrias do pedregulho limpo (partículas $> 4,8$ mm) e dos finos (partículas $< 4,8$ mm).

Também foram calculadas as curvas granulométricas em área lateral dos pedregulhos G1, G2 e G3.

FIG.4.2.13 - ANÁLISE DOS PEDREGULHOS ENSAIADOS POR ATMATZIDIS



Estas curvas permitem inferir que a porosimetria do pedregulho G3 possui uma parcela (80%) associada às partículas de areia, em seguida há um “gap”, seguido por um outro conjunto de vazios que podem estar associados ao agrupamento das partículas com diâmetro entre 1,90 e 20 mm e o último trecho corresponde à fração mais grossa do pedregulho. Esta curva é aproximadamente paralela à sua curva granulométrica em área lateral como pode ser visto na Figura 4.2.13.

Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que este material não possui estabilidade interna, ou seja, existe uma estrutura formada pela sua fração grossa e as partículas menores estão “livres”. Ou seja, os vazios formados pelos agrupamentos dos grãos de areia não representam a porosimetria do pedregulho G3, pois eles podem ser carreados pelo fluxo d’água. Isto explica os resultados obtidos nos ensaios de Atmatzidis com o G3, uma vez que ele relata que os percursos nos ensaios foram superiores aos por ele previstos e ele considerou os vazios da fração de areia nos cálculos efetuados para a previsão. Ressalta-se que quando o solo é internamente instável não são verificadas as hipóteses básicas da teoria de Silveira(1964) para o cálculo da porosimetria, tais como que o solo é homogêneo e encontra-se no estado de máxima compactidade, de modo que todas as suas partículas são tangentes três a três entre si.

O tratamento da porosimetria de solos sem estabilidade interna é uma questão não resolvida. Por esta razão, não será feita a análise de carreamento para o material G3.

Observa-se que para os pedregulhos G1 e G2, as curvas porosimétricas obtidas foram contínuas, porque os ramos inferiores das curvas granulométricas, não eram sub-horizontais como o do G3, de modo que os D5 considerados no cálculo da porosimetria foram iguais a 4,5 e 2,8 mm, maiores que 2,00 mm (areia).

As curvas de penetração (diâmetro x percurso) obtidas para os pedregulhos G1 e G2, foram determinadas para intervalos de confiança de 98% e 99.99%, e são apresentadas na Figura 4.2.14

Utilizou-se a média harmônica ponderada dos grãos para o percurso unitário, que é igual a 12,29 mm e 9,14 mm para os pedregulhos G1 e G2, respectivamente. Estes valores correspondem aproximadamente ao D35 destes materiais.

A análise deste gráfico mostra que :

a) Partículas com diâmetro entre 0,60 e 0,75 mm possuem percursos de 2150 mm aproximadamente, que foi o máximo percurso experimental da areia A. Como a areia A possui grãos entre 0,1 e 1,0 mm, a previsão feita é coerente.

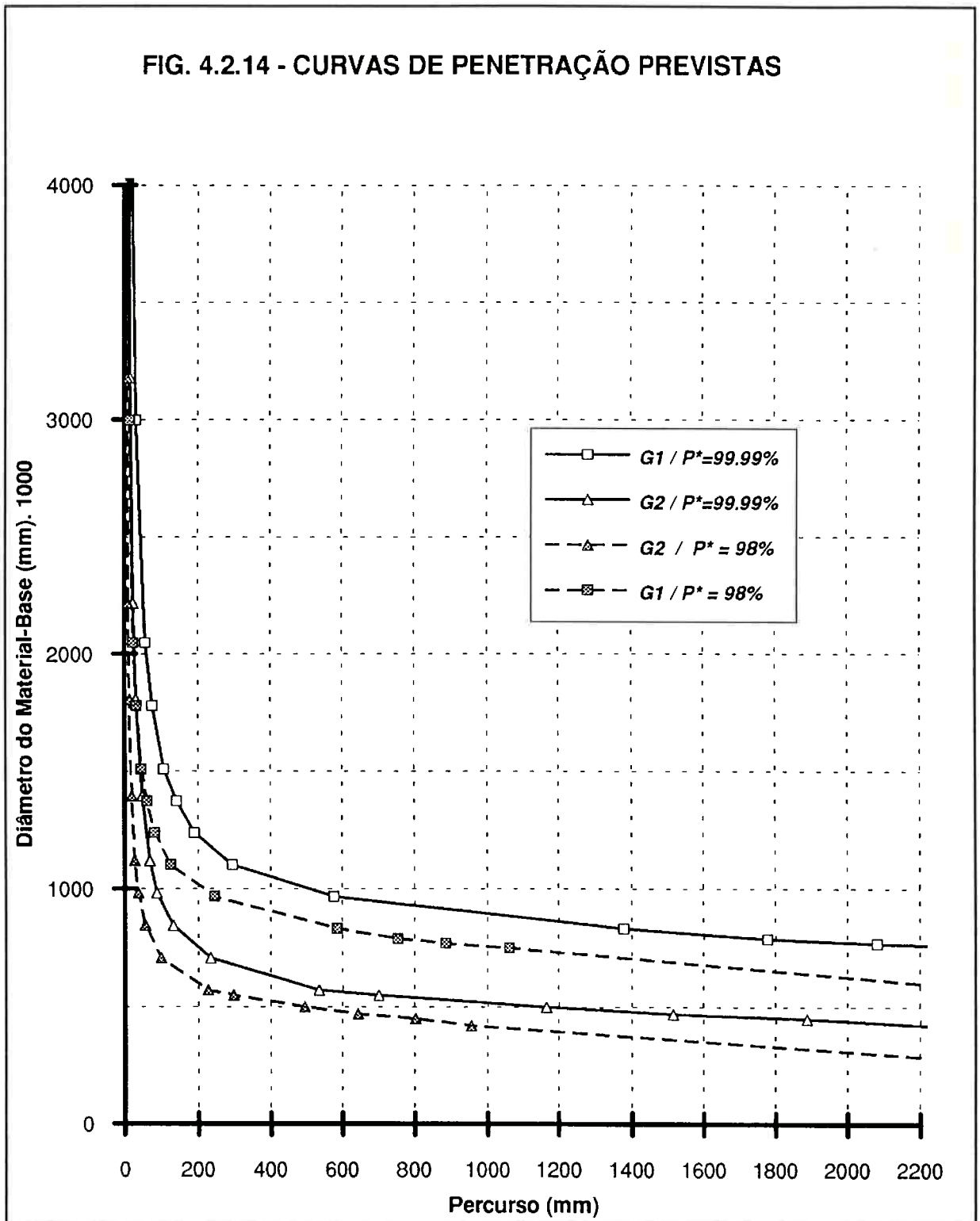
b) Partículas com diâmetro entre 0,70 e 0,85 mm possuem percursos de 1250 mm aproximadamente, que foi o máximo percurso experimental da areia B. Como a areia B possui grãos entre 0,1 e 1,0 mm, a previsão feita é coerente

c) Partículas com diâmetro entre 0,35 e 0,51 mm possuem percursos de 1100 mm aproximadamente, que foi o máximo percurso experimental da areia A. Como a areia A possui grãos entre 0,1 e 1,0 mm, a previsão feita é coerente.

Salienta-se que como o trabalho de Atmatzidis fornece a curva de penetração em termos de teor de areia, sem especificar a sua granulometria, não é possível uma análise mais refinada.

Com os dados disponíveis, pode-se inferir que a análise de carreamento, feita a partir da porosimetria calculada em função da distribuição em área lateral dos grãos, foi adequada para prever os percursos máximos das areias utilizadas como material-base.

FIG. 4.2.14 - CURVAS DE PENETRAÇÃO PREVISTAS



4.3 - Conclusões

A nova proposta para o cálculo da curva de distribuição de vazios de um filtro de proteção, com a determinação da frequência de ocorrência dos vazios a partir da distribuição em termos de área lateral das partículas, quando aplicada ao ensaio de carreamento realizado por Sória e co-autores, seguindo a proposta de Silveira (1993), mostrou-se adequada .

Pelo novo enfoque, verifica-se a tendência de redução dos maiores vazios com a melhor graduação do filtro, ou seja com o aumento do seu CNU. Observa-se que a não-observância desta tendência para filtros bem graduados, é a maior restrição da hipótese pioneira de Silveira, que utiliza a distribuição volumétrica das partículas .

A concordância entre os resultados de um modelo físico e os valores obtidos pela aplicação da nova proposta, somada à coerência entre os valores obtidos através da nova abordagem e os resultados dos ensaios de filtragem de Sherard e co-autores(1984) e de Atmatzidis(1989), indicam a validade da nova proposta .

5 - Conclusões e Considerações Finais

Tendo em vista o exposto nos capítulos anteriores, recomenda-se que a determinação analítica da distribuição de vazios de um filtro de proteção no estado denso, seja feita através da seguinte metodologia :

a) Cálculo dos Diâmetros de Controle :

O cálculo dos diâmetros dos vazios de controle deve ser feito através do conceito proposto por Silveira (1964), onde o diâmetro do vazio resultante do agrupamento de três partículas esféricas (D_i D_j D_k), tangentes entre si, é dado pela equação :

$$\left(\frac{2}{D_i} \right)^2 + \left(\frac{2}{D_j} \right)^2 + \left(\frac{2}{D_k} \right)^2 + \left(\frac{2}{d_v} \right)^2 = 0,50 \left[\left(\frac{2}{D_i} \right) + \left(\frac{2}{D_j} \right) + \left(\frac{2}{D_k} \right) + \left(\frac{2}{d_v} \right) \right]^2$$

b) Cálculo da frequência de ocorrência dos vazios de controle :

A determinação da frequência de ocorrência de cada vazio deve ser feita através das equações :

$$P(i,i,i) = 1 \times p_i^3$$

$$P(i,i,j) = 3 \times p_i^2 \times p_j$$

$$P(i,j,k) = 6 \times p_i \times p_j \times p_k$$

onde, p_i , p_j e p_k são as frequências de ocorrência em termos de **ÁREA LATERAL** das partículas de diâmetros D_i , D_j e D_k .

Para a realização dos cálculos, apresenta-se o Programa **FILTRO** que permite a determinação da porosimetria, e também efetuar a análise de carreamento, utilizando a metodologia proposta por Silveira (1964).

Um aspecto levantado, é que a média harmônica da distribuição granulométrica em massa, que é igual à média ponderada pela frequência em área lateral de partículas esféricas, é uma boa estimativa para o valor do percurso unitário, utilizado para o cálculo do percurso máximo de um grão do material-base no interior do filtro de proteção. A determinação do valor do percurso unitário é um tema em aberto, que deve ser alvo de futuras pesquisas.

Outros temas que devem ser alvos de trabalhos futuros, é a normalização do ensaio, proposto por Silveira(1993) e realizado por Sória e co-autores(1993), para a determinação experimental da curva de distribuição de vazios, além da execução desses ensaios para materiais bem-graduados, para os quais não existem dados experimentais.

Anexo I - Estabilidade Interna dos Solos

Neste item será apresentada a atual situação do conhecimento do aspecto relativo à estabilidade interna de materiais granulares. Tsutyia (1987) apresenta uma revisão bibliográfica detalhada, que foi utilizada para a apresentação dos trabalhos dos pesquisadores russos e de Kenney-Lau(1984).

A instabilidade interna é o fenômeno aonde um solo tem as suas partículas finas transportadas através dos vazios de sua fração grossa, ao ser submetido a um fluxo de água. Este mecanismo se desenvolve em materiais com uma descontinuidade granulométrica (“gap graded”) e em materiais muito graduados.

1.1 - Histórico

A preocupação com a instabilização interna de solos iniciou-se na URSS, em 1898, quando Pavlov(Lubochkov,1969) estudando o mecanismo de ruptura interna do solo, propôs o termo “Mechanical Suffosion” para descrever a lavagem das partículas de uma camada de solo.

Após a citação inicial de Pavlov, somente em 1936, Bochkov, (1936) reapresenta o problema, em um trabalho onde relaciona a instabilização com relações granulométricas entre frações fina e grossa, gradiente hidráulico e regime de fluxo da água. Bochkov verificou que a instabilização ocorre quando no meio analisado ocorre fluxo turbulento, gradiente hidráulico maior que 5 e $D/d \geq 20$, onde D é o diâmetro representativo da fração grossa e d o diâmetro da fração fina do material.

Patrashev (1938) apresentou o primeiro estudo teórico sobre o assunto, tentando prever o comportamento dos solos ao se instabilizar. Ele partiu do princípio que a instabilização interna pode ocorrer em condições de fluxo laminar e, que o carreamento de partículas da fração fina do solo, é iniciado na superfície da camada, e se propaga em direção ao seu interior, apresentando uma formulação baseada no coeficiente de permeabilidade.

Istomina (1957) realizou investigações experimentais com o intuito de prever o comportamento instabilizante de solos não coesivos. A referida autora verificou que a instabilização interna dos solos ensaiados, dependia fundamentalmente do coeficiente de não uniformidade ($CNU = D_{60}/D_{10}$) dos mesmos, classificando os referidos solos em três grupos :

- Solos estáveis - $CNU \leq 10$
- Solos instáveis - $CNU \geq 20$,
- Série intermediária - $10 < CNU < 20$, intervalo onde os solos podem ser classificados como estáveis ou não, dependendo de sua granulometria.

Lubochkov (1969) apresentou um estudo teórico sobre o assunto. Baseado no princípio de que a instabilização interna de materiais não coesivos e pouco densos, depende fundamentalmente das características da curva granulométrica, e propôs um critério para avaliação do referido processo.

A discussão sobre o assunto foi somente retomada à partir de 1975, quando De Mello (1975) apresentou um critério que permite avaliar a instabilização interna de materiais granulares, considerando que esta ocorrência é dependente da distribuição granulométrica do material estudado. Kezdi (1979) e Sherard (1982) também apresentaram critérios baseados nas observações de De Mello.

Kenney&Lau(1984 e 1985) apresentaram trabalhos, onde são relatadas investigações experimentais realizadas em diversos materiais de modo a avaliá-los em relação à instabilização, obtendo-se um critério de estabilidade.

Aberg(1993) e Skempton-Brogam(1994) apresentam investigações teóricas e experimentais recentes sobre este tópico.

A seguir será apresentada uma síntese sobre o atual conhecimento deste assunto.

1.2 - Lubochkov (1969)

a) Considerações gerais

Lubochkov apresentou, em 1969, um estudo teórico que culminou com a apresentação de um critério de avaliação da estabilidade interna de materiais granulares, menos densos, sendo este o estudo mais importante apresentado por pesquisadores soviéticos.

A análise da instabilização interna é pertinente a solos bem graduados, pois a mesma está associada à perda de finos do referido solo. E assim, pode-se de certo modo, associar a instabilização às características da curva granulométrica, pois nesta estão inseridos os finos passíveis de serem perdidos. Pode-se intuir que para não ocorrer a referida perda de finos, ou melhor, a instabilização, deve-se ter relações compatíveis entre os diâmetros e distribuição das partículas do material. Isto significa que a curva granulométrica deve ter uma determinada característica, para que os finos não sejam carreados.

Lubochkov se baseou nas observações citada, para enunciar o seu critério, considerando que devam existir relações limites entre os diâmetros e distribuição de partículas, de tal forma que na eventualidade de se ultrapassá-las, o material se instabilizaria. Assim Lubochkov propôs uma curva granulométrica limite (Figura I.2.1), de tal forma que a asserção acima fosse obedecida. Pode-se verificar que o gráfico apresentado nesta figura compõe-se de duas regiões delimitada pela curva granulométrica limite, sendo que se a curva granulométrica do material analisado se situar na região (a) o material será estável, e instável na região (b).

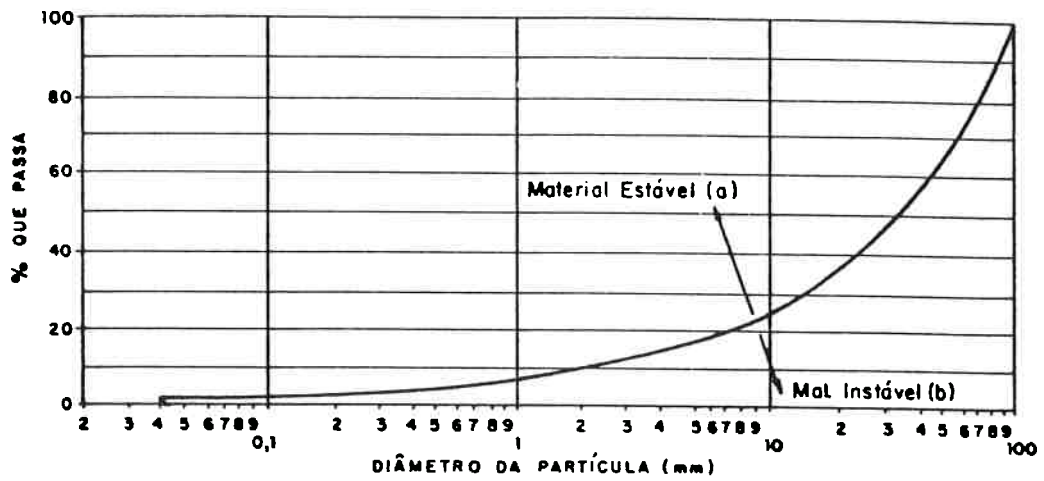


FIGURA I.2.1- CURVA GRANULOMÉTRICA LIMITE DE LUBOCHKOV

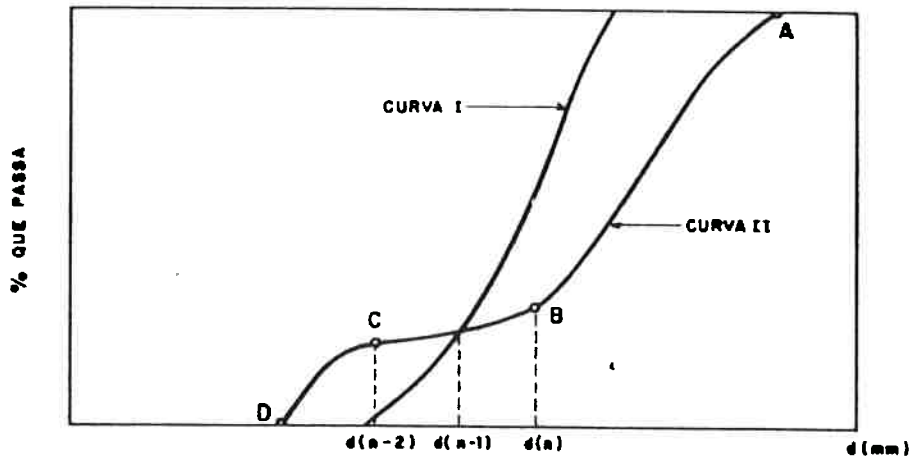


FIGURA I.2.2- MATERIAIS DE GRANULOMETRIAS CONTÍNUA E DESCONTÍNUA

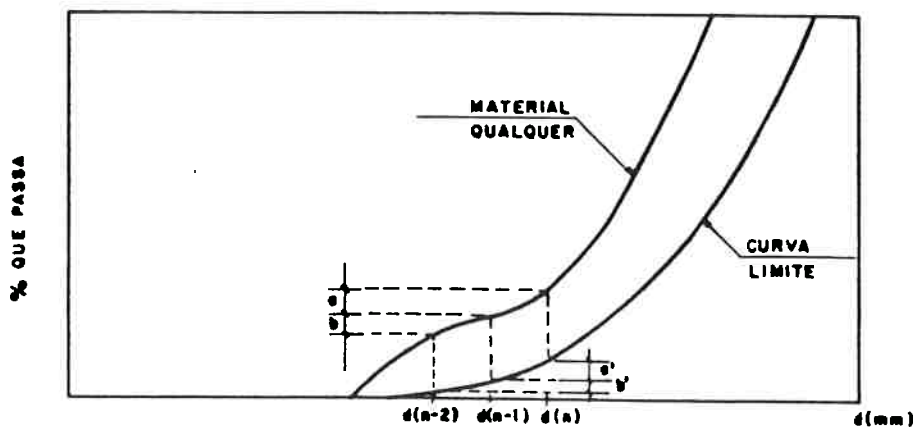


FIGURA I.2.3- CURVAS GRANULOMÉTRICAS LIMITE E QUALQUER

Em resumo, o critério de Lubochkov consiste em comparar a curva granulométrica do material analisado com a curva granulométrica limite teórica, calculada segundo metodologia descrita a seguir.

b) Curva granulométrica limite teórica

Para a definição da curva granulométrica limite teórica serão feitas considerações em separado, da obtenção de seus diâmetros e suas porcentagens de ocorrência.

b.1) Determinação dos diâmetros das partículas

A curva granulométrica limite foi obtida, considerando-se que não deve ocorrer nenhuma perda de partícula do material. Esta asserção conduz à necessidade da existência de compatibilidade entre partículas de tal forma que as partículas menores encaixem nos vazios formados nos contatos das maiores. E assim, tendo-se uma série de diâmetros $d(1) < d(2) < d(3) < \dots < d(n-1) < d(n)$, da curva granulométrica, pode-se ter a referida compatibilidade do seguinte modo :

- Inicialmente, agrupam-se as partículas de diâmetro $d(n-1)$ de tal forma, que estas se encaixam nos vazios obtidos anteriormente; formando assim, um novo agrupamento de partículas $d(n)$ e $d(n-1)$.

- Com este novo agrupamento de partículas $[d(n), d(n-1)]$ ter-se-á um novo vazio, que deverá ser preenchido por uma partícula de diâmetro $d(n - 2)$, selecionada de tal forma que se encaixe no referido vazio. E assim, a partícula de diâmetro $d(n - 2)$, fará parte do novo agrupamento, agora formado pelas partículas de diâmetros $[d(n), d(n-1), d(n - 2)]$.

E assim, sucessivamente até que se esgotem os diâmetros da curva granulométrica.

O procedimento relatado conduz a inferência sobre a existência de uma relação entre os diâmetros de partículas do material, tal que :

$$\frac{d(n)}{d(n-1)} = \frac{d(n-1)}{d(n-2)} = \frac{d(n-2)}{d(n-3)} = \frac{d(3)}{d(2)} = \frac{d(2)}{d(1)} = \beta \quad (\text{I.2.1})$$

Para um dado material, a relação β caracteriza o potencial de instabilização interna do mesmo, e o denominador das relações apresentadas deve ser igual ao vazio formado pelas partículas do numerador. Lubochkov adota a condição de porosidade máxima para o material analisado e obtém as seguintes relações entre o diâmetro do vazio e o da partícula formador deste :

Para materiais mais grossos.

$$\frac{d}{dv} = 2,414 = \beta \quad (\text{I.2.2})$$

Para materiais mais finos :

$$\frac{d}{dv} = 2,000 = \beta \quad (\text{I.2.3})$$

Pode-se notar que as relações obtidas por Lubochkov são compatíveis com as obtidas por Silveira (1966) : $d/dv = 2,439$.

Tendo-se o valor de β , poder-se-á definir os diâmetros $d(1)$, $d(2)$, ..., $d(n)$ da curva granulométrica limite, restando definir a sua distribuição.

b.2) Determinação da frequência das partículas

Como visto no item anterior, os diâmetros das partículas foram calculadas formando-se agrupamentos entre diversos diâmetros, tais como : [$d(n)$], [$d(n), d(n-1)$], [$d(n), d(n-1), d(n-2)$], ..., [$d(n), d(n-1), \dots, d(3), d(2)$], [$d(n), d(n-1), \dots, d(3), d(2), d(1)$]. Portanto, pode-se inferir que a distribuição de partículas deve ser obtida considerando-se estes agrupamentos. Lubochkov adotou o seguinte procedimento para o cálculo da referida distribuição :

- Inicialmente, toma-se o agrupamento [$d(n), d(n-1)$], constituindo uma unidade de volume, e admitindo-se que $d(n)$ é maior que $d(n-1)$, que implica que as partículas $d(n-1)$ estão retidas nos vazios formados por $d(n)$. Com o agrupamento, assim definido, pode-se obter a massa da mesma, em uma unidade de volume.

- Em seguida toma-se $d(n-2)$ para se formar o agrupamento [$d(n), d(n-1), d(n-2)$], e calcula-se a massa deste novo agrupamento, fazendo-se as mesmas considerações do caso anterior. E assim sucessivamente, até que todas as n partículas selecionadas da curva limite sejam utilizadas, tendo-se no final a massa do agrupamento de n partículas [$d(n), d(n-1), \dots, d(3), d(2), d(1)$]

- A porcentagem de ocorrência de uma fração composta de partículas com um certo diâmetro $d(i)$, pode ser calculada pela seguinte expressão :

$$p(i) = \frac{M(s_i)}{M(s)} \quad (I.2.4)$$

onde :

$M(s_i)$ representa a massa da fração de diâmetro $d(i)$

$M(s)$ representa a massa total do material.

Seguindo este procedimento, Lubochkov apresenta a seguinte equação que permite o traçado da curva granulométrica limite :

$$p(i) = 0,69 \sqrt[5]{d(i)^3 / d(60)} \quad (I.2.5)$$

b.3) Critério de Estabilidade interna

A análise apresentada no item anterior foi a primeira consideração feita por Lubochkov. Posteriormente, o referido autor apresentou uma forma simplificada do método, que é apresentada a seguir.

A curva granulométrica limite deduzida por Lubochkov considera uma proporcionalidade entre diâmetros e distribuição das partículas do material. Portanto, em uma curva granulométrica onde não há nenhuma descontinuidade (curva I), a instabilização do material não deverá ocorrer, enquanto que existindo a referida descontinuidade, o material (curva II) poderá se instabilizar. Na Figura I.2.2 (ver página 143) são apresentadas as duas situações.

Pode-se, então, intuir que a instabilização deverá ocorrer devido a descontinuidade da curva granulométrica. Nesta Figura, os trechos AB e CD não devem ser responsáveis pela instabilização, pois há uma relação compatível entre seus diâmetros e distribuições. A mesma observação não pode ser feita para o trecho BC, onde há uma descontinuidade.

Lubochkov postula que a instabilização deve ocorrer no trecho de descontinuidade, e portanto, basta comparar a curva granulométrica do material analisado com a curva limite neste trecho.

Para realizar a análise de estabilidade no trecho BC, que consiste em verificar se há compatibilidade de diâmetros e distribuições, toma-se um ponto arbitrário ($d(n - 1)$) no interior do trecho BC e determina-se $d(n)$ e $d(n - 2)$ através das seguintes relações propostas pelo autor.

Para Fator de Segurança entre 1,0-1,3

$$d(n) = 10 d(n - 1) \quad (I.2.6)$$

$$d(n - 2) = 0,1 d(n - 1) \quad (I.2.7)$$

Para Fator de Segurança entre 2,0-2,5

$$d(n) = 5 d(n - 1) \quad (I.2.8)$$

$$d(n - 2) = 0,2 d(n - 1) \quad (I.2.9)$$

e a seguir através dos diâmetros das partículas e equação (I.2.5), pode-se obter as porcentagens em massa das mesmas.

A análise proposta pelo autor consiste em comparar os diâmetros e respectivas distribuições, obtidas no trecho de descontinuidade, com os diâmetros e distribuições correspondentes na curva limite. Para isso introduziu um coeficiente de forma que permite realizar a comparação citada.

O coeficiente de forma é obtido relacionando-se as porcentagens de ocorrência de diâmetros das partículas no intervalo $[d(n), d(n-1)]$ com as do intervalo $[d(n - 1), d(n - 2)]$. Portanto, deve-se calcular um coeficiente de forma para a curva granulométrica

limite e outro para a curva analisada. A Figura I.2.3 (ver página 143) apresenta a curva limite e uma curva granulométrica qualquer a ser analisada.

O coeficiente de forma para a curva limite pode ser calculada do seguinte modo :

$$C(f,m) = \frac{P(n,m) - P(n-1,m)}{P(n-1,m) - P(n-2,m)} = \frac{a'}{b'} \quad (I.2.10)$$

onde :

$C(f,m)$ é o coeficiente de forma da curva limite $P(n,m)$, $P(n-1,m)$, $P(n-2,m)$ são as porcentagens relacionadas com os diâmetros $d(n)$, $d(n-1)$, $d(n-2)$ da curva limite.

Utilizando-se as relações (I.2.5), (I.2.6) e (I.2.7) obtém-se o coeficiente de forma para fator de segurança entre 1,0-1,3.

$$C(f,m) = \frac{0,69 \left[\sqrt[5]{(10d(n-1)/d(60))^3} - \sqrt[5]{(d(n-1)/d(60))^3} \right]}{0,69 \left[\sqrt[5]{(d(n-1)/d(60))^3} - \sqrt[5]{(0,1d(n-1)/d(60))^3} \right]} = \frac{\sqrt[5]{10^3}}{4,0} \quad (I.2.11)$$

Utilizando-se as relações (I.2.5), (I.2.8) e (I.2.9) em (I.2.10), obtém-se o coeficiente de forma para fator de segurança entre 2,0-2,5.

$$C(f,l) = \frac{0,69 \left[\sqrt[5]{(5d(n-1)/d(60))^3} - \sqrt[5]{(d(n-1)/d(60))^3} \right]}{0,69 \left[\sqrt[5]{(d(n-1)/d(60))^3} - \sqrt[5]{(0,2d(n-1)/d(60))^3} \right]} = \sqrt[5]{5^3} = 2,6 \quad (I.2.12)$$

O coeficiente de forma para a curva granulométrica analisada pode ser calculado do modo seguinte:

$$C(f) = \frac{P(n) - P(n-1)}{P(n-1) - P(n-2)} = \frac{a}{b} \quad (I.2.13)$$

onde:

$C(f)$ é o coeficiente de forma da curva granulométrica analisada

$P(n)$, $P(n - 1)$, $P(n-2)$ são as porcentagens relacionadas com os diâmetros $d(n)$, $d(n-1)$, $d(n-2)$ da curva granulométrica analisada.

O julgamento em relação à estabilidade ou não do solo, é realizado comparando-se $C(f)$ e $C(f,m)$. Se a relação $C(f)/C(f,m)$ for maior que 1 o solo será estável, e instável, em caso contrário.

E assim, deve-se ter :

Para FS = 1,0 - 1,3

$$R = \frac{C(f)}{C(f,m)} = 0,25 C(f) > 1,0 \quad (I.2.14)$$

sendo $C(f,m) = 4,0$

Para FS = 2,0 - 2,5

$$R = \frac{C(f)}{C(f,m)} = 0,40 C(f) > 1,0 \quad (I.2.15)$$

sendo $C(f,m) = 2,6$

Em resumo, o seguinte procedimento deve ser seguido para análise de estabilidade interna de solos pelo critério de Lubochkov :

- Traça-se, inicialmente, a curva granulométrica de um solo.
- Para a região de finos desta curva, procura-se os trechos que apresentam descontinuidades, que são caracterizadas pela variação no ângulo de inclinação da curva :
- Toma-se um ponto arbitrário ($d(n-1)$) no referido trecho, que corresponderá a uma percentagem $p(n-1)$.

- Com $d(n-1)$ determina-se $d(n)$ e $d(n-2)$, utilizando-se das equações (I.2.6), (I.2.7), (I.2.8) e (I.2.9), dependendo do fator de segurança requerido para o cálculo.
- Utilizando a equação (I.2.13) obtém-se $C(f)$
- Substituindo a relação (I.2.13) em (I.2.14) ou (I.2.15) obter-se-á o valor de R .
- Se $R > 1$ o solo será estável, mas se $R < 1$ o solo será instável.

1.3 - De Mello (1975)

Em 1975, De Mello propôs um critério de estabilidade interna de materiais que possuem uma curva granulométrica descontínua. Para que um material possa ser considerado internamente estável, De Mello propôs que, a sua fração grossa seja verificada, como material de filtro da fração fina. Para esta verificação, é internamente estável, deve-se separar as duas frações, no ponto de descontinuidade e comparar as curvas granulométricas obtidas, com relação a estabelecida $X(85) = D(15,f)/D(85,b)$ que deve ser menor que 4/5.

1.4 - Kezdi (1979)

O critério apresentado por Kezdi (Lafleur, 1981) é uma extensão do critério de De Mello (1975) para a análise de estabilidade interna de materiais granulares.

Kezdi estendeu a proposta de De Mello, analisando mais do que um ponto de descontinuidade da curva e admitindo que o solo será internamente estável, somente se $X(85)$ para todas as divisões realizadas forem menores que 5.

1.5 - Sherard (1982)

O critério apresentado por Sherard, em 1982, para a análise da estabilidade interna de um material granular, é também uma extensão da proposta de De Mello (1975). Deverão ser analisados diversos pontos de descontinuidades obtidas a partir da admissão de valores para $D(15,f)$ e $D(85,b)$ e calculados para um destes pontos, o valor da relação de estabilidade $X(85)$. Para o cálculo destes valores, Sherard propõe uma sistemática para agilizar os cálculos :

a) Na curva granulométrica do material estudado, escolhe-se os diâmetros, por exemplo, correspondentes a $x = 5, 10, 15, 20, 25\%, \dots$, que serão considerados os “d85”, da fração fina (d85f).

b) O ponto de divisão da curva granulométrica, será obtido, através da divisão da porcentagem considerada, por 0,85. Por exemplo, para 10% ter-se-á como ordenada do ponto de divisão, 12%.

c) O “D15g” da fração grossa é obtido como sendo o diâmetro da fração grossa correspondente a porcentagem $x+15\%$, onde x é a porcentagem do “d85” da fração fina. Através desta hipótese não é necessário traçar a curva granulométrica da fração grossa.

d) Calcula-se, então, a relação de estabilidade, como $X(85) = D15g/d85f$.

Sherard considera o material como estável internamente, se todos os $X(85)$ calculados, forem menores que 4, ou seja, basicamente quando :

$$D20/D5, D25/D10, D30/D15, D35/D20 \dots D100/D85 < 4 \quad (I.5.1)$$

I.6 - Kenney & Lau (1984,1985 e 1986)

Em 1984, Kenney & Lau apresentaram investigações experimentais com o intuito de estudar a instabilidade interna de materiais granulares. As investigações realizadas pelos referidos autores ficaram restritas a materiais de filtro granulares, no estado menos denso, e procuravam com isto alcançar três objetivos principais :

- i)apresentar uma discussão sobre instabilização interna de materiais granulares,
- ii) Apresentar procedimentos e resultados dos ensaios realizados para investigar o processo,
- iii) Com estes resultados, propor um critério empírico para avaliação do potencial de instabilização de materiais granulares.

O equipamento utilizado nestes ensaios foram basicamente os utilizados pelo (WES, 1953). O ensaio consistiu da montagem de corpos de prova no estado medianamente denso e aplicação de forças de percolação no sentido descendente ou de gravidade aos mesmos, de modo à induzir o movimento dos finos do próprio material em direção à base de amostra, e determinar a variação das curvas granulométricas em vários pontos da amostra.

As curvas granulométricas dos materiais ensaiados são apresentados nas Figuras I.6.1 e I.6.2, sendo divididos em 2 grupos: estáveis e instáveis, respectivamente.

Os autores observaram através dos resultados dos ensaios que dos três fatores que devem causar a instabilização : granulometria do material, densidade relativa e condições hidráulicas, provavelmente, a primeira foi a que mais contribuiu para a instabilização.

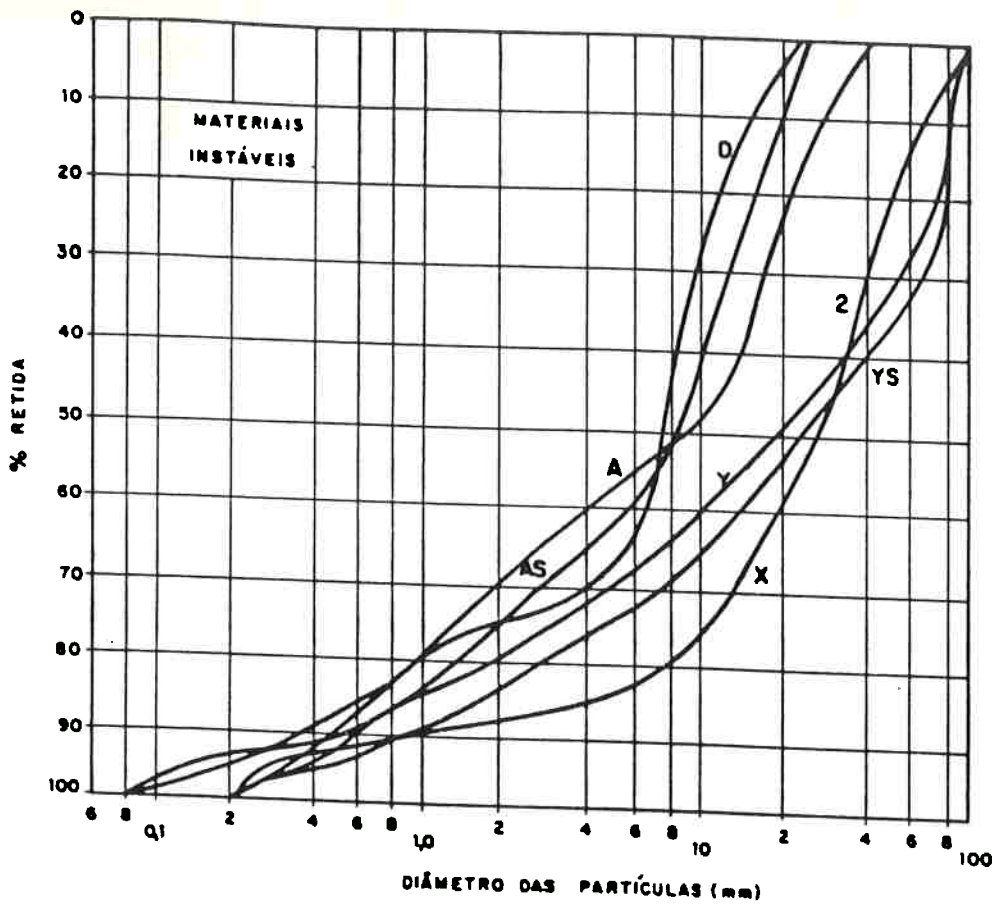


FIGURA I.6.2 - MATERIAIS INSTÁVEIS ENSAIADOS

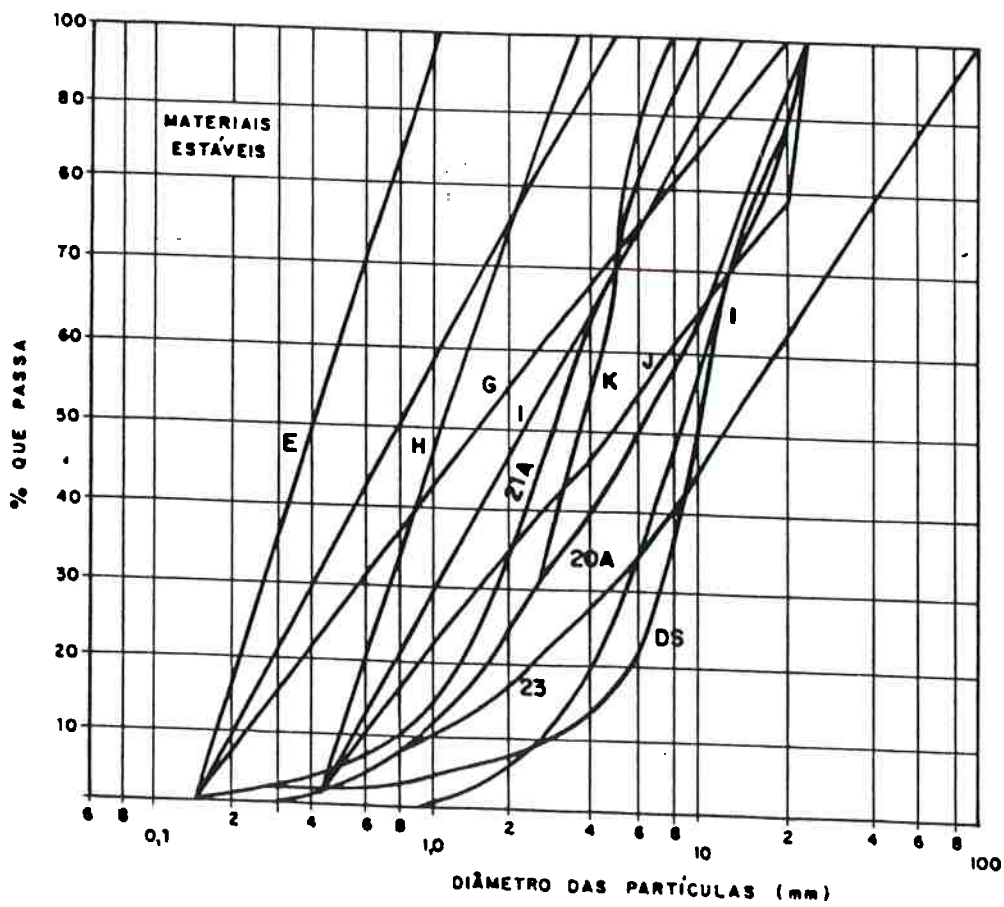


FIGURA I.6.1 - MATERIAIS ESTÁVEIS ENSAIADOS APUD KENNEY E LAU (1984)

No tocante a granulometria, os autores postulam que há fortes evidências, comprovadas por diversos ensaios, de que a forma da curva granulométrica possui maior influência no potencial de instabilização do material, do que os diâmetros absolutos das partículas.

Baseado nesta constatação, Kenney & Lau desenvolveram uma metodologia levando-se em consideração a curva forma, que é apresentada na Figura I.6.3 , e pode ser calculada como se segue :

- Sobre a curva granulométrica do material (Figura I.6.3), toma-se um ponto com coordenada $[d, p(d) = F]$, e o correspondente a $4d$, com $[4d, p(4d)]$.

- A diferença entre as porcentagens de ocorrência dos diâmetros $4d$ e d , $[H = p(4d) - p(d)]$, é colocada no gráfico a direita da Figura I.6.3.

- Este procedimento é repetido para diversos pontos da curva granulométrica, até que se tenha pontos suficientes para se estabelecer a curva determinada “forma”, sendo que a extremidade final desta curva se localiza sobre a linha, representativa da situação $p(d) + p(4d) = 1$.

Os autores aplicaram esta metodologia em todas as curvas granulométricas ensaiadas, obtendo-se os gráficos da Figura I.6.4 que relacionam valores de $H = p(4d) - p(d)$ e $F = p(4d)$.

Na análise destes gráficos, pode-se constatar que as porções situadas no intervalo de 0 a 30%, que corresponde a fração fina, são as causadoras da instabilização; e que há duas regiões delimitadas por uma curva forma limite, onde acima desta o material é estável, e abaixo, instável. Com a curva forma limite, pode-se obter os valores de H limites, que representam a porcentagem de partículas necessárias na faixa $(d - 4d)$ para se evitar a instabilização.

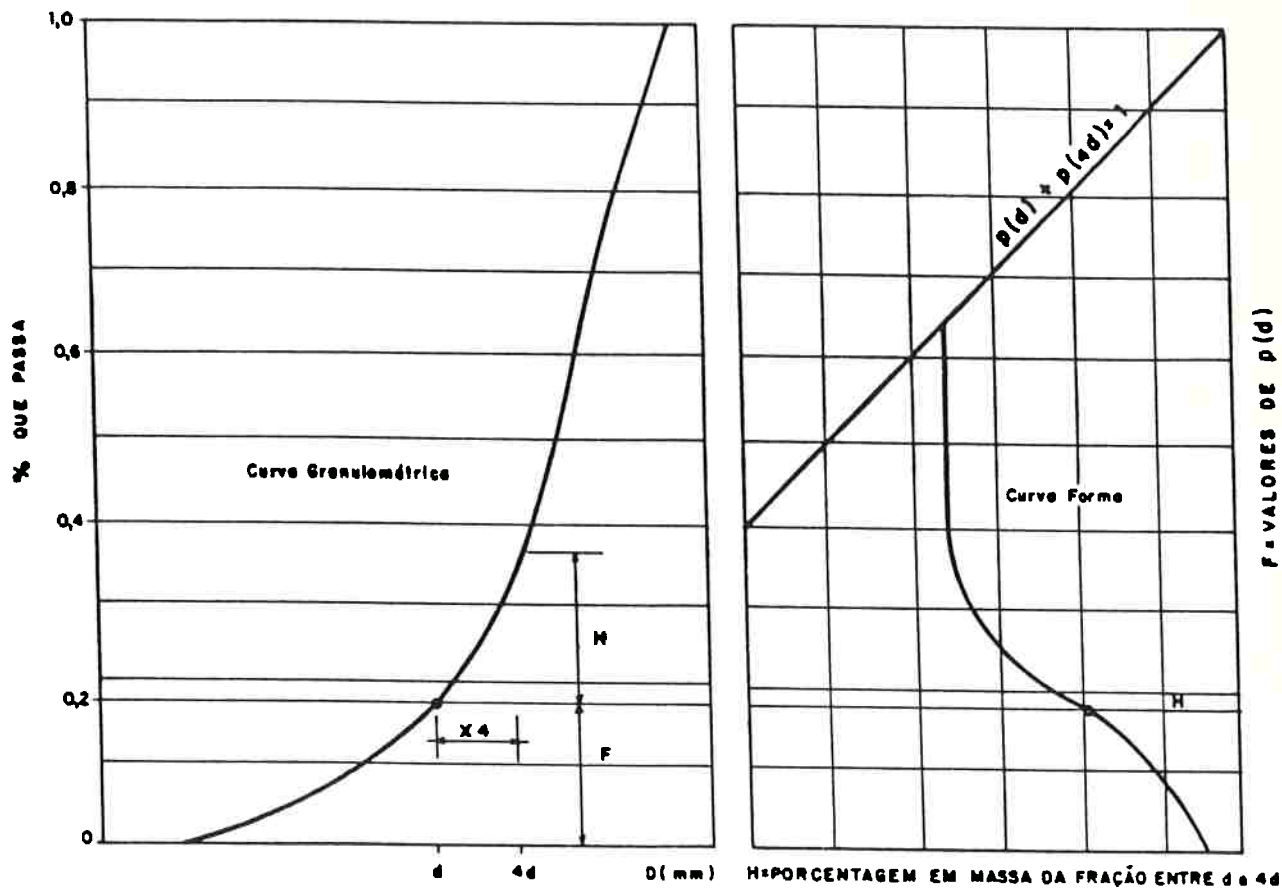


FIGURA I6.3- MÉTODO DE CÁLCULO DA CURVA FORMA DE KENNEY-LAU

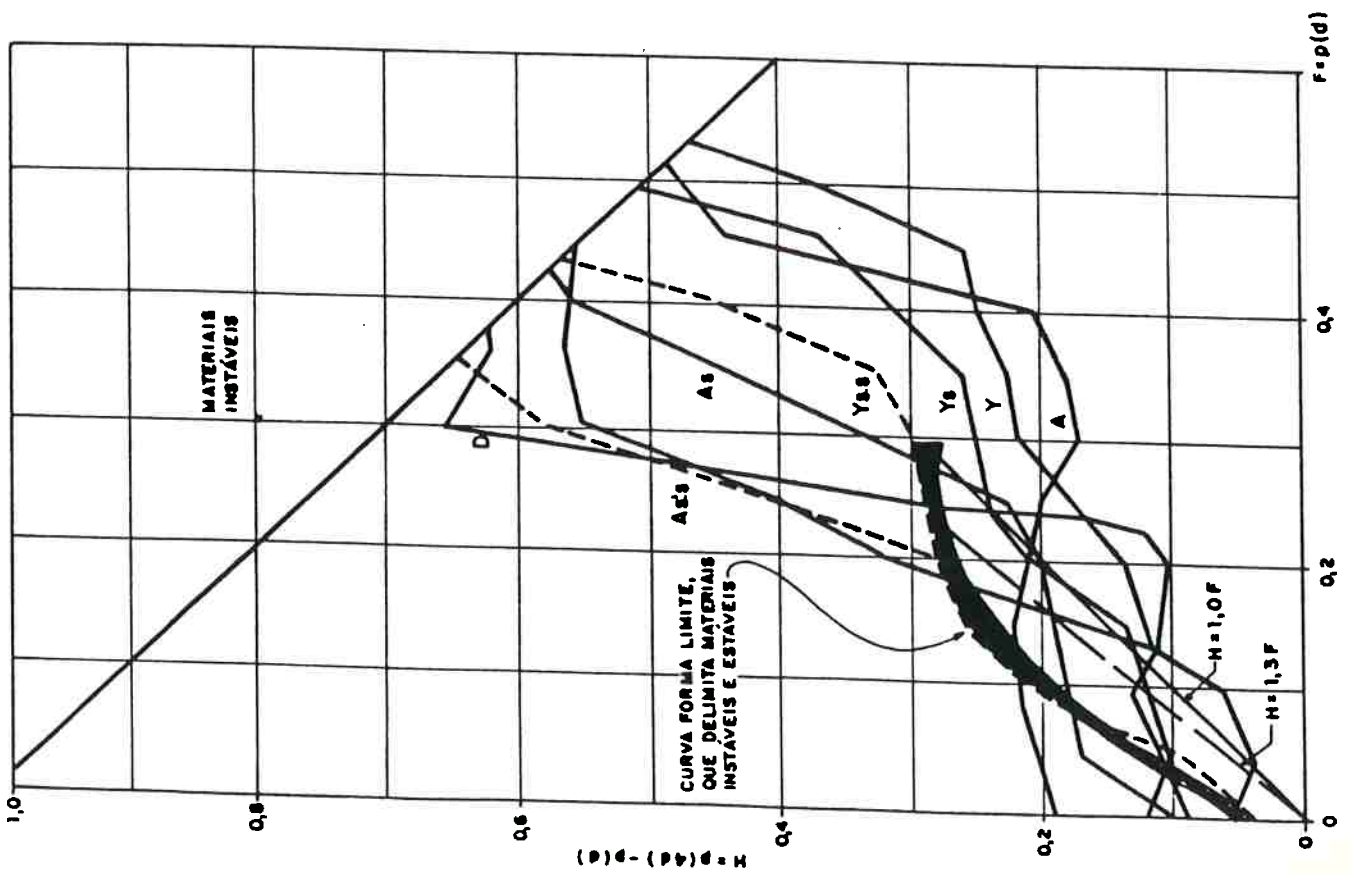
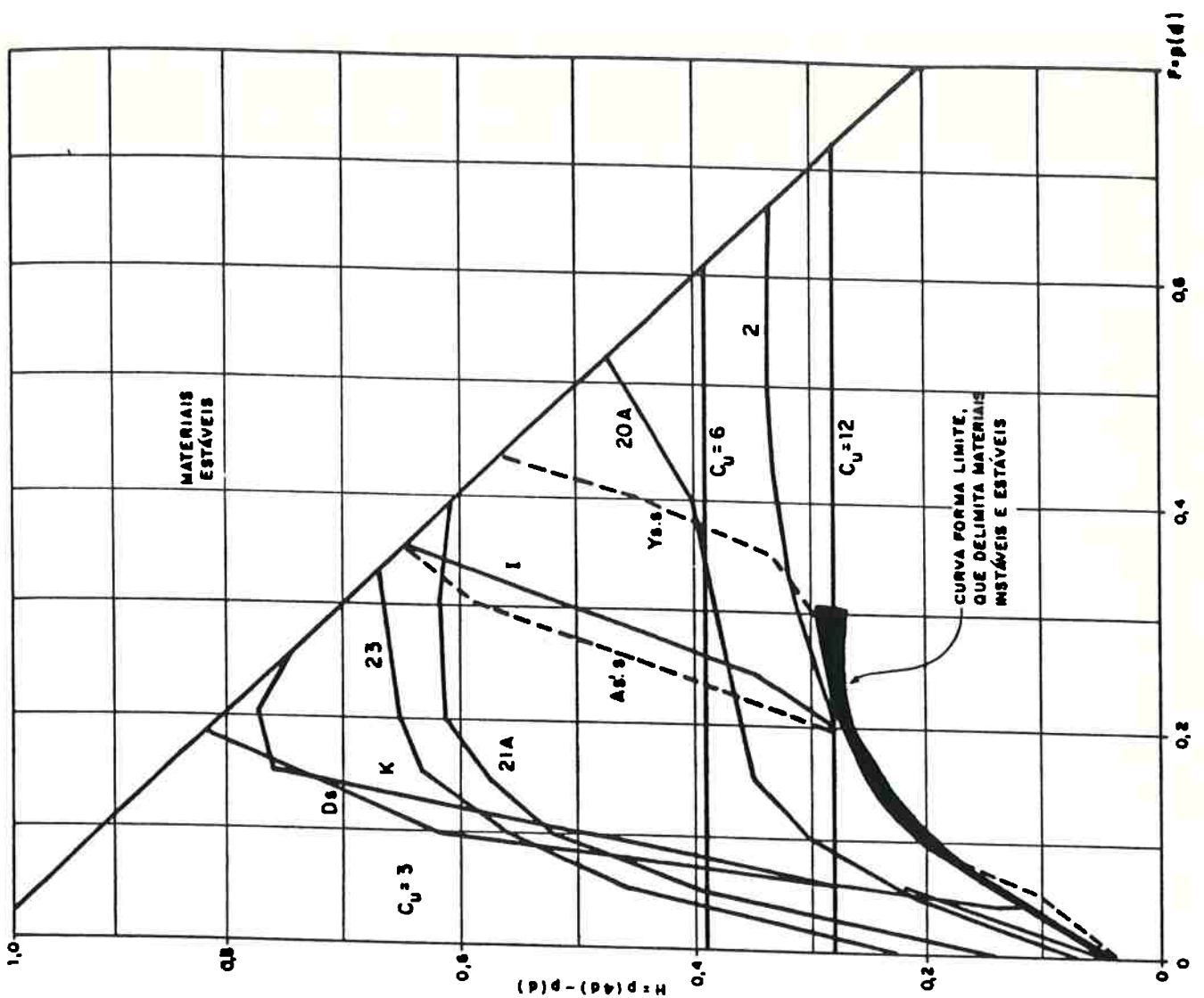


FIGURA I.6.4-CURVAS FORMAS OBTIDAS DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS POR KENNEY E LAU

Em seguida, desenha-se os valores de $H = p(4d) - p(d)$ limites para valores de $p(d) = 10\%$, 15% e 20% , conforme exemplo da Figura I.6.5. Se a curva granulométrica do material analisado se localizar abaixo da curva forma limite, será classificado como potencialmente instável. Pode-se verificar que a situação apresentada na Figura I.6.5, é de um material potencialmente instável.

Este critério apresentado por Kenney & Lau parte do mesmo princípio do critério de Lubochkov, isto é, considera como condição estável, a situação em que existe uma quantidade suficiente de partículas menores que bloqueiam os vazios formados pelas maiores, e que formam uma estrutura única em conjunto com as partículas maiores.

Os valores d e $4d$ utilizados pelos autores, foram obtidos de observações em ensaios de filtro realizados por Kenney em pesquisa anterior na Universidade de Toronto.

As seguintes conclusões foram apresentadas pelos autores :

a) Os materiais granulares bem graduados são constituídos de uma fração grossa e outra fina, sendo que as partículas desta última, ou ficam retidas ou carregam por entre os vazios da fração grossa.

b) O método mais seguro para se determinar a estabilidade ou não do material, é a realização de ensaios de percolação.

c) Ensaios combinando altas velocidades de percolação e vibração, representam condições mais severas do que as encontradas na prática, mas, isto pode ser justificado pela pequena duração dos ensaios em comparação com as condições de campo.

d) Deve-se frisar que as conclusões apresentadas neste trabalho são válidas se forem verificadas as mesmas condições utilizadas nos ensaios.

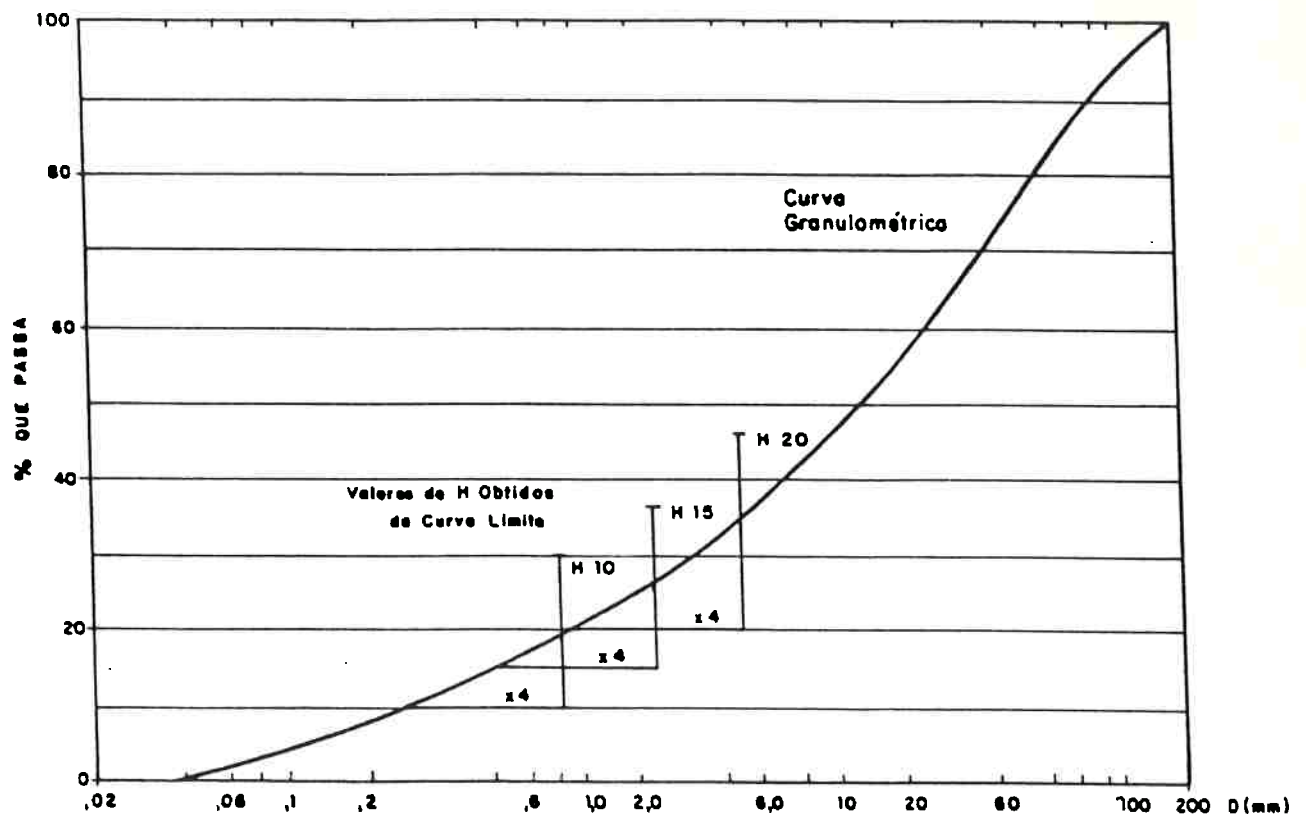


FIGURA I.6.5 - CRITÉRIO PARA AVALIAR A INSTABILIZAÇÃO DO MATERIAL DE KENNEY - LAU (1984)

Kenney-Lau publicaram um artigo em 1985, baseados na pesquisa experimental apresentada, onde a avaliação da estabilidade interna é feita através do cálculo do valor mínimo da relação $R = H/F$ (H e F conforme definidos anteriormente). Se $R > 1.3$, o material é considerado estável.

O cálculo da relação R deve ser feito para $F < 20\%$, quando a fração grossa do material é bem graduada ($CNU > 3$) e para $F < 30\%$ quando a fração grossa do material é pouco graduada ($CNU < 3$). Os autores justificam os valores de F baseado que para frações grossas bem graduadas, os arranjos são densos e somente a fração menor que 20% é potencialmente instável, verificaram esta afirmação com base na relação que existe entre as porosidades de solos constituídos por dois componentes, o que será tratado com mais detalhe no item I.9.

Na Figura I.6.4 plotou-se a relação $H = 1.3.F$, o que permite verificar que esta relação é válida para $F \leq \cong 22\%$, que corresponde à interseção entre a reta $H = 1.3.F$ com a curva forma limite. Para valores F entre 22 e 30%, a relação limite H/F varia entre 1,3 e 1,0, como pode ser notado na figura supra citada.

Os autores mostram neste trabalho que a relação $H/F = 1.3$ é respeitada pela curva granulométrica limite proposta por Lubochkov(1969), e também apresentam ensaios com solos granulares com curva granulométrica retilíneas e $CNU = 3, 6$ e 12 , que mostram que estes materiais possuem estabilidade interna.

Na discussão deste trabalho em 1986, Sherard - Dunnigan ensaiaram o material As (ver Figura I.6.1) e ao contrário do encontrado por Kenney-Lau, o material apresentou um comportamento estável. Estes autores repetiram este ensaio e os dos materiais com granulometria próxima, e confirmaram a afirmação de Sherard-Dunnigan quanto ao solo As, explicando o problema face a uma má interpretação do ensaio.

Mulligan também questionou a relação-limite $H/F = 1.3$, uma vez que este critério aplicado à curva de máxima densidade de agregados de concreto de Fuller, indicaria um material instável, o que não parecia provável. Kenney-Lau ensaiaram este material e verificaram, que ele era estável.

Com base nestas observações , eles reavaliaram a proposta feita, chegando a conclusão que a relação limite R poderia ser abrandada para um valor um pouco superior a 1,0, isto é , $1,0 < R < 1.3$.

Como será visto no item I.9, esta proposta está de acordo com os resultados experimentais de Skempton-Brogan(1994) .

1.7 - Tsutiya et al. (1986,1987)

Em 1986, Tsutiya e co-autores apresentaram um trabalho comparando os resultados obtidos pela aplicação dos critérios de Lubochkov, Kezdi, Sherard nos materiais ensaiados por Kenney & Lau (1984).

As seguintes conclusões foram apresentadas pelos autores :

a) Os resultados obtidos permitem concluir que, os critérios de Kezdi e Sherard, são semelhantes, sendo o último menos trabalhoso.

b) Os critérios de Kezdi e Sherard, mostraram-se satisfatórios na avaliação da estabilidade interna dos materiais instáveis com curvas granulométricas mostradas na Figura I.6.4 . Para os materiais estáveis mostrados na mesma figura . estes critérios não foram satisfatórios, prevendo como instáveis, materiais estáveis. Estes critérios são conservadores, pois não admitem perda de material fino durante o ensaio, apesar de, como observado por Kenney & Lau (1984) , pequenas perdas de finos podem acontecer em materiais internamente estáveis.

c) O critério de Lubochkov, embora sem apresentar resultados muito diferentes dos outros dois, é muito mais trabalhoso.

d) Observou-se que a deficiência granulométrica é a principal responsável pela não estabilidade interna de um material granular.

Tsutyia sugere a utilização da análise de carreamento proposta por Silveira (1964) para verificar a estabilidade interna das partículas livres, utilizando a curva de vazios restantes da fração grossa. Trata-se de uma nova abordagem aos critérios de De Mello, Kezdi e Sherard , com a verificação de filtragem através da análise de carreamento ao invés do critério clássico de Terzaghi.

Observa-se, que face às restrições apontadas no item 2.7, não deve ser utilizada a curva de vazios restantes, e sim, a curva de vazios calculada segundo a proposição de Silveira, com a modificação proposta nesta tese (ver Capítulo 4).

1.8 - Trabalhos de Aberg (1992 e 1993)

Aberg apresenta um modelo onde a caracterização da granulometria e da porosimetria de materiais granulares é feita a partir da corda (g) dos grãos e a corda i' dos poros, conforme mostra a Figura I.8.1.

Uma corda de um grão é definida como a intersecção AB entre uma linha reta e uma partícula, cujo valor médio para partículas convexas é igual a :

$$g = \frac{4V}{A} \quad (\text{I.8.1})$$

onde V e A são o volume e a área lateral da partícula.

Admitindo $V = a_v \cdot x^3$ e $A = a_a x^2$ e

x = abertura da peneira imediatamente anterior àquela onde a partícula é retida.

Fazendo $a = a_v / a_a$, vem que:

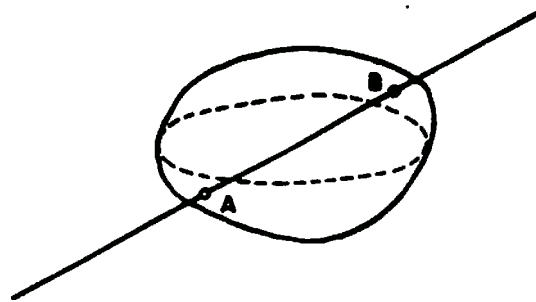
$$g = 4 a x \quad (\text{I.8.2})$$

Para 300 pedregulhos arredondados estudados, foi obtido um valor médio :

$a = 0,125$, ou seja, $g = 0,5x$.

Aberg admitiu que os vazios de um solo graduado são determinados pelos grãos menores que preenchem os vazios dos grãos maiores. Assim o comprimento da corda i' do vazio é função do tamanho do menor grão adjacente. O comprimento médio de sua corda i' é proporcional à corda média g' desses grãos. Sendo c uma constante, obtém-se :

$$i' = c g' = c \cdot 4 \cdot a \cdot x' \quad (\text{I.8.3})$$



Corda do Grão

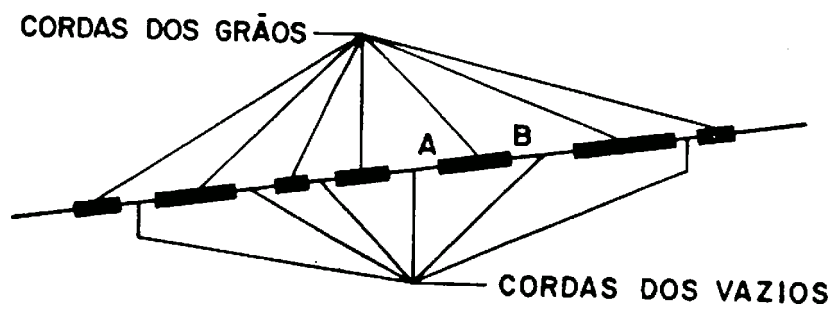


FIGURA I. 8.1
CORDAS DOS GRÃOS E DOS VAZIOS

Para pedregulhos arredondados, obteve-se valores entre 0,67 e 0,80 para o parâmetro c .

Um aspecto interessante neste estudo foi que ao de considerar a dimensão média do pedregulho (“filtro”), como a média harmônica ponderada em massa, que conforme visto anteriormente, é igual à média ponderada das partículas em termos de área lateral. Como este autor trabalha em cordas, o valor médio das mesmas pode ser aproximado ao percurso que uma partícula de um material-base percorre ao passar por um vazio de controle de um filtro, que é um parâmetro importante na análise de carreamento.

Aberg através de um equacionamento um tanto quanto complexo, apresenta metodologias para determinar o índice de vazios, a permeabilidade e a estabilidade interna de solos granulares.

Quanto à estabilidade interna, o autor sugere um processo iterativo, onde inicialmente calcula-se o valor da corda média do grão g_a , que separa os grãos livres dos fixos. Em seguida calcula-se o valor da corda média dos vazios i^* da fração superior a g_a .

Se o valor de $(2c + 1) \cdot g_a$, ou seja da corda g_a somada às cordas dos seus vazios adjacentes for inferior ao valor da corda média dos vazios (i^*), o solo é instável internamente, ou seja os grãos com dimensões inferiores a g_a são livres.

Esta pesquisa apresenta a peculiaridade de estudar um material granular através de cordas, o que permite a simplificação de estudar em um plano um meio que é tridimensional. Observa-se que a maneira de determinar a corda do vazio é muito simplificada. Além desta restrição, este modelo apresenta a desvantagem de utilizar coeficientes empíricos “a” e “c” que dependem de um árduo trabalho experimental, além de envolver um grande número de cálculos. Talvez esta abordagem possa ser apropriada para estudo de propriedades que sejam função dos valores médios dos grãos e dos vazios,

todavia para problemas de filtração, onde há a necessidade da determinação da dimensão de controle para a passagem de uma partícula arrastada do material-base, este enfoque não é indicado, pois a estabilidade interna depende também de que os vazios da fração fixa retenham os grãos livres (problema de filtração).

1.9 - Skempton & Brogan (1994)

Estes autores apresentam uma pesquisa sobre a ocorrência de “piping” em pedregulhos arenosos, e verificaram que os pedregulhos que possuem uma distribuição granulométrica descontínua, com teor de areia inferior a 25%, são internamente instáveis.

É apresentada uma síntese dos critérios para verificar a instabilidade (De Mello, Kesdi, Sherard e Kenney-Lau), sendo sugerida que a relação limite de Kenney&Lau ($H/F=1,3$) deveria ser utilizada para materiais medianamente densos e ser abrandada para 1,0, quando o material estivesse em um arranjo denso.

Justificam esta afirmação porque $H/F = 1,0$ corresponde a uma curva granulométrica similar ao trecho inferior da curva de máxima densidade de agregados para concreto de Fuller e, conseqüentemente, a condição de instabilidade interna $H/F < 1,0$, implica que a curva granulométrica possui um trecho mais longo ou abatido no seu trecho final dos finos, que a curva ideal de Fuller.

Outro aspecto apresentado para o entendimento da natureza da instabilidade interna, é que existe um teor crítico de finos (S^*) em um material descontínuo, abaixo do qual os finos não preenchem totalmente os vazios da fração grossa.

O valor de S^* , relação entre a massa de fração fina (M_f) e a massa total (M_t), pode ser expresso em função das porosidades n_c e n_f das frações grossas e finas dos componentes, conforme se segue :

$$S^* = \frac{M_f}{M_t} = \frac{A}{1 + A} \quad (\text{I.9.1})$$

onde

$$A = nc(1 - nf) / (1 - nc) \quad (\text{I.9.2})$$

Estas equações mostram que para os valores usuais de porosidade o valor de S^* varia pouco, entre 29% para arranjos fofos ($nc = 45\%$, $nf = 50\%$) e 24% para arranjos densos ($nc = 35\%$, $nf = 40\%$). Consequentemente, é possível a existência de uma estrutura primária formada pelos pedregulhos quando o teor de areia é menor que 15 - 20%.

Por outro lado, quando o teor de areia excede algo em torno de 35%, as partículas grossas estão “flutuando” na matriz do finos, conforme demonstra a expressão obtida por Kovacs (1981) :

$$nc = n + Sf(1-n) \quad (\text{I.9.3})$$

que mostra que para valores usuais de porosidade, n , do material como um todo ($n > 20\%$) e $Sf > 35\%$, a porosidade da fração grossa(nc) é superior a 45% ou um pouco mais, que é o valor limite para que as partículas grossas estejam em contacto. Observa-se que adotou-se a nomenclatura de Skempton & Brogan para denominar as porosidades: nc e nf das frações: grossa(coarse) e fina(fine), enquanto que nos capítulos anteriores usou-se nf para a porosidade de um filtro em geral.

Esta abordagem teórica foi feita pelos autores, para procurar explicar porque nos ensaios com materiais internamente estáveis, com gradientes iguais a um terço ou até um quinto do gradiente crítico teórico, houve instabilização, com “piping” da areia e com as partículas do pedregulho permanecendo estáveis.

A possível justificativa é que a grande parcela das tensões são suportadas por uma estrutura primária constituída somente por pedregulhos, que fazem que areia fique sujeita a tensões relativamente pequenas.

Este conceito pode explicar porque nestes materiais, os gradientes para fluxos horizontais foram da mesma ordem de grandeza que os para fluxo vertical, onde a gravidade desempenha um papel importante (ver Figura I.9.1).

Nesta figura, procura-se correlacionar estes gradientes com o índice de estabilidade de Kenney-Lau, mostrando que para materiais internamente estáveis, os gradientes críticos experimentais são da mesma ordem de grandeza que os valores teóricos $i_c = (1 - n) / (1 - \delta)$, e que para relações $H/F < 1,0$, os materiais ensaiados são internamente estáveis.

Cumpram observar que Marsal(1973) já havia detectado a presença de partículas livres ao estudar as propriedades geomecânicas de enrocamentos.

Neste tipo de material ele verificou a presença de partículas inativas (“idle particles”), não sujeitas a tensões, que ocupavam os vazios entre as partículas maiores do material e não faziam parte do esqueleto estrutural do enrocamento.

Observou que a porcentagem de partículas inativas depende da graduação, arranjo dos grãos, índice de vazios e estado de tensão do material. Para levar em consideração a existência destas partículas, sugere a adoção de um novo índice, o índice de vazios estrutural e_s , que é definido por :

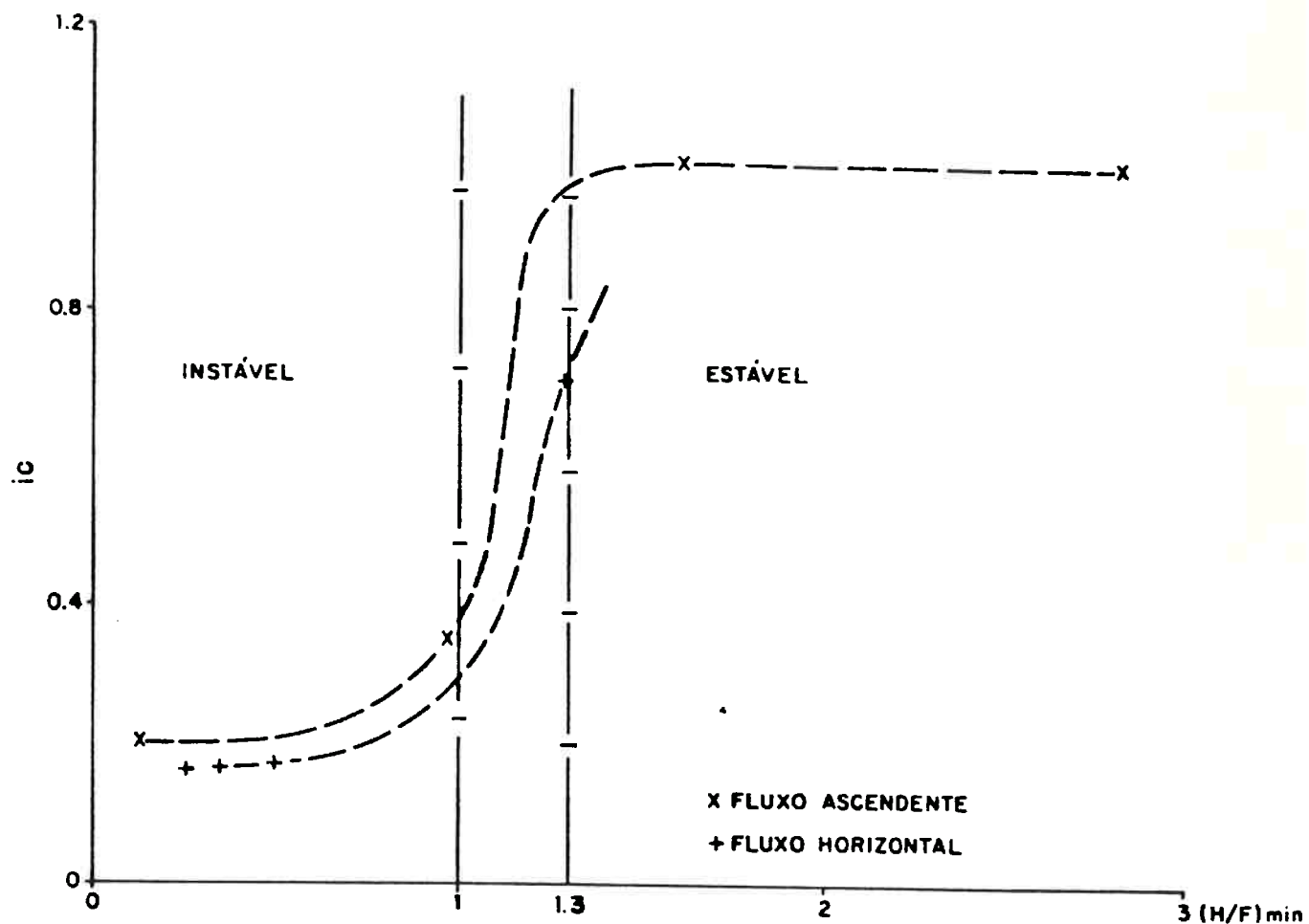


FIGURA I.9.1 - RELAÇÃO ENTRE GRADIENTE CRÍTICO E ÍNDICE DE ESTABILIDADE APUD (SKEMPTON AND BROGAN - 1.994)

$$e_s = (e + i) / (1 - i) \quad (\text{I.9.4})$$

onde:

$$e = \text{índice de vazios} = V_v / V_s$$

V_s = volume dos sólidos

V_v = volume dos vazios

$$i = \Delta V_s / V_s \quad (\text{I.9.5})$$

ΔV_s = volume das partículas inativas

Neste índice as partículas inativas (ver equação I.9.4) são consideradas como se fossem vazios.

Marsal ressalta que infelizmente não é possível utilizar o índice e_s , pois não é conhecido um meio de medir ΔV_s . Apesar desta limitação, é salientada a importância deste conceito para interpretar os resultados experimentais dos estudos sobre forças de contacto e quebra de grãos, que influenciam a deformabilidade e resistência ao cisalhamento dos enrocamentos.

1.10 - Resumo e Considerações Finais

A instabilidade interna está associada à conjugação de dois fatores :

a - Falta de determinados grãos de modo que a fração grossa do solo forme uma estrutura primária que absorve quase a totalidade das tensões, de modo que a fração fina (partículas livres), fique sujeita a tensões muito pequenas ou nulas, o que facilita o seu transporte pela ação da água.

b - Os vazios da fração grossa não são suficientemente pequenos para impedir o arraste das partículas livres, ou seja, a fração grossa não é filtro da fração fina.

Quando o material apresenta uma descontinuidade (“gap”) na sua curva granulométrica e a caracterização das frações finas e grossas é clara, e a verificação da estabilidade interna, através de critérios de filtragem, conforme propõe De Mello, ou através de uma análise de carreamento, parece ser suficiente.

Por outro lado, quando a caracterização das frações finas e grossas não é clara, a aplicação conjunta dos critérios de Sherard e Kenney-Lau (para materiais com curva granulométrica com concavidade voltada para cima) é indicada. Nota-se que a realização de uma análise de carreamento para as condições mais críticas encontradas na aplicação dos critérios acima citados, é uma ferramenta poderosa para o julgamento da estabilidade interna. Ressalta-se ainda que a pesquisa experimental de Kenney-Lau, praticamente, foi desenvolvida com materiais com $CNU < 12$, o que limita a aplicação do critério para esta gama de material.

Recomenda-se que para materiais com $CNU > 10$, que dificilmente são encontrados e/ou utilizados, sejam feitos estudos especiais, incluindo ensaios de percolação.

Salienta-se que materiais heterogêneos e que possam ser internamente instáveis, não devem ser utilizados como filtros de proteção, que são elementos chaves da segurança de obras geotécnicas.

Outrossim, materiais internamente instáveis podem ocorrer nas fundações e eventualmente serem utilizados em maciços compactados (materiais-base). Nestes casos, o estudo de estabilidade interna irá definir qual a “granulometria” do material-base (partículas livres), que deve ser utilizada para o dimensionamento do filtro de proteção.

Concluindo, os estudos existentes não são suficientes para explicar todos os mecanismos que afetam a estabilidade interna de materiais granulares, e os trabalhos experimentais não cobrem toda a gama de granulometrias de materiais que são potencialmente internamente instáveis, o que mostra que este é um assunto que merece ser alvo de futuras pesquisas. A utilização de curvas granulométricas em função da área lateral (superfície específica) das partículas, conforme visto no item 4.2.7, pode ser uma diretriz interessante para a melhor compreensão deste assunto.

I.11 - Exemplo de Aplicação

Como exemplo de verificação da estabilidade interna, serão aplicados os critérios de Sherard (1982) e de Kenney-Lau (1985) para os materiais de filtro de Musso-Federico apresentados na Figura 2.3.1.

Serão verificados os materiais D, E, F, G e H que possuem teor de areia ($\% < 2,0$ mm) menor ou igual a 35% e curva granulométrica com concavidade voltada para cima, ou seja, características presentes em materiais potencialmente instáveis, conforme relata Skempton&Brogam (1994).

Na Tabela I.11.1 são apresentados os cálculos referentes ao critério de Sherard.:

TABELA I.11.1

VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE INTERNA DOS FILTROS
DE
MUSSO-FEDERICO ATRAVÉS DO CRITÉRIO DE SHERARD

FILTRO	D20/D5	D25/D10	D30/D15
H	$11.7/2.0 = 5.9$	$13.6/6.0 = 2.3$	$15.0/10.0 = 1.5$
E	$7.4/0.8 = 9.3$	$8.8/2.4 = 3.7$	$10.3/4.9 = 2.1$
G	$2.5/0.55 = 4,6$	$4.2/1.4 = 3.0$	$5.3/2.2 = 2.4$
D	$1.48/0.34 = 4.4$	$2.2/0.6 = 3.7$	$2.9/1.0 = 2.9$
F	$0.88/0.29 = 3.0$	$1.2/0.42 = 2.9$	$1.5/0.66 = 2.3$

Os resultados obtidos mostram que, com exceção do filtro F, os materiais são instáveis, uma vez que foram obtidas relações X inferiores a 4,0., no caso em pauta, seccionando a curva granulométrica no diâmetro correspondente a 5,9 % , que resulta na relação X igual a : D20/D5 .

Para confirmar esta condição, foi feita a verificação dos filtros D, E, G e H pelo critério de Kenney-Lau (1985), cujos resultados são apresentados nas Tabelas I.11.2 a I.11.5.

A falta de estabilidade interna do material H está bem caracterizada pois a relação R foi inferior a 1,0. Para os materiais D, E e G a instabilidade interna pode ocorrer pelo critério de Kenney-Lau, uma vez que os valores mínimos do índice de estabilidade $R = H/F$, foram sempre inferior a 1,30 e as relações $X(85) = D_{15g}/d_{85f}$, do critério de Sherard foram inferiores a 4,0.

Observa-se que para estes materiais o teor de areia é inferior a 24%, enquanto que o material F, considerado estável, apresenta teor de areia de 35%, que é o valor mínimo seguro do “teor de finos” para que o material apresente estabilidade interna, segundo Skempton&Brogam (1994).

Assim sendo, para a realização dos exemplos de cálculo das curvas de distribuição de vazios do Capítulo 4, não serão utilizados os filtros D, E, G e H, visto que estes materiais podem ser potencialmente instáveis.

TABELA I.11.3

**ESTABILIDADE INTERNA - FILTRO E
CRITÉRIO DE KENNEY & LAU**

D	4D	F	H	H/F
0,25	1	1	5,2	5,2
0,5	2	3,5	6,5	1,86
0,7	2,8	4,2	7,8	1,45
0,9	3,6	5,75	7,75	1,34
1	4	6,25	7,75	1,24
1,5	6	8	10,2	1,28
1,75	7	9,5	11,5	1,21
2	8	10	14	1,4

TABELA I.11.2

**ESTABILIDADE INTERNA - FILTRO H
CRITÉRIO DE KENNEY & LAU**

D	4D	F	H	H/F
0,3	1,2	1	2,75	2,75
0,4	1,6	1,75	4	1,29
0,6	2,4	2,2	2,1	0,96
0,75	3	2,75	2,25	0,82
1	4	3	4	1,33
1,5	6	4	6,5	1,63
2	8	4,5	9	2
3	12	5	15	3

TABELA I.11.5

**ESTABILIDADE INTERNA FILTRO D
CRITÉRIO DE KENNEY & LAU**

D	4D	F	H	H/F
0,4	1,6	6,5	14	2,15
0,8	3,2	13	20	1,54
1	4	15	21,5	1,43
1,3	5,2	18	24	1,33
1,5	6	20	26	1,3
1,6	6,4	21	27	1,29
1,7	6,8	22	27,5	1,25
1,8	7,2	23	30	1,3

TABELA I.11.4

**ESTABILIDADE INTERNA - FILTRO G
CRITÉRIO DE KENNEY & LAU**

D	4D	F	H	H/F
0,55	2,2	5	13,5	2,7
0,9	3,6	10	13,5	1,35
1	4	11	13	1,18
1,1	4,4	12	14	1,17
1,4	5,6	14	16,5	1,18
1,7	6,8	16	19	1,19
2	8	18	22	1,22
2,5	10	20	46,5	1,33

Anexo II - Estudo da Distribuição Granulométrica de Solos Granulares

Neste item será apresentado um estudo da variação da distribuição granulométrica em função da mesma ser considerada em função da massa(volume), área lateral(superfície específica) ou do número das partículas do solo granular.

Como a graduação do solo é muito importante neste tópico, estudou-se cinco materiais, desde um material uniforme M1 com coeficiente de não-uniformidade (CNU = D_{60}/D_{10}) igual a 2,3 , até um material muito bem graduado M5 com CNU = 30,0 , cujas curvas granulométricas em massa são apresentadas na Figura I.1 .

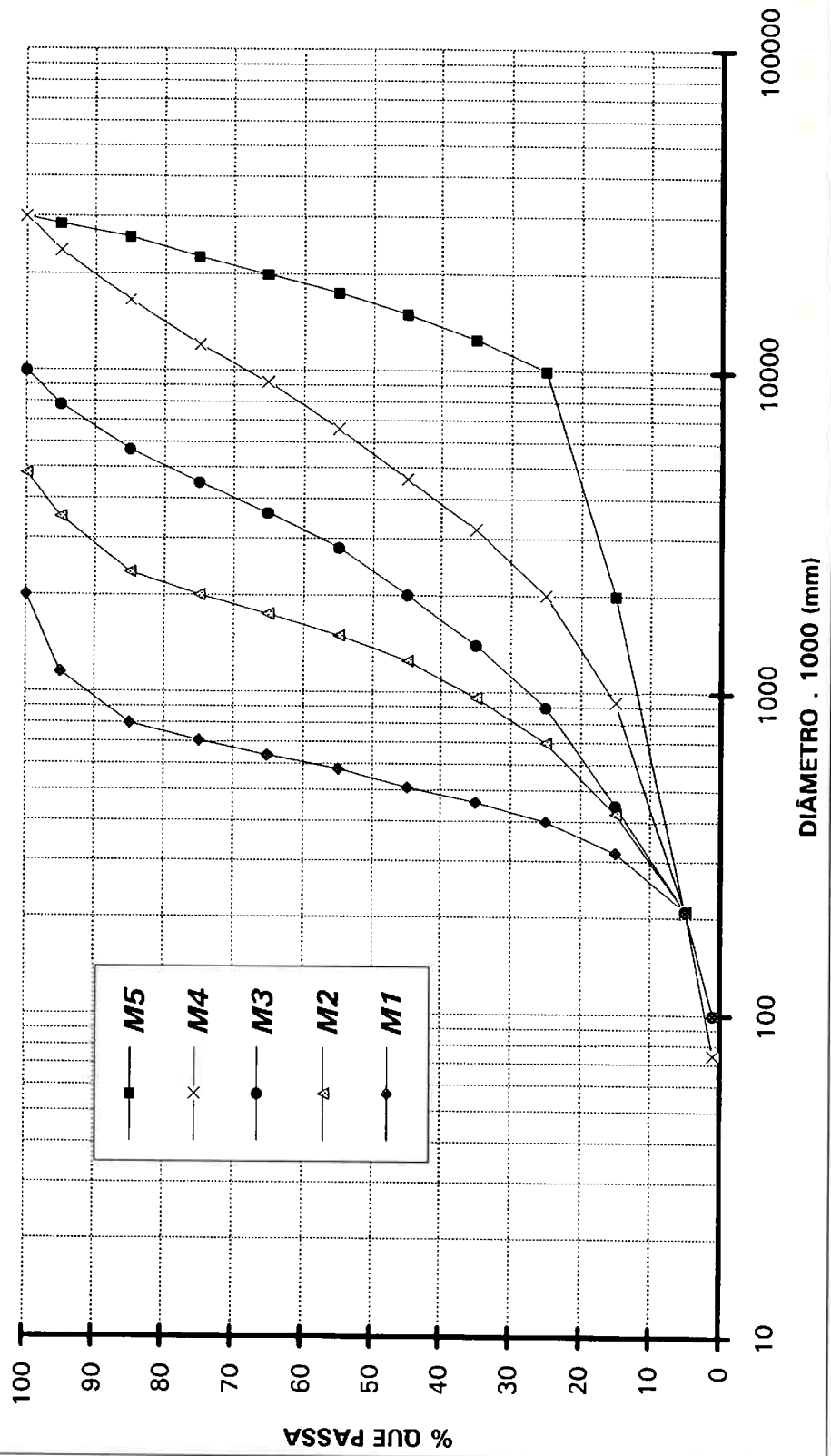
Para cada um desses materiais considerou-se um elemento de solo que possuísse a massa mínima necessária para conter um grão correspondente ao D95 em massa, conforme mostra a tabela abaixo:

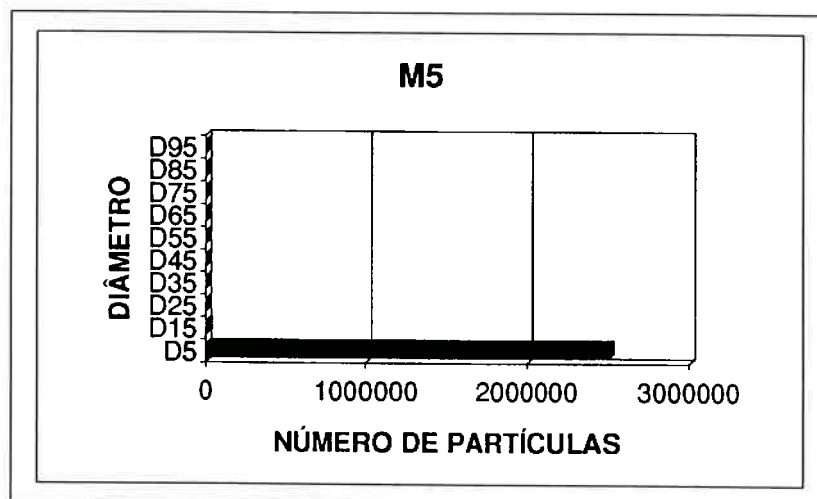
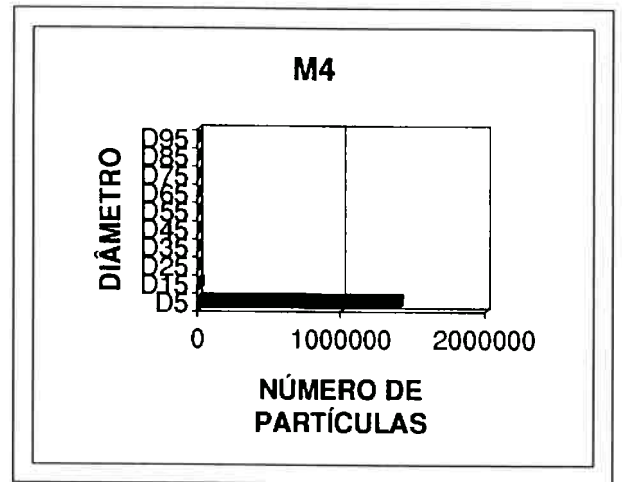
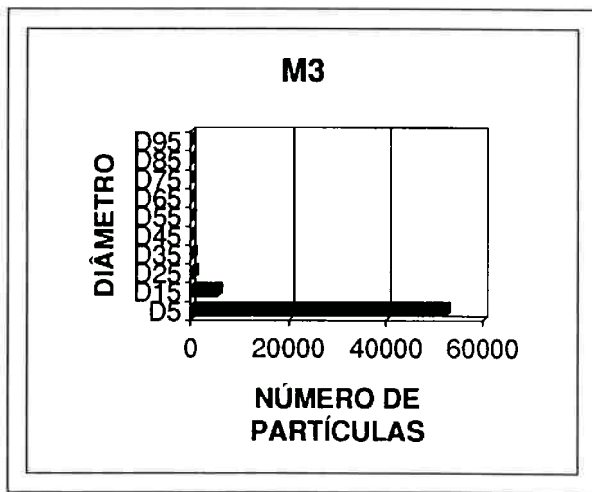
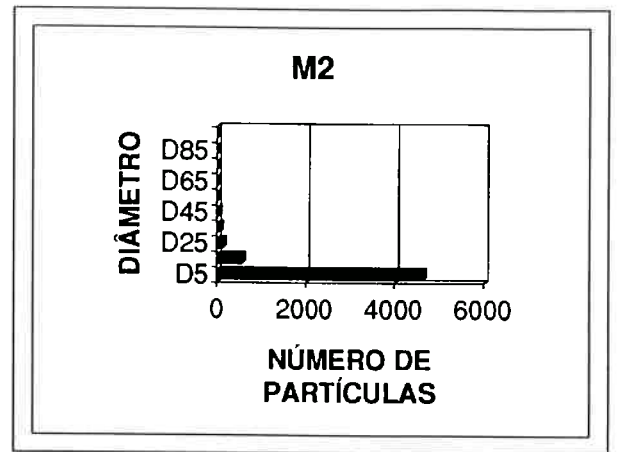
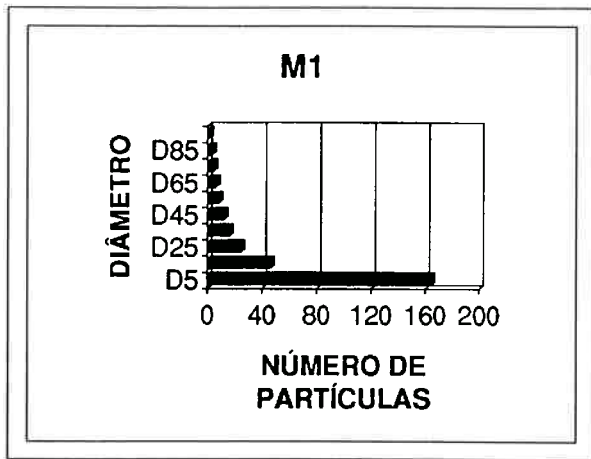
Material	M1	M2	M3	M4	M5
Massa Mínima(g)	0,021	0,22	6,71	180,1	321,2
CNU = D_{60} / D_{10}	2,3	5,3	10,0	18,8	30,0

Para estas massas calculou-se o número e a área relativa dos grãos D5, D15, D25.....D85, fixando como referência um grão D95 e área de um grão D95, respectivamente.

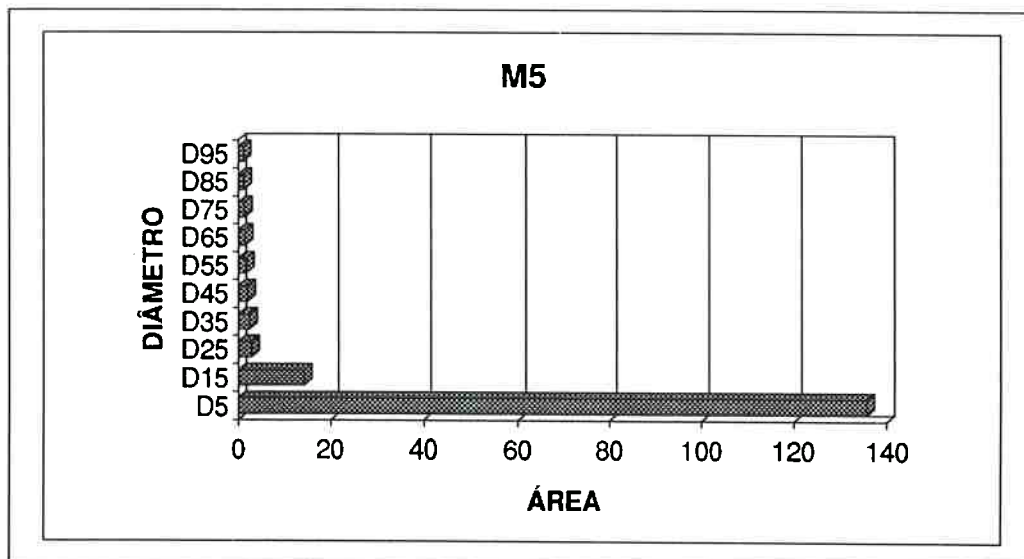
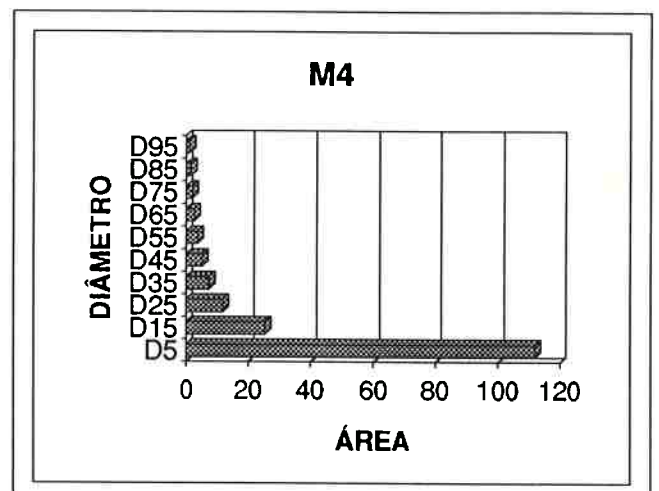
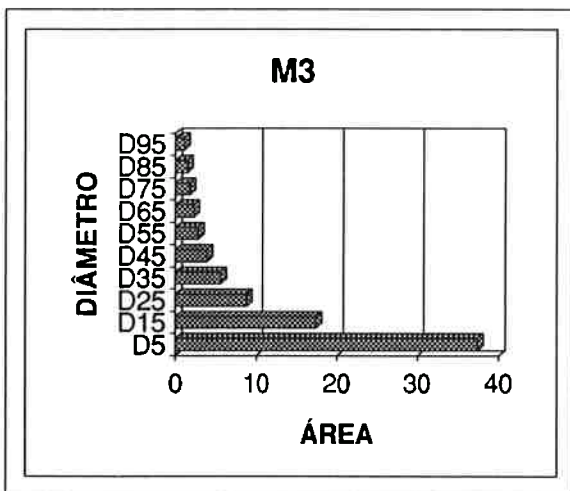
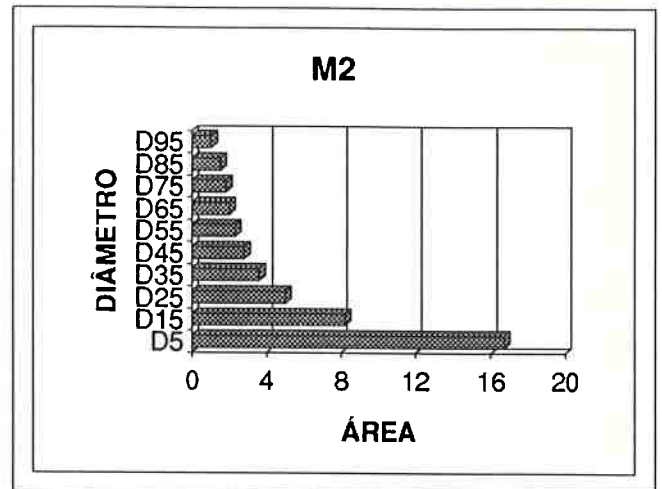
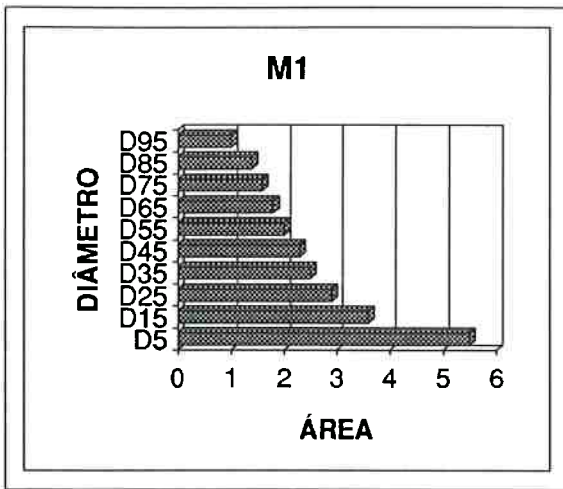
Estes resultados são apresentados a seguir em forma de diagramas de barras, que permitem uma melhor visualização dos seguintes aspectos:

FIGURA II.1 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS EM MASSA DOS MATERIAIS ESTUDADOS





FIGURAII.2 - DISTRIBUIÇÃO EM NÚMERO DE PARTÍCULAS



FIGURAI.3 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM ÁREA LATERAL

a - Ao se considerar a distribuição granulométrica em massa, os diâmetros D5, D15, 25, D35.....D95 representam a mesma proporção(10%) aproximadamente da massa total do solo.

b - Ao se considerar a distribuição granulométrica em número, a relação entre o D95 e o D5 varia de 1:164 para o M1 até 1:2.500.000 para o M5, o que mostra que quando o comportamento do solo é comandado pela distribuição numérica de suas partículas, na realidade o comportamento é dirigido pela sua fração correspondente aos $\approx 5\%$ mais finos em massa.

c - Ao se considerar a distribuição granulométrica em área lateral das partículas, a relação entre o D95 e o D5 varia de 1:5,5 para o M1 até 1:135 para o M5, e a relação entre o D95 e o D15 varia de 1:3,6 para o M1 até 1:14,2 para o M5, mostrando que quando o comportamento do solo é comandado pela distribuição em área das suas partículas, a fração correspondente aos $\approx 15\%$ mais finos é a que determina o comportamento do solo, principalmente se ele é bem graduado ($CNU > 5$). Este resultado está coerente com o estudo de filtros bem graduados apresentado anteriormente no item 4.2.5.

Tendo em vista o exposto, é muito importante caracterizar de forma precisa o modelo físico do evento a ser estudado, para que a distribuição das partículas seja levada em consideração de modo correto.

Para a determinação da distribuição dos vazios de controle de um filtro, onde estuda-se a probabilidade de se formar um agrupamento de três partículas tangentes entre si, a distribuição granulométrica deve ser considerada em termos de área lateral, conforme demonstrado no Capítulo 4 desta tese.

ANEXO III - PROGRAMA FILTRO

A seguir será apresentado um exemplo do cálculo da curva de distribuição de vazios através do Programa Filtro, para um material com a seguinte distribuição granulométrica em massa :

D5	D15	D25	D35	D45	D55	D65	D75	D85	D95
2,7	4,0	5,2	6,4	7,8	9,0	10,5	12,0	15,0	18,0

sendo os diâmetros em milímetro.

Neste exemplo será feita a análise de carregamento para um intervalo de confiança de 99,99% , para a opção de percurso unitário igual à média harmônica e cálculo do percurso (comprimento de filtragem) de 50 partículas ($d_{v,min} < D_{mb} < d_{v,max}$) gerados automaticamente.

Após a apresentação do exemplo, é fornecida a listagem do programa, desenvolvido em linguagem QBASIC para computador pessoal.

CASO: EXEMPLO DE APLICACAO DO PROGRAMA FILTRO

NIVEL DE CONFIANCA = .9999

COMPOSICAO GRANULOMETRICA EM MASSA E EM AREA DE PARTICULAS

Di(mm)	Pmi(%)	Pai(%)	Pa,acum
2.70	10.00	24.54	24.54
4.00	10.00	16.57	41.11
5.20	10.00	12.74	53.85
6.40	10.00	10.35	64.21
7.80	10.00	8.50	72.70
9.00	10.00	7.36	80.07
10.50	10.00	6.31	86.38
12.00	10.00	5.52	91.90
15.00	10.00	4.42	96.32
18.00	10.00	3.68	100.00

CURVA DE VAZIOS EM PERCENTAGEM DE AREA

I	Dvi	Pvi(%)	Pvi-acum(%)
1	0.418	1.478	1.478
2	0.470	2.994	4.472
3	0.502	2.303	6.775
4	0.526	1.871	8.646
5	0.536	2.021	10.667
6	0.546	1.535	12.203
7	0.559	1.331	13.533
8	0.572	1.141	14.674
9	0.577	3.109	17.783
10	0.583	0.998	18.781
11	0.598	0.798	19.579
12	0.607	2.526	22.105
13	0.609	0.665	22.771
14	0.619	0.455	23.225
15	0.624	1.196	24.421
16	0.634	2.073	26.494
17	0.651	1.796	28.290
18	0.659	1.943	30.233
19	0.669	1.540	31.773
20	0.672	1.049	32.822
21	0.683	1.347	34.169
22	0.691	1.594	35.764
23	0.699	0.789	36.553
24	0.705	1.078	37.631
25	0.711	0.853	38.483
26	0.712	1.382	39.865
27	0.720	0.898	40.763
28	0.733	1.184	41.948
29	0.733	0.807	42.755
30	0.734	1.295	44.050
31	0.746	0.700	44.750
32	0.750	1.036	45.786
33	0.758	1.123	46.909
34	0.770	0.606	47.515

35	0.773	0.531	48.047
36	0.776	0.829	48.876
37	0.779	1.312	50.187
38	0.782	0.962	51.150
39	0.794	0.520	51.669
40	0.795	0.691	52.360
41	0.799	0.921	53.281
42	0.801	0.842	54.123
43	0.804	0.207	54.330
44	0.814	0.455	54.785
45	0.821	1.076	55.861
46	0.826	0.790	56.651
47	0.828	0.399	57.050
48	0.831	0.674	57.724
49	0.831	0.533	58.257
50	0.843	0.364	58.620
51	0.848	0.691	59.311
52	0.850	0.933	60.244
53	0.853	0.561	60.805
54	0.857	0.684	61.490
55	0.859	0.504	61.994
56	0.865	0.303	62.297
57	0.879	0.874	63.172
58	0.879	0.799	63.971
59	0.881	0.599	64.570
60	0.882	0.553	65.123
61	0.889	0.293	65.416
62	0.902	0.700	66.115
63	0.907	0.461	66.576
64	0.909	0.414	66.990
65	0.911	0.758	67.748
66	0.915	0.513	68.261
67	0.918	0.479	68.740
68	0.921	0.410	69.150
69	0.931	0.359	69.509
70	0.938	0.560	70.068
71	0.942	0.225	70.293
72	0.943	0.359	70.651
73	0.944	0.650	71.301
74	0.945	0.399	71.700
75	0.955	0.411	72.111
76	0.964	0.466	72.577
77	0.967	0.622	73.199
78	0.971	0.568	73.767
79	0.977	0.673	74.440
80	0.978	0.307	74.747
81	0.985	0.342	75.090
82	0.985	0.359	75.449
83	0.990	0.111	75.560
84	1.005	0.533	76.093
85	1.007	0.269	76.362
86	1.007	0.269	76.631
87	1.013	0.455	77.086
88	1.016	0.583	77.669
89	1.017	0.299	77.968
90	1.033	0.144	78.112
91	1.035	0.466	78.578
92	1.040	0.276	78.854
93	1.043	0.379	79.233
94	1.047	0.462	79.695
95	1.051	0.215	79.910
96	1.054	0.273	80.184
97	1.056	0.500	80.683
98	1.069	0.240	80.923
99	1.080	0.404	81.327
100	1.083	0.373	81.700

101	1.083	0.179	81.880
102	1.084	0.478	82.358
103	1.089	0.437	82.795
104	1.091	0.198	82.993
105	1.099	0.237	83.230
106	1.108	0.100	83.330
107	1.118	0.311	83.640
108	1.126	0.224	83.865
109	1.127	0.346	84.211
110	1.129	0.410	84.621
111	1.131	0.207	84.828
112	1.132	0.323	85.152
113	1.140	0.350	85.501
114	1.145	0.203	85.704
115	1.166	0.152	85.856
116	1.167	0.359	86.215
117	1.171	0.269	86.484
118	1.176	0.389	86.873
119	1.178	0.291	87.164
120	1.181	0.355	87.520
121	1.183	0.178	87.697
122	1.184	0.277	87.974
123	1.207	0.061	88.036
124	1.221	0.311	88.347
125	1.225	0.287	88.634
126	1.226	0.231	88.865
127	1.227	0.243	89.107
128	1.229	0.333	89.440
129	1.231	0.168	89.609
130	1.234	0.152	89.761
131	1.243	0.142	89.903
132	1.264	0.159	90.062
133	1.269	0.239	90.302
134	1.272	0.291	90.593
135	1.273	0.202	90.795
136	1.279	0.266	91.062
137	1.285	0.249	91.310
138	1.287	0.118	91.429
139	1.288	0.289	91.717
140	1.295	0.097	91.814
141	1.323	0.137	91.951
142	1.325	0.138	92.089
143	1.326	0.117	92.206
144	1.333	0.207	92.413
145	1.335	0.253	92.666
146	1.340	0.233	92.899
147	1.347	0.162	93.061
148	1.349	0.213	93.274
149	1.350	0.124	93.397
150	1.372	0.120	93.517
151	1.390	0.237	93.754
152	1.392	0.194	93.948
153	1.392	0.040	93.988
154	1.402	0.178	94.166
155	1.402	0.217	94.382
156	1.402	0.187	94.569
157	1.404	0.067	94.636
158	1.410	0.202	94.838
159	1.444	0.207	95.046
160	1.451	0.096	95.141
161	1.457	0.095	95.236
162	1.459	0.155	95.391
163	1.461	0.102	95.493
164	1.463	0.103	95.596
165	1.467	0.168	95.764
166	1.484	0.173	95.937

167	1.487	0.075	96.012
168	1.510	0.080	96.092
169	1.520	0.178	96.269
170	1.522	0.090	96.359
171	1.530	0.166	96.525
172	1.540	0.088	96.613
173	1.546	0.152	96.764
174	1.546	0.144	96.909
175	1.552	0.124	97.033
176	1.584	0.078	97.111
177	1.595	0.138	97.249
178	1.605	0.154	97.403
179	1.614	0.126	97.529
180	1.614	0.142	97.671
181	1.617	0.072	97.743
182	1.623	0.052	97.795
183	1.624	0.025	97.820
184	1.646	0.061	97.881
185	1.675	0.067	97.948
186	1.686	0.124	98.073
187	1.687	0.118	98.191
188	1.689	0.060	98.251
189	1.696	0.066	98.317
190	1.709	0.123	98.440
191	1.723	0.101	98.541
192	1.765	0.104	98.645
193	1.773	0.058	98.702
194	1.788	0.108	98.810
195	1.789	0.103	98.913
196	1.802	0.050	98.963
197	1.807	0.042	99.005
198	1.811	0.053	99.057
199	1.856	0.017	99.074
200	1.875	0.090	99.164
201	1.891	0.083	99.247
202	1.898	0.092	99.339
203	1.900	0.044	99.383
204	1.916	0.043	99.427
205	1.990	0.035	99.461
206	1.992	0.040	99.502
207	1.994	0.077	99.578
208	2.015	0.072	99.650
209	2.039	0.037	99.687
210	2.097	0.034	99.721
211	2.125	0.030	99.751
212	2.145	0.032	99.783
213	2.150	0.062	99.845
214	2.266	0.054	99.899
215	2.272	0.026	99.924
216	2.321	0.009	99.933
217	2.400	0.022	99.955
218	2.459	0.022	99.977
219	2.613	0.018	99.995
220	2.785	0.005	100.000

PERCURSO UNITARIO / CASO- 1

TABELA DE INTERPOLACAO PARA CALCULO DO COMPRIMENTO DE FILTRAGEM

Dmbi (mm)	Pvi (%)
0.465	4.170
0.512	7.514
0.558	13.431

0.604	21.364
0.651	28.255
0.697	36.453
0.744	44.620
0.791	51.511
0.837	58.429
0.884	65.179
0.930	69.471
0.977	74.379
1.023	78.018
1.069	80.930
1.116	83.576
1.163	85.831
1.209	88.085
1.256	90.000
1.302	91.848
1.349	93.245
1.395	94.039
1.442	95.029
1.488	96.016
1.535	96.564
1.581	97.104
1.628	97.829
1.674	97.945
1.720	98.524
1.767	98.661
1.814	99.058
1.860	99.092
1.907	99.402
1.953	99.444
2.000	99.596
2.046	99.691
2.092	99.718
2.139	99.773
2.186	99.861
2.232	99.883
2.279	99.926
2.325	99.934
2.372	99.947
2.418	99.962
2.464	99.978
2.511	99.983
2.558	99.988
2.604	99.994
2.651	99.996
2.697	99.997
2.743	99.999

NUMERO DE CONFRONTOS PARA INTERVALO DE CONFIANCA = .9999

Dmb(mm)	n
0.465	217
0.512	118
0.558	64
0.604	39
0.651	28
0.697	21
0.744	16
0.791	13
0.837	11
0.884	9
0.930	8
0.977	7

1.023	7	1.069	36.83
1.069	6	1.116	33.79
1.116	6	1.163	31.23
1.163	5	1.209	28.69
1.209	5	1.256	26.51
1.256	4	1.302	24.35
1.302	4	1.349	22.65
1.349	4	1.395	21.64
1.395	4	1.442	20.33
1.442	4	1.488	18.94
1.488	3	1.535	18.11
1.535	3	1.581	17.23
1.581	3	1.628	15.94
1.628	3	1.674	15.71
1.674	3	1.720	14.48
1.720	3	1.767	14.15
1.767	3	1.814	13.08
1.814	2	1.860	12.98
1.860	2	1.907	11.92
1.907	2	1.953	11.76
1.953	2	2.000	11.07
2.000	2	2.046	10.56
2.046	2	2.092	10.39
2.092	2	2.139	10.02
2.139	2	2.186	9.27
2.186	2	2.232	9.04
2.232	2	2.279	8.47
2.279	2	2.325	8.33
2.325	2	2.372	8.08
2.372	2	2.418	7.75
2.418	2	2.464	7.26
2.464	2	2.511	7.03
2.511	2	2.558	6.73
2.558	2	2.604	6.29
2.604	1	2.651	6.02
2.651	1	2.697	5.78
2.697	1	2.743	5.40
2.743	1		

COMPRIMENTO DO PERCURSO s POR CONFRONTO

s = MEDIA HARMONICA

s = 6.62 (mm)

VALORES DOS COMPRIMENTOS DE FILTRAGEM:

Dmb(mm)	S (mm)
0.465	1432.76
0.512	781.40
0.558	423.18
0.604	253.94
0.651	183.81
0.697	134.62
0.744	103.28
0.791	84.32
0.837	69.53
0.884	57.85
0.930	51.44
0.977	44.82
1.023	40.29

```

REM          PROGRAMA    FILTRO
REM          DESENVOLVIDO  POR    CIRO HUMES
REM          COMO PARTE INTEGRANTE DA TESE DE DOUTORAMENTO :
REM          CONSIDERACOES SOBRE A DETERMINACAO DA DISTRIBUICAO
REM          DE VAZIOS DE FILTROS DE PROTECAO DE OBRAS GEOTECNICAS
REM          APRESENTADA A ESCOLA POLITECNICA DA USP EM 1995

```

```

REM          TECLE F5 PARA INICIAR O PROCESSAMENTO
REM          -----

```

```

REM          DISTRIBUICAO EM FUNCAO DA AREA DAS PARTICULAS

```

```

CLS
REM
REM  PRINT "          ##  PROGRAMA    FILTRO    ##  "
GOSUB 5000
REM SUB-5000 =  DIMENSIONAMENTO MATRIZES E CONSTANTES
4000 GOSUB 5010
REM SUB-5010 =  ENTRADA DE DADOS

```

```

5000 REM DIMENSIONAMENTO DAS MATRIZES E DAS CONSTANTES

```

```

DIM S1(10, 2), V(220, 4), S2(10, 2), NS2(10, 2)
DIM P1(220), P2(220), P3(220)
DIM T1(50), T2(50), M1(50), M2(50, 2)
DIM S2ACUM(10)

```

```

REM CONSTANTES DE CALCULO

```

```

CS = 1
PI = 4 * ATN(1)
NO = .3
X1 = 10
RETURN 4000

```

```

REM ++++++

```

```

5010 PRINT : PRINT
REM ENTRADA DOS DADOS
PRINT "FORNECA O TITULO DO ESTUDO"
INPUT B$

```

```

PRINT : PRINT
380 PRINT "FORNECA O NUMERO N DE DIAMETROS USADOS PARA"
PRINT "DISCRETIZAR A CURVA GRANULOMETRICA DO FILTRO"
PRINT "N<=10 E "
PRINT "O INTERVALO DE CONFIANCA Po , 0 <= Po <= 1 "
INPUT N, PO

REM CONTROLE DO NUMERO DE DIAMETROS E DO INTERV. DE CONFIANCA
IF N > 10 GOTO 380
IF PO > 1 GOTO 380
REM INTRODUCAO DOS DADOS DE GRANULOMETRIA
PRINT "FORNECA OS "; N; " PARES DE VALORES Di(mm) , PERCENTAGEM EM PESO (%)"
PRINT "COM OS VALORES EM ORDEM CRESCENTE DE DIAMETROS"
FOR I = 1 TO N
PRINT "PAR "; I
INPUT S1(I, 1), S1(I, 2)
NEXT I
PRINT
560 PRINT "HOUE ALGUM ERRO NA ENTRADA DE DADOS ? S / N"
INPUT W$
IF W$ = "N" THEN GOTO 620
PRINT "INTRODUZA OS VALORES I , Di , Pmi "
INPUT I, S1(I, 1), S1(I, 2)
GOTO 560
620 PRINT
RETURN 5020

```

```

REM ++++++

```

```

5020 PRINT "CALCULO DA DISTRIBUICAO EM AREA DE PARTICULAS "

```

```

Z = 0
FOR I = 1 TO N
S2(I, 2) = (1 - NO) * 6 * S1(I, 2) / S1(I, 1)
NS2(I, 2) = (1 - NO) * 6 * S1(I, 2) / (PI * S1(I, 1) ^ 3)

```

```

NZ = NZ + NS2(I, 2)
Z = Z + S2(I, 2)
REM S2ACUM(I) = Z
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO N
S2(I, 2) = (S2(I, 2) / Z) * 100
IF I = 1 THEN GOTO 99
IF I > 1 THEN GOTO 998
99 W = 0
GOTO 999
998 W = W + S2(I - 1, 2)
999 S2ACUM(I) = W + S2(I, 2)
NS2(I, 2) = (NS2(I, 2) / NZ) * 100
S2(I, 1) = S1(I, 1)
NEXT I

```

```

IF N = 10 GOTO 5030
DF = 10 - N
FOR I = N + 1 TO (DF + N)
S2(I, 1) = S2((I - 1), 1) + 1
NEXT I

```

```

5030 REM CALCULO DO DIAMETRO DO VAZIO
PRINT "CALCULO DO DIAMETRO DOS VAZIOS / DISTR. EM AREA"

```

```

PRINT
970 FOR I = 1 TO X1
980 FOR J = I TO X1
990 FOR K = J TO X1
R1 = S2(I, 1) / 2
R2 = S2(J, 1) / 2
R3 = S2(K, 1) / 2
T1 = 1 / R1
T2 = 1 / R2
T3 = 1 / R3
P9 = T1 + T2 + T3 + 2 * SQR(T1 * T2 + T1 * T3 + T2 * T3)

```

```

I1 = I1 + 1
V(I1, 1) = 2 / P9
V(I1, 2) = S2(I, 1)
V(I1, 3) = S2(J, 1)
V(I1, 4) = S2(K, 1)
NEXT K
NEXT J
NEXT I

```

```

REM ++++++

```

```

REM FORMACAO DA MATRIZ DE VAZIOS
PRINT "FORMACAO DA MATRIZ DE VAZIOS"

```

```

PRINT
A1 = 0
FOR I = 1 TO N
IF S2(I, 1) > A1 THEN GOTO 1520
1520 A1 = S2(I, 1)
1530 NEXT I
N9 = 0
FOR I = 1 TO 220
IF V(I, 2) > A1 OR V(I, 3) > A1 OR V(I, 4) > A1 THEN GOTO 1590
N9 = N9 + 1
GOTO 1630
1590 V(I, 1) = 0
V(I, 2) = 0
V(I, 3) = 0
V(I, 4) = 0
1630 NEXT I

```

```

REM ++++++

```

```

5040 PRINT "CALCULO DAS PERCENTAGENS DE VAZIOS"

```

```

PRINT
FOR I = 1 TO 220
IF V(I, 1) = 0 THEN GOTO 1970
A1 = V(I, 2)
B1 = V(I, 3)
C1 = V(I, 4)
FOR J = 1 TO N
IF S2(J, 1) = A1 THEN GOTO 1770
GOTO 1780
1770 A2 = S2(J, 2) / 100
1780 IF S2(J, 1) = B1 THEN GOTO 1800
1790 GOTO 1810

```

```

1800 B2 = S2(J, 2) / 100
1810 IF S2(J, 1) = C1 THEN GOTO 1830
1820 GOTO 1840
1830 C2 = S2(J, 2) / 100
1840 NEXT J
1850 IF A1 = B1 AND B1 = C1 THEN GOTO 1870
1860 GOTO 1880
1870 P2(I) = A2 ^ 3
1880 IF A1 = B1 AND B1 <> C1 THEN GOTO 1900
1890 GOTO 1910
1900 P2(I) = 3 * A2 ^ 2 * C2
1910 IF A1 <> B1 AND B1 = C1 THEN GOTO 1930
1920 GOTO 1940
1930 P2(I) = 3 * A2 * C2 ^ 2
1940 IF A1 <> B1 AND B1 <> C1 AND A1 <> C1 THEN GOTO 1960
1950 GOTO 1970
1960 P2(I) = 6 * A2 * B2 * C2
1970 NEXT I

```

```

REM ++++++

```

```

1980 REM
1990 REM REORGANIZACAO DA MATRIZ
PRINT "REORGANIZACAO DA MATRIZ DE VAZIOS"
2020 PRINT
2030 x = 0
FOR K = 1 TO N9
FOR I = 1 + x TO 220
P1(I) = V(I, 1)
IF V(I, 1) = 0 THEN GOTO 2090
2080 GOTO 2100
2090 NEXT I
2100 P3(K) = P2(I)
2110 x = I
2120 NEXT K
2130 REM REDUCAO DA MATRIZ
REM
PRINT "REDUCAO DA MATRIZ"
PRINT
x = 0
FOR K = 1 TO N9
FOR I = x + 1 TO 220
IF V(I, 1) = 0 THEN GOTO 2230
GOTO 2240
2230 NEXT I
2240 P1(K) = V(I, 1)
2250 x = I
2260 NEXT K

```

```

REM ++++++

```

```

2270 REM
REM REORDENACAO DA MATRIZ
PRINT "REORDENACAO DA MATRIZ"

```

```

PRINT
FOR K = 1 TO N9
L1 = 3000
2330 FOR I = K TO N9
2340 IF P1(I) > L1 THEN GOTO 2410
2350 L1 = P1(I)

```

```

2360 L3 = P3(I)
2370 P1(I) = P1(K)
2380 P3(I) = P3(K)
2390 P1(K) = L1
2400 P3(K) = L3
2410 NEXT I
2420 NEXT K

REM ++++++

5050 REM DETERMINACAO DA FREQUENCIA ACUMULADA DOS DIAMETROS DOS VAZIOS
2450 REM
2460 PRINT "DETERM. DA FREQUENCIA ACUMULADA DOS DIAM. DOS VAZIOS'"
2470 PRINT
2480 Z = 0
2490 FOR I = 1 TO N9
2500 Z = Z + P3(I) * 100
2510 V(I, 2) = Z
REM LPRINT "V(I,2) = ", I, V(I, 2)
2520 NEXT I

REM ++++++

PRINT "CALCULO DO PERCURSO UNITARIO POR CONFRONTO ( s )"
111111 PRINT
FOR G = 1 TO 10000
NEXT G

5060 PRINT
PRINT : PRINT
PRINT " ESCOLHA O TIPO DE ANALISE :"
PRINT " s = N para s = MEDIA NUMERICA DAS PARTICULAS"
PRINT " s = H para s = MEDIA HARMONICA "
PRINT " s = D para s = VALOR QUE SERA FORNECIDO EM SEGUIDA ,POR EXEMPLO"
PRINT "          D50 ( segundo Araken Silveira )"
PRINT
PRINT " s = F para FINALIZAR"
INPUT S$
IF S$ = "N" THEN GOTO 5061
IF S$ = "H" THEN GOTO 5062
IF S$ = "D" THEN GOTO 5066
IF S$ = "F" THEN GOTO 4080

PRINT
5066 PRINT "FORNECA O VALOR DE s"
PRINT
5067 INPUT Q3
GOTO 5070

5061 REM DETERMINACAO DO PERCURSO MEDIO s= MEDIA NUMERICA

PRINT "CALCULO DO PERCURSO MEDIO POR CONFRONTO"
PRINT

```

```

Q3 = 0
FOR I = 1 TO N
Q3 = Q3 + S1(I, 1) * NS2(I, 2) / 100
NEXT I
GOTO 5070

```

```

5062 PRINT "CALCULO DO PERCURSO MEDIO POR CONFRONTO s = MEDIA HARMONICA = NA/NV"
5063 PRINT "SEGUNDO WITTMANN"
PRINT

```

```

H3 = 0
FOR I = 1 TO N
H3 = H3 + S1(I, 2) / S1(I, 1)
NEXT I
Q3 = 100 / H3
GOTO 5070

```

```

REM ++++++

```

```

5070 REM ANALISE DE CARREAMENTO
CLS

```

```

PRINT "ANALISE DE CARREAMENTO"
FOR G = 1 TO 10000
NEXT G

```

```

PRINT : PRINT : PRINT
PRINT "DIGITE N para UMA ANALISE NOVA "
PRINT "DIGITE R para REAPROVEITAR DADOS DO MATERIAL-BASE "
PRINT
INPUT x$

```

```

IF x$ = "R" THEN GOTO 2880

```

```

PRINT
PRINT "FORNECA O NUMERO DE PARTICULAS PARA AS QUAIS SERAO"
PRINT "CALCULADOS O NUMERO DE CONFRONTOS NECESSARIOS PARA"
PRINT "A CONTENCAO DAS MESMAS NO INTERIOR DO FILTRO"
PRINT

```

```

2720 INPUT N3

```

```

PRINT

```

```

PRINT "QUER GERACAO AUTOMATICA DOS DIAMETROS ? S/N"

```

```

INPUT G$

```

```

IF G$ = "N" THEN GOTO 333

```

```

IF G$ = "S" THEN GOTO 3333

```

```

3333 FOR I = 1 TO N3

```

```

DELTA = (.155 * (S1(N, 1) - S1(1, 1))) / (N3 + 1)

```

```

T1(I) = .155 * S1(1, 1) + (I * DELTA)

```

```

NEXT I

```

```

GOTO 2880

```

```

333 PRINT "FORNECA EM ORDEM CRESCENTE OS VALORES DOS DIAMETROS DO MATERIAL-BASE"

```

```

PRINT "COM VALORES : "; .155 * S1(1, 1); " < Dmb < "; .155 * S1(N, 1)

```

```

PRINT

```

```

FOR I = 1 TO N3

```

```

PRINT "VALOR DO DIAMETRO - Dmb= "; I

```

```

INPUT T1(I)

```

```

NEXT I

```

```

PRINT : PRINT

```

```

2820 PRINT "FORNECEU ALGUM DADO ERRADO S/N"

```

```

INPUT L$

```

```

IF L$ = "N" THEN GOTO 2880
PRINT "CORRIJA I,Dmb("; I; ")
INPUT I, T1(I)
GOTO 2820
2880 PRINT
REM INTERPOLACAO NA CURVA DE VAZIOS
PRINT "CALCULO DA FREQUENCIA DO VAZIO - Dv = Dmb"
PRINT
FOR J = 1 TO N9
V(J, 2) = V(J, 2) / 100
NEXT J
FOR I = 1 TO N3
FOR J = 1 TO N9
IF T1(I) = V(J, 1) THEN GOTO 3000
2990 GOTO 3010
3000 T2(I) = V(J, 2)
3010 NEXT J
3020 NEXT I
3030 FOR I = 1 TO N3
3040 FOR J = 2 TO N9
3050 IF P1(J - 1) <= T1(I) AND T1(I) < P1(J) THEN GOTO 3070
3060 GOTO 3090
3070 T2(I) = (V(J, 2) - V(J - 1, 2)) / (P1(J) - P1(J - 1)) * (T1(I) - P1(J - 1)) +
3080 GOTO 3100
3090 NEXT J
3100 NEXT I

```

```

REM CALCULO DO NUMERO DE CONFRONTOS
PRINT
PRINT "CALCULO DO NUMERO DE CONFRONTOS"
PRINT
FOR I = 1 TO N3
IF T2(I) = 1 OR T2(I) > 1 THEN GOTO 3160
M1(I) = LOG(1 - PO) / LOG(1 - T2(I))
3160 NEXT I
3170 REM CALCULO DO COMPRIMENTO DE FILTRAGEM
PRINT "CALCULO DO COMPRIMENTO DE FILTRAGEM ( PERCURSO)"
PRINT
FOR I = 1 TO N3
M2(I, 2) = Q3 * M1(I)
NEXT I
FOR G = 1 TO 10000
NEXT G
PRINT
REM ++++++
5080 REM IMPRESSAO
CLS
PRINT
IF CS > 1 THEN GOTO 222
PRINT " IMPRESSAO"
PRINT
LPRINT " ### PROGRAMA FILTRO - RESULTADOS OBTIDOS ###"
LPRINT :
LPRINT :
LPRINT " CASO:", B$
LPRINT :
LPRINT :
LPRINT " NIVEL DE CONFIANCA = ", PO

```

```

LPRINT :

```



```

LPRINT :
LPRINT " COMPOSICAO GRANULOMETRICA EM MASSA E EM AREA DE PARTICULAS"
LPRINT :
LPRINT :
LPRINT :
LPRINT " Di(mm)      Pmi(%)   Pai(%)   Pa,acum"
LPRINT :
FOR I = 1 TO N
LPRINT USING "###.##      ###.##   ###.##   ###.##"; S1(I, 1); S1(I, 2); S2(I, 2);
NEXT I
LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT "CURVA DE VAZIOS EM PERCENTAGEM DE AREA"
LPRINT " CURVA DE VAZIOS EM PERCENTAGEM DE AREA"
LPRINT
LPRINT " I          Dvi          Pvi(%)          Pvi-acum(%) "
LPRINT
FOR I = 1 TO N9
LPRINT USING "###      ###.###      ###.###      ###.###      ###.###"; I; P1(I);
NEXT I
222 LPRINT : LPRINT : LPRINT
LPRINT "IMPRESSAO DA TABELA DE INTERPOLACAO PARA CALCULO DO COMPR. DE FILTRAGEM"
LPRINT "PERCURSO UNITARIO / CASO-"; CS
LPRINT

LPRINT " TABELA DE INTERPOLACAO PARA CALCULO DO COMPRIMENTO DE FILTRAGEM "
LPRINT
LPRINT " Dmbi(mm)      Pvi(%) "
LPRINT
FOR I = 1 TO N3
LPRINT USING "###.###      ###.###"; T1(I); T2(I) * 100
NEXT I
LPRINT
LPRINT "TABELA RELATIVA AO NUMERO DE CONFRONTOS"
LPRINT
LPRINT : LPRINT
LPRINT " NUMERO DE CONFRONTOS PARA INTERVALO DE CONFIANCA = "; PO
LPRINT
LPRINT " Dmb(mm)      n"
LPRINT
FOR I = 1 TO N3
LPRINT USING "###.###      ###"; T1(I); INT(M1(I) + 1)
NEXT I
LPRINT : LPRINT : LPRINT
LPRINT " COMPRIMENTO DO PERCURSO s POR CONFRONTO"
LPRINT
IF S$ = "N" THEN LPRINT " s = MEDIA NUMERICA"
IF S$ = "H" THEN LPRINT " s = MEDIA HARMONICA"
IF S$ = "D" THEN LPRINT " s = VALOR FORNECIDO"
LPRINT
LPRINT " s= "; (INT(Q3 * 100)) / 100; "(mm)"
LPRINT : LPRINT
REM IMPRESSAO DOS COMPRIMENTOS DE FILTRAGEM S
LPRINT
LPRINT "VALORES DOS COMPRIMENTOS DE FILTRAGEM:"
FOR G = 1 TO 10000
NEXT G
LPRINT
LPRINT
LPRINT "VALORES DOS COMPRIMENTOS DE FILTRAGEM:"
LPRINT
LPRINT " Dmb(mm)      S (mm) "

```

```

LPRINT
FOR I = 1 TO N3
LPRINT USING "###.###      ###.##"; T1(I); M2(I, 2)
NEXT I
LPRINT
LPRINT
CLS
PRINT "          AGUARDE A IMPRESSAO "
FOR G = 1 TO 10000
NEXT G

LPRINT
LPRINT "*****"
LPRINT
LPRINT
FOR G = 1 TO 1000
NEXT G
PRINT

Z = 0
FOR I = 1 TO N9
Z = Z + P3(I) * 100
V(I, 2) = Z
NEXT I
CS = CS + 1

GOTO 111111

4080 CLS
PRINT : PRINT : PRINT :
PRINT "          FIM DO PROGRAMA "
PRINT :
PRINT "*****"

```

BIBLIOGRAFIA

ABERG,B.(1992a) - Void ratio of noncohesive soils and similar materials. JGE-ASCE, 118, 9, 1315-1333

_____ (1992b) -Hydraulic conductivity of non-cohesive soils. JGE-ASCE, 118, 9, 1335-1347

_____ (1993) -Washout of grains from filtered sand and gravel materials. JGE-ASCE, 119, 1, 36-53

BERTRAM, G.E. (1940) - An experimental investigation of protective filters. Publ. n° 267 Harvard Series, 21p

BOCHKOV,N.M.(1936) - Mekhanicheskaya suffozia grunta, Onti, URSS in: Lubochkov(1969)

DAVIDENKOFF, R. (1955) - De la composition des filtres dans barragens en terre. 5th ICOLD Congress, Paris, 1 : 385-390

De MELLO, V. F. B. de (1975) - Some lessons from unsuspected, real, and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil. 6th African CSMFE, Durban, 2: 285-302

_____ (1977) - 17th Rankine Lecture: Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams. Geotechnique, 27(3): 279-355

_____ (1979) - Discussão do tema Elementos de vedação diferentes de núcleos argilosos barragens de terra e enrocamento. XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz de Iguacu , 4 : 99-103

FEDERICO,F. (1988) - Proporzionamento dei filtri di protezione dede dighe di terra :.In Manuale di Ingegneria Civile, Roma, Edizioni Scientifiche/A. Cremonese 460-500

FOLQUE, J. (1977) - Erosão interna em solos coesivos. Filtros de Proteção. Geotecnia, 20: 35-50, junho - julho

HONJO .Y & VENEZIANO,D. (1989) - Improved filter criteria for cohesionless. JGE-ASCE, 115, nº 1, 75-93

HUMES, C. (1985) - Porosimetria de filtros de proteção. Uma análise de critérios de filtro para materiais granulares. Dissertação de Mestrados - EPUSP - 340p

_____ (1986a) - Uma metodologia para a análise de filtros baseada na porosimetria. VIII COBRAMSEF, Porto Alegre, II : 65-74

_____ (1986b) - Estudo das porosimetrias das transições da barragem Pedra do Cavalo. VIII COBRAMSEF, Porto Alegre, II : 41:53

ISTOMINA, V.S.(1957) - Filtratsionnay ustoychivost ' gruntov', Gosergeizdat,URSS, In . Tsutyia(1987)

KARPOFF, G. P. (1955) - The use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters . Proc. ASTM. 55 : 1183-1198

KASSIF, G. et al (1965) - Analysis of filters requirements for compacted clays. 6th ICSMEF, Montreal, 2:495-500

KENNEY, T.C. & LAU, D. (1984) - Stability of particle grading of compacted granular filters. Dept. of Civil Eng. ,Univ.Toronto, 23p In:Tsutyia(1987)

_____ (1985) - Internal stability of granular filters. Can. Geotech. J. 22, 215-225

KENNEY, T.C ET AL(1985) - Controlling constriction size of granular filters - Can. Geotech J. 22, 32-43

KENNEY, T.C. & LAU, D. (1986) -Discussão de Internal stability of granular filters. Can. Geotech. J. ,23, 420-423

KESDI, A. (1968) - Distribution of grains and voids according to their volumes. 3rd Budapest CSMFE, 1 :127-133

_____ (1979) - Soil physics - selected topics. Amsterdam Elsevier Scientific Publ. Co, 160p

KJELLMANN, W.(1964) - Unorthodox thoughts on filter criteria. Swedish Geotechnical Institute, Report 6: 1-11

KOVACS, G.(1981) - Seepage hydraulics. Amsterdam Elsevier Scientific Publ. Co, 730p, In Skempton, A. & Brogan, J.M.(1994)

LAFLEUR, J ET AL (1989) - Filtration on broadly graded cohesionless soils. JGE-ASCE, 115, n° 12, 1747-1768

LUBOCHKOV, A. (1969) - The calculation of suffosion properties of noncohesive soils when using the nonsuffosion analog. Int. Conf. of Hydraulic Research - Brno-Tchecoslováquia, Tradução In: Tsutuyia(1987)

MARSAL, R. J. (1963) - Contact forces in soils and rockfill materials. 2th Pan Amer CSMFE, São Paulo. 2: 67

_____ (1973) - Mechanical properties of rockfill. In Embankment dam engineering - Casagrande Volume - John Willey and Sons, Edit. por Hirschfeld, R. C. e Poulos, S. J.

MUSSO, A & FEDERICO, F. (1983) - Um metodo geometrico-probabilistico per la verifica dei filtri. Rivista Italiana di Geotecnica, anno XVII, 4, 177-193

_____ (1985)- Pore size distribution in filtration analysis. XI ICSMFE, San Francisco, III : 1207-1212

NOGUEIRA, J. B. (1981) - Uma apreciação prática do carreamento e sua aplicação a filtros de proteção. XIV SMGB, Recife, 2: 313-330

PATRASHEV, A.N. (1938) - Pressurized movement of ground flow accompanied by transport of fine soil particles. Izvesiya VNIIG, -2, URSS, In: Lubochkov (1969)

PETER, P. (1970) - Computation of the degree of filtration stability. 10th ICOLD Congress, Montreal, 2: 191-196

SKEMPTON, A & BROGMAN, J.M. (1994) - Experiments on piping in sandy gravels. Geotechnique, 44(3): 449-460

SHERARD, J. L. (1979) - Sinkholes in dams of coarse broadly graded soils. 13th ICOLD Congress, New Delhi, 2: 25-35

SHERARD, J. L. et al (1984) - Basic properties of sand and gravel filters. JGE-ASCE. 110(6): 684-700

SILVEIRA, A. (1964) - Algumas considerações sobre filtros de proteção (Uma análise de carreamento) - Tese de Doutorado, EESC-USP, 52p.

_____ (1965) - Novas considerações sobre filtro de proteção. Jornal dos Solos. 3(1): 1-20

_____ (1966) - Considerações sobre a distribuição dos vazios em solos granulares. III COBRAMSEF, Belo Horizonte.

_____ (1978) - Discussão do Tema 1 : Comportamento de maciços de terra e/ou enrocamento. VI COBRASMEF, Rio de Janeiro, IV : 126-129

_____ (1993) - A method for determining the void size distribution curve for filter materials. Proc. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Rotterdam: 71-73

SILVEIRA ET AL (1975) - On void distribution of granular materials. V Pan. Amer CSMFE. Buenos Aires, 3, 160-167

SÓRIA, M. H. A. ET AL (1993) - Experimental determination of void size curves. Proc. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Rotterdam: 43-48

THANIKACHALAM, V. & SAKTHIVADIVEL, R. (1974) - Grain size criteria for protective filters, and enquiry. *Soils and Foundations*. 14(14): 13-24

TSUTYIA, A. M. ET AL (1986) - Análise de estabilidade interna de materiais granulares. VII COBRAMSEF, Porto Alegre, 1: 263-267

TSUTYIA, A. M. (1987) - Estudo da distribuição de vazios de materiais granulares, bem graduados, e a sua aplicação a filtros de proteção. Tese de doutoramento - EESC-USP : 240p

VAUGHAN, P.R. & SOARES, H.F.(1982) - Design of filters of clay cores of dams. *JGE-ASCE*, 109, 1, 17-31

WES/U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1941) - Investigation of filters requirements for underdrains. WES. Techn. Memo n° 183-1, 35p

WES/U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1953) - Filters experiments and design criteria. WES. Techn. Memo n° 3-306, 52p, In Kenney, T.C. & Lau, D. (1985)

WITTMANN, L.(1979) - The process of soil filtration its physics and the approach in engineering practice. 7th European CSMFE, Brighton, 1, 303-310

WOLSKY, W. ET AL (1970) - Protection against piping of dam cores of flysh cohesive soils. 10th ICOLD Congress, Montreal, 1 : 575-585

ZASLAVSKY, D. & KASSIF, G. (1965) - Theoretical formulation of piping mechanism in cohesive soils. *Geotechnique*, 15 ,: 305-316

ZWECK, H. & DAVIDENKOFF, R.(1957) - Étude expérimentale des filtres de granulometrie uniforme. IV ICSMFE, London, 2, 410-413