

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRICOLA

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Luiz Roberto Cavicchia e aprovada pela Comissão julgadora em 25 de agosto de 1986.

Campinas, 26 de agosto de 1986


Presidente da Banca

ANALISE CRITICA DA DETERMINAÇÃO INDIRETA
DA PERMEABILIDADE NOS MATERIAIS GRANULARES
EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE VAZIOS

LUIZ ROBERTO CAVICCHIA

ENGENHEIRO CIVIL

ORIENTADOR - Prof. Dr. THALES DE LORENA PEIXOTO Jr.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
APRESENTADA A FEAGRI PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA AGRICOLA

CAMPINAS — 1.986

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

00011:
Autor C.3162
V. Ex.
Tombo BC/ 7385.
BC

CM-00 02 9703 -6

A meu filho

MARCELO

AGRADECIMENTOS

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para a elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

- Prof. Dr. Luiz Antonio Seraphim
- Prof. M. Sc. Mauro Augusto Demarzo
- Prof. Dr. Paulo Roberto Moura Castro
- Prof. Pêrsio Leister de Almeida Barros
- Prof. Dr. Roberto Lopes de Moraes
- Prof. Dr. Roberto de Figueiredo Feijó
- Sr. Domingos Pereira
- Sr. Edson Jurgensen
- Sr. José Benedito Cipriano
- Sr. Luiz Eduardo Meyer
- Sr. Mauro Fernandes
- Sra. Isabel Cristina da Costa Delle Vedove
- Srta. Odette Marquez

- Departamento de Engenharia de Transportes da Faculdade de Engenharia de Limeira, da Universidade Estadual de Campinas, pelas facilidades e apoio.

- Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, pela oportunidade e incentivo.

- Prof. Dr. João Baptista Nogueira, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pelas facilidades e incentivo.
- Prof. Dr. Inácio M. Dal Fabbro, da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, pela acolhida e incentivo.
- Meus pais, pelo constante apoio e incentivo.
- Minha esposa, pela compreensão.
- Prof. Dr. Thales de Lorena Peixoto Junior, pela eficiente orientação e incentivo.

ÍNDICE

	pg.
1. RESUMO	3
2. OBJETIVOS	4
3. NOTAÇÃO E SÍMBOLOS	5
4. CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES GERAIS	10
5. CAPÍTULO II - FLUXO ATRAVÉS DOS SOLOS	16
6. CAPÍTULO III - PERMEABILIDADE DOS SOLOS	22
3.1. Generalidades	23
3.2. Algumas considerações sobre fatores que influem na permeabilidade dos solos	30
3.3. Conceituação de vazios nos solos granulares	32
7. CAPÍTULO IV - ESTIMATIVA DA PERMEABILIDADE - CORRELAÇÕES EXISTENTES	42
4.1. Em função da curva granulométrica, ou de um de seus diâmetros	43
4.2. Em função da porosidade	46
4.3. Em função do índice de vazios	46
4.4. Em função das propriedades do fluido em percolação	47
4.5. Em função do grau de saturação	48
4.6. Em função da estruturação e estratificação do solo	49
4.7. Em função da esfericidade e arredondamento dos grãos	49

	pg.
8. CAPÍTULO V - MATERIAIS E MÉTODOS	51
5.1. Materiais	52
5.2. Métodos	84
9. CAPÍTULO VI - RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS	109
10. CAPÍTULO VII - ANÁLISE DOS RESULTADOS	114
7.1. Introdução	115
7.2. Estudo das regressões	115
7.3. As regressões analisadas	119
7.4. Análise comparativa das regressões	140
11. CAPÍTULO VIII - COMPARAÇÃO COM ESTUDOS JÁ EXISTENTES	144
8.1. Introdução	145
8.2. As regressões existentes	146
8.3. Análise comparativa	147
8.4. Conclusão	152
12. CAPÍTULO IX - CONCLUSÕES	153
13. CAPÍTULO X - SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DAS PESQUISAS	159
14. BIBLIOGRAFIA	162

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de pesquisas sobre permeabilidade dos solos granulares, elaboradas a partir de ensaios de permeabilidade executados sob regime de fluxo laminar, em areias com diferentes curvas granulométricas.

Os resultados dos ensaios foram submetidos a tratamento estatístico conveniente, e ficou evidente que é possível a avaliação da permeabilidade em função da curva de distribuição de vazios dos materiais arenosos.

No trabalho, é apresentada também uma análise crítica comparativa, abordando os resultados das pesquisas ora executadas, e os das pesquisas já existentes anteriormente.

SUMMARY

The objective of this work is to present the results of a research on granular soils permeability. These results were obtained from permeability tests executed under laminar flow through sands with different granulometric curves.

The data were statistically analysed, and from the results obtained one can show it is possible to evaluate permeability, by the use of a distribution curve of the empty pores, for any sandy soil.

It is also presented a comparative critical analysis covering the results of this research, and also the results obtained by different authors.

OBJETIVOS

A permeabilidade de um material arenoso tem sido, frequentemente, um parâmetro decisivo na avaliação da possibilidade de utilização deste material, para as mais diversas finalidades.

Desde há muito tempo, diversos estudos foram feitos, na tentativa de estabelecer correlações entre o coeficiente de permeabilidade das areias, e algum diâmetro de sua curva granulométrica. Ainda hoje, a avaliação do coeficiente de permeabilidade dos solos granulares, muitas vezes, é feita através da utilização desses processos.

O principal objetivo deste trabalho é a determinação do coeficiente de permeabilidade de um solo arenoso, a partir do conceito de "curva de distribuição de vazios" para materiais granulares.

A faixa granulométrica abordada será, principalmente, a correspondente às areias médias e grossas, visando dar continuidade às pesquisas iniciadas na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Será feita, também, uma análise crítica comparativa, entre os resultados do presente trabalho e os das pesquisas já existentes.

NOTAÇÃO E SÍMBOLOS

A lista apresentada a seguir corresponde a notação e símbolos usados neste trabalho.

As notações e símbolos aqui inexistentes são auto-explicativas ou encontram-se explicadas no texto do trabalho.

- A
 - área da secção transversal de uma amostra de solo.
 - área de um permeâmetro.
- A_v - área dos vazios da secção transversal de uma amostra de solo.
- a - coeficiente de uma regressão linear.

- b - coeficiente de uma regressão linear.

- C - coeficiente da fórmula (4.3.1.2).
- C_0 - coeficiente da fórmula de Terzaghi (4.1.3.2).
- C_1 - coeficiente da fórmula de Hazen (4.1.1.1).
- C_2 - coeficiente da fórmula de Terzaghi (4.1.3.1).
- C_s - fator de forma.
- C' - coeficiente da fórmula de Schlichter (4.1.2.1).
- $C_{i,j,k,m}^r$ - combinação com repetição dos diâmetros d_i , d_j , d_k , d_m .
- c - número de coeficientes de uma linha de regressão.

- D
 - diâmetro interno de um permeâmetro.
 - diâmetro de uma amostra de solo.

D_e - diâmetro efetivo de um solo, isto é, diâmetro tal que 10% em peso, da amostra total do solo, tenha diâmetro menor que ele.

D_{10} - ídem a D_e .

D_s - coeficiente da fórmula (4.3.1.2). D_s é o diâmetro da esfera que tem a relação de volume para área superficial, igual a de uma amostra de solo como um todo.

D_{60} - diâmetro dos grãos de um solo, tal que 60% em peso, da amostra total, tenha diâmetro menor que ele.

d - diâmetro de um tubo.

$\bar{d}$ - diâmetro de um vazio do solo.

$\bar{d}_{10}$ - diâmetro dos vazios de um solo arenoso, tal que 10% dos vazios do solo, tenha diâmetro menor que ele.

d_i, d_j, d_k, d_m - diâmetros das esferas representativas de um solo granular.

E-1, E-2, E-3, E-4, E-5 - equações das regressões ajustadas para K em função de $\bar{d}_{10}$.

e - índice de vazios de um solo.

f - função qualquer.

$g(\bar{d}_{10})$ - função qualquer de $\bar{d}_{10}$.

h - perda de carga num fluxo.

- carga hidráulica num fluxo.

- Δh - diferença de carga hidráulica.
- i - gradiente hidráulico num fluxo.
- K - coeficiente de permeabilidade.
- K_1 - constante de proporcionalidade na fórmula (1.1.1.2).
- coeficiente de permeabilidade à temperatura T_1 .
- K_2 - constante de proporcionalidade na fórmula (1.1.1.3).
- coeficiente de permeabilidade à temperatura T_2 .
- K_T - coeficiente de permeabilidade à temperatura T .
- K_{20} - coeficiente de permeabilidade à temperatura de 20°C .
- K_{est} - coeficiente de permeabilidade estimado pela equação de regressão.
- $\bar{K}$ - coeficiente de permeabilidade médio.
- L - comprimento de uma amostra de solo.
- comprimento de um tubo.
- comprimento de um permeâmetro.
- N - número de pares de valores $(K, \bar{d}_{10})$ considerados na análise estatística.
- N_R - número de Reynolds.
- n - porosidade de um solo.
- $\bar{P}$ - probabilidade de ocorrência do vazio de diâmetro $\bar{d}$.

p_i, p_j, p_k, p_m - probabilidade da tangência dos grãos de diâmetros d_i, d_j, d_k, d_m .

Q - vazão de um fluxo.

R - raio de um tubo.

- coeficiente de correlação para $(N-c)$ graus de liberdade.

R_h - raio hidráulico.

R' - coeficiente de correlação para N graus de liberdade.

r_i, r_j, r_k, r_m - número de vezes que ocorrem os diâmetros d_i, d_j, d_k, d_m , em cada agrupamento.

S - esfericidade de uma partícula.

$S'_{K.d_{10}}$ - erro padrão da estimativa de K em função de $\bar{d}_{10}$, para N graus de liberdade.

$S_{K.\bar{d}_{10}}$ - erro padrão da estimativa de K em função de $\bar{d}_{10}$, para $(N - c)$ graus de liberdade.

T - temperatura em graus Celsius.

t - tempo.

U - coeficiente de não uniformidade.

V - volume interno de um permeâmetro.

V - volume total de uma amostra de solo.
 V_e - volume da esfera circunscrita à partícula de solo.
 V_p - volume da partícula de solo.
 V_t - volume de água que percola num tempo t .
 V_v - volume de vazios numa amostra de solo.
 v - velocidade de um fluxo.
 - velocidade de fluxo num ensaio de permeabilidade.
 v_c - velocidade crítica, limite superior para regime laminar.
 v_p - velocidade de percolação numa amostra de solo.
 $v(r)$ - velocidade de uma partícula do fluxo, em função de sua
 posição no tubo.

γ - peso específico de um fluido.
 ν - viscosidade cinemática de um fluido.
 μ - viscosidade dinâmica de um fluido.
 $\tau(r)$ - tensão de cisalhamento num ponto de um fluido em movimento, em função de sua posição no tubo.

$\#$ - peneira ou malha.

01, 02, 03 - números identificadores das curvas de distribuição granulométrica, de vazios no estado compacto e de vazios no estado fôfo, respectivamente, para um solo arenoso.

CAPÍTULO I

CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A permeabilidade de um meio poroso pode ser conceituada como sendo a facilidade que o meio oferece à passagem de um fluido através de seus vazios.

Em Hidráulica, considera-se que o fluxo de um fluido pode se apresentar de duas maneiras características: fluxo laminar e fluxo turbulento.

Quando o fluxo é laminar, cada partícula do fluido deslocase ao longo de um caminho bem definido, que não intercepta ou cruza o caminho de outra partícula. No fluxo turbulento, os caminhos das partículas do fluido são irregulares, inconstantes, cruzando-se e recruzando-se aleatoriamente.

As leis fundamentais que governam o estado característico de um fluxo foram estabelecidas por Osborne Reynolds, em 1883.

Essas leis foram derivadas de seus clássicos experimentos, nos quais a velocidade do fluxo através de um tubo, de paredes lisas e de pequeno diâmetro, e a perda de carga durante a ocorrência do fenômeno, foram os pontos principais da investigação.

Os resultados fundamentais desses experimentos são mostra-

dos na Fig. 1.1.1.1, na qual as ordenadas são os gradientes hidráulicos, designados por i , e definidos como as perdas de carga por unidade de distância percorrida pelo fluido; as abscissas são as velocidades do fluido em movimento, correspondentes a cada gradiente hidráulico i , e são designadas por v .

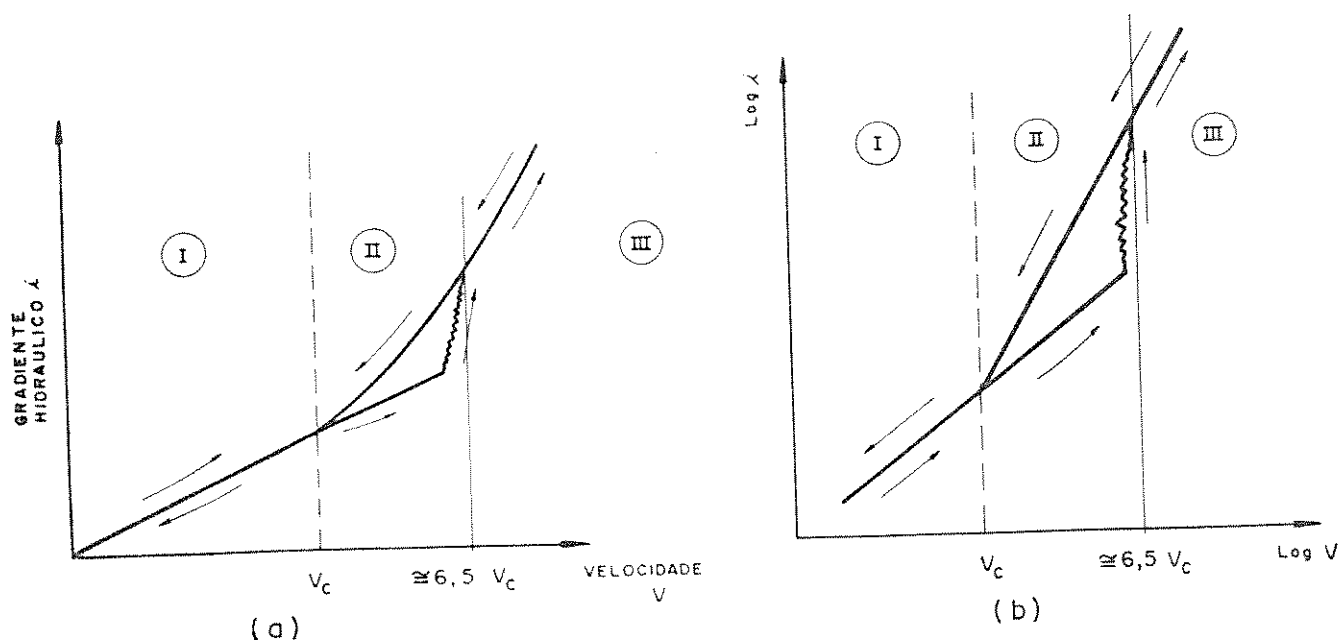


FIGURA 1.1.1.1.
Regiões de Fluxo Laminar e Turbulento.

Na figura 1.1.1.1, os resultados são apresentados em escala natural em (a), e em escala logarítmica em (b). A figura mostra que, para baixas velocidades, na região I, a velocidade v é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico i , condição que pode ser considerada como característica determinante de fluxo laminar. À medida que a velocidade vai aumentando, é alcançado um ponto a partir do qual algumas turbulências começam a se formar, e o fenômeno passa a apresentar um comportamento indefinido, con-

forme aparece na Figura 1.1.1.1, região II.

Maiores incrementos na velocidade podem levar a uma relação gradiente-velocidade mais definida, como representado na região III da Fig. 1.1.1.1.

Se for promovido um decréscimo na velocidade do fluido, a relação gradiente-velocidade apresenta-se então como uma curva definida e suave, de tal maneira que para os mesmos valores do gradiente hidráulico, as velocidades correspondentes são sensivelmente menores do que aquelas para as quais começaram a aparecer turbulências no fenômeno. A continuação no decréscimo da velocidade causa ao fenômeno um retorno ao regime laminar.

O limite superior da região II, caracterizado por um comportamento irregular, é indefinido e de pouco interesse no presente trabalho, onde será buscado sempre o regime laminar para os ensaios e cálculos. Na região III da Fig. 1.1.1.1 situa-se o regime turbulento.

O limite inferior da região II, é caracterizado por uma velocidade definida v_c , abaixo da qual o fluxo nos tubos é sempre laminar.

É denominada na literatura de velocidade crítica v_c .

Resumidamente, da Fig. 1.1.1.1 pode ser concluído que:

- a. Nas relações gradiente-velocidade, podem ser definidas 3 regiões que apresentam comportamento nitidamente diferentes.
- b. Na região I, o regime do fluxo é laminar.
- c. Na região III, o regime do fluxo é turbulento.

d. Na região II, o comportamento do fluxo não é bem caracterizado quando a velocidade está aumentando, aparecendo turbulências no regime; quando a velocidade está diminuindo, o regime é turbulento.

e. Existe uma velocidade v_c , denominada velocidade crítica, que é a fronteira entre o regime laminar (região I) e o regime indefinido (região II).

f. Existe uma velocidade $\approx 6,5 v_c$, limite entre a região II e a região III (regime turbulento).

Nos seus experimentos, Reynolds chegou a conclusão que a velocidade crítica v_c é inversamente proporcional ao diâmetro do tubo, explicitando os resultados observados na seguinte equação, válida para qualquer fluido:

$$\frac{v_c d}{\nu} \leq 2.000 \quad (1.1.1.1)$$

onde:

v_c - velocidade crítica, limite superior para fluxo laminar (m/s).

d - diâmetro do tubo (m).

ν - viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

Esta expressão é conhecida como "Número de Reynolds" para a velocidade crítica.

Da figura 1.1.1.1, para velocidades menores que v_c , na região I de fluxo laminar, pode ser observado que a relação entre a

velocidade e o gradiente $\bar{e}$ linear, ou:

$$v = K_1 \cdot i, \quad (1.1.1.2)$$

onde:

K_1 é a constante de proporcionalidade.

Na região III, onde o fluxo é turbulento, a relação correspondente assume a forma:

$$v^n = K_2 \cdot i, \quad (1.1.1.3)$$

onde K_2 é a constante de proporcionalidade. Segundo Reynolds, na expressão (1.1.1.3), n varia de 1,79 a 2,00.

Da equação (1.1.1.1) e das equações (1.1.1.2) e (1.1.1.3), pode ser concluído que para diâmetros comuns em linhas de tubo, a velocidade crítica é pequena e então o fluxo é geralmente turbulento, pois estes diâmetros são relativamente grandes.

No caso dos tubos circulares de pequenos diâmetros, a velocidade crítica é relativamente alta, e então o fluxo é geralmente laminar.

CAPÍTULO II

FLUXO ATRAVÉS DOS SOLOS

2. FLUXO ATRAVÉS DOS SOLOS

O fluxo de um fluido através de um meio poroso está sujeito às leis físicas fundamentais que governam o movimento dos fluidos perfeitos, conforme explicitado nos conceitos vigentes na Mecânica dos Fluidos. De uma maneira geral, para caracterizar o movimento de um fluido, são necessárias cinco equações, que podem ser resumidas por:

- . três equações gerais do movimento, relativas a cada um dos três eixos x , y e z , de um sistema triortogonal.
- . equação da continuidade, que expressa a lei de conservação das massas.
- . equação complementar, que considera a natureza ou estado do fluido.

As três equações gerais do movimento podem ser expressas por

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial x} = X - \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial y} = Y - \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial z} = Z - \frac{d^2 z}{dt^2}$$

A equação da continuidade, na sua forma geral, é representada por

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \text{div} (\gamma \vec{V}) = 0$$

A equação complementar, ou característica, ou de estado de um fluido, é uma expressão do tipo

$$f(p, \gamma, T) = 0$$

onde

γ - peso específico do fluido.

p - pressão a que está submetido o fluido.

X, Y, Z - componentes do peso, relativas à unidade de massa, nos eixos x, y e z .

$\vec{V}$ - vetor velocidade do fluido no ponto (x, y, z) .

T - temperatura do fluido.

No caso dos solos em geral, os canais formados pelos seus vazios são tão finos e tortuosos, de secção transversal tão variável e de tão grande complexidade em suas interconexões e subdivisões, e de rugosidade tão heterogênea ao longo de seu comprimento, que uma análise do fluxo através dos poros individuais não é possível.

A análise do fluxo através dos solos, então, tem sido feita de um ponto de vista macroscópico, sendo o fenômeno quantificado através de resultados médios extraídos da amostra como um todo, sem todavia levar em consideração o que acontece em cada vazio existente, ou mesmo nos canalículos formados por um conjunto de vazios interligados entre si.

Para esta análise, é utilizada a já muito conhecida Lei de Darcy, válida para fluxo no regime laminar.

Henri Darcy, em 1856, demonstrou experimentalmente que a vazão de um fluxo qualquer, no regime laminar, é diretamente proporcional ao gradiente, de acordo com a expressão

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad (2.1.1.1)$$

ou

$$\frac{Q}{A} = K \cdot i \quad (2.1.1.2)$$

ou ainda

$$v = K \cdot i \quad (2.1.1.3)$$

onde

Q - vazão do fluxo.

K - constante de proporcionalidade, denominada coeficiente de permeabilidade.

i - gradiente = $\frac{\text{perda de carga (h)}}{\text{comprimento da amostra (L)}}$

A - área da secção transversal da amostra de solo.

v - velocidade do fluxo.

Existem vários processos para a medição da permeabilidade dos solos, que podem ser divididos fundamentalmente em processos diretos e processos indiretos. Os processos diretos têm como objetivo fundamental a medição do coeficiente de permeabilidade; os processos indiretos fornecem a permeabilidade em função de outros parâmetros do solo.

Os processos diretos de medição da permeabilidade são constituídos por:

- . ensaios executados com permeâmetro de carga constante.
- . ensaios executados com permeâmetro de carga variável.
- . ensaios "in situ".

Devido a ordem de grandeza dos valores da permeabilidade dos materiais arenosos, o processo mais indicada para a medição deste parâmetro, neste tipo de solo, são os ensaios executados com permeâmetro de carga constante.

Neste trabalho, solos arenosos convenientemente selecionados serão submetidos ao processo direto de medição da permeabilidade, constituído por ensaios de permeabilidade executados com permeâmetro de carga constante. A seguir, os valores da permeabilidade, medidos nos ensaios, serão correlacionados com algum parâmetro do material ensaiado, e então submetidos a tratamento estatístico adequado, com a finalidade de fornecer um método indireto de medição da permeabilidade.

CAPÍTULO III

PERMEABILIDADE DOS SOLOS

3. PERMEABILIDADE DOS SOLOS

3.1. Generalidades

Quando a permeabilidade dos solos é analisada, o fluído em estudo é sempre a água, salvo em casos particulares ou especiais.

Para o caso da água, Reynolds diz que a velocidade crítica pode ser encontrada pela seguinte expressão, em função da temperatura da água.

$$v_c = \frac{36}{1 + 0,0337 T + 0,00022 T^2} \cdot \frac{1}{d} \quad (3.1.1.1)$$

onde:

v_c - velocidade crítica para a água (cm/s)

T - temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$)

d - diâmetro do conduto (cm)

Assim, a velocidade crítica da água, para uma dada temperatura, é inversamente proporcional ao diâmetro do tubo por on-

de percola.

No caso do fluxo através de uma amostra de solo, um detalhe de sua secção transversal poderia ser representado como na Fig. 3.1.1.1.

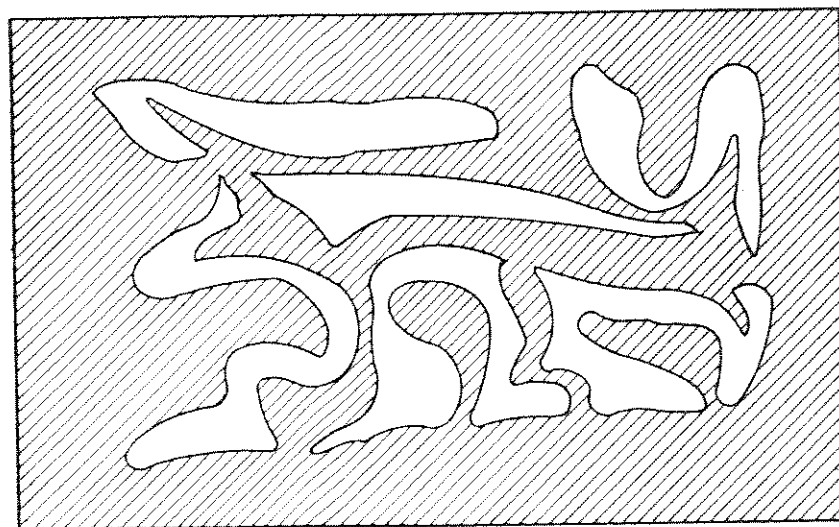


FIGURA 3.1.1.1.

Secção transversal de uma amostra de solo.
Uma idéia dos vazios formados.

Torna-se muito difícil estabelecer o diâmetro do conduto (d), que irá entrar nos cálculos, tanto para a expressão (1.1.1.1), como para a expressão (3.1.1.1), para calcular a velocidade crítica.

É mais prático, então, introduzir o conceito de raio hidráulico (R_h), válido para uma secção transversal de forma qualquer, e considerar, a vazão do fluxo, dele dependente.

A vazão, em função do raio hidráulico, é expressa por

$$Q = C_s \frac{\gamma R_h^2}{\mu} \cdot n \cdot i \cdot A \quad (3.1.1.2)$$

onde:

C_s - fator de forma (adimensional)

γ - peso específico do fluído

n - porosidade do meio

μ - viscosidade dinâmica do fluído

R_h - raio hidráulico = $\frac{\text{área molhada}}{\text{perímetro molhado}}$

$R_h = f(d)$

Analogamente, Poiseuille, da Hidráulica, estudou o fluxo d'água através de tubos capilares com secção circular, e chegou a

$$Q = \frac{h \gamma \pi R^4}{8 \mu L} \quad (3.1.1.3)$$

Retrabalhando a fórmula (3.1.1.3), de maneira a torná-la mais facilmente comparável à de Darcy, resulta

$$v = \frac{\gamma \cdot d^2}{32 \mu} \cdot i \quad (3.1.1.4)$$

ou

$$\frac{v}{i} = \frac{\gamma d^2}{32 \mu} \quad (3.1.1.5)$$

Considerando válida a Lei de Darcy para materiais granulares, isto é,

$$v = K \cdot i \quad (3.1.1.6)$$

$$\text{ou} \quad \frac{v}{i} = K \quad (3.1.1.7)$$

e comparando-se (3.1.1.5) com (3.1.1.7), obtêm-se que

$$K = f(d^2) \quad (3.1.1.8)$$

ou seja, a permeabilidade é função do diâmetro dos capilares, para regime laminar de escoamento, e considerada válida a Lei de Darcy para percolação de água em materiais terrosos.

Quando uma amostra de solo é submetida ao ensaio de permeabilidade, a área da secção transversal considerada para os cálculos é a área total da mesma, em vez de ser considerada a área dos vazios.

A constante de proporcionalidade K (coeficiente de permeabilidade) pode ser definida como a velocidade média aparente de escoamento da água, através da área total (área de sólidos + área de vazios) da secção transversal da amostra sob a ação de gradiente unitário.

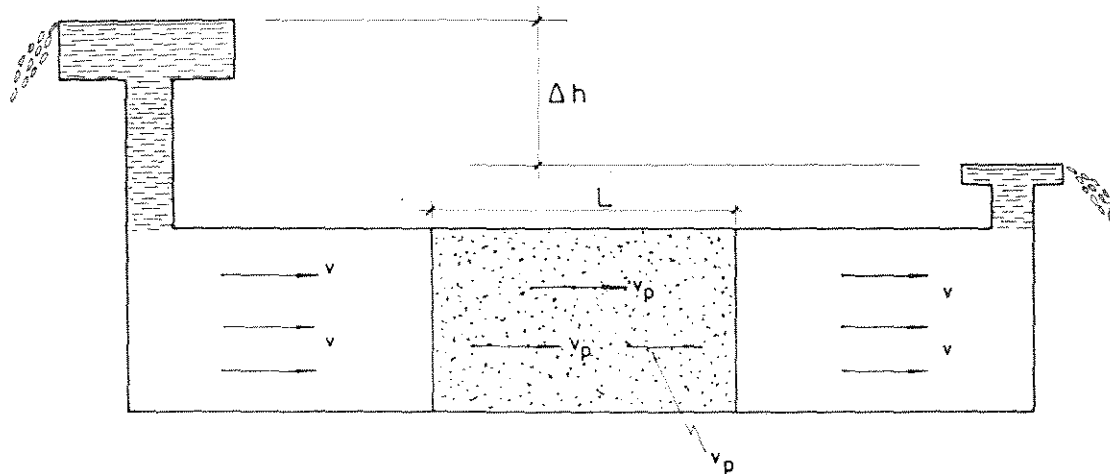
Deve ser feita uma clara distinção entre a velocidade de aproximação (ou de fluxo), e a velocidade de percolação na amostra.

A velocidade de aproximação ou de fluxo, daqui por diante chamada sempre de velocidade de fluxo, é a velocidade média do fluído antes de alcançar a amostra; é também a velocidade do fluído depois que passou pela amostra.

A velocidade de percolação é aquela considerando-se a diminuição da área da secção transversal, causada pela presença dos grãos sólidos do solo; também pode ser aquela considerando-se a área de vazios do solo. Não é considerada porém, a tortuosidade dos canalículos, suas interconexões, a irregularidade de sua sec-

ção transversal, e sua rugosidade.

Na Figura (3.1.1.2), estão indicadas as grandezas que intervêm no fenômeno, assim como a diferenciação entre velocidade de fluxo e velocidade de percolação.



- FIGURA 3.1.1.2.

Ensaio de permeabilidade.

Velocidade de fluxo e de percolação.

A relação entre as duas velocidades pode ser calculada.

Seja Q a vazão do fluxo, que tem o mesmo valor antes e após passar pela amostra de solo, e também durante a percolação pela amostra.

Dessa maneira, pode-se escrever que:

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad (\text{de 2.1.1.1}) \quad (3.1.1.9)$$

Como $v = K \cdot i$ (Lei de Darcy, regime laminar),

$$Q = v \cdot A \quad (3.1.1.10)$$

onde: v - velocidade de aproximação do fluxo, ou simplesmente velocidade de fluxo.

A - área total da secção transversal de amostra, ou simplesmente área total.

Pode dizer também que:

$$Q = v_p \cdot A_v \quad (3.1.1.11)$$

onde: v_p - velocidade de percolação do fluxo na amostra, ou simplesmente velocidade de percolação.

A_v - área dos vazios da secção transversal da amostra, ou simplesmente área dos vazios.

Das relações fundamentais entre os índices físicos dos solos, pode-se tirar que:

$$V_v = n V \quad (3.1.1.12)$$

onde: V_v - volume de vazios do solo

n - porosidade do solo

V - volume total do solo

O mesmo conceito, explicitado em (3.1.1.12) para volumes, vale também para uma secção transversal do solo, ou seja:

$$\frac{V_v}{L} = n \frac{V}{L}, \quad (3.1.1.13)$$

$$\text{ou} \quad A_v = n A \quad (3.1.1.14)$$

onde: A_v - área dos vazios
 A - área total

Como o fluxo Q é constante, vem:

$$Q = v \cdot A = v_p \cdot A_v = v_p \cdot n \cdot A \quad (3.1.1.15)$$

ou ainda:

$$v = n \cdot v_p \quad (3.1.1.16)$$

É importante notar que nem a velocidade de fluxo v , nem a velocidade de percolação v_p , como foram já definidas, pretendem exprimir a velocidade real do fluxo no interior da amostra. Devido à natureza dos caminhos que o fluído tem que percorrer no interior da amostra, devido às tortuosidades e irregularidades de sua secção transversal, a velocidade real do fluído no interior da amostra permanece desconhecida. O assunto voltará a ser abordado mais oportunamente, no Capítulo 5.

Nas equações (2.1.1.1) ou (2.1.1.2), o termo K , constante de proporcionalidade de Darcy, é o único coeficiente de permeabilidade em uso corrente na Mecânica dos Solos. Será chamado, daqui por diante, simplesmente de coeficiente de permeabilidade do solo.

De qualquer forma, seja para avaliar a velocidade crítica v_c nas equações (1.1.1.1) ou (3.1.1.1), seja para avaliar a vazão Q do fluxo em função de R_h na equação (3.1.1.2), há a necessidade do conhecimento do diâmetro d dos pequenos canais formados pelo solo. Essa avaliação de d é muito difícil, e a determinação

da permeabilidade dos solos tem se baseado em parâmetros de mais fácil quantificação, como por exemplo os diâmetros das partículas sólidas, facilmente determináveis em ensaios de rotina na Mecânica dos Solos.

3.2. Algumas Considerações sobre Fatores que influem na Permeabilidade dos Solos

Nas equações abordadas nos capítulos anteriores ((1.1.1.1), (3.1.1.1), (3.1.1.2) e (3.1.1.4)), pode ser constatado que a permeabilidade depende do diâmetro dos canais formados pelo solo. O diâmetro dos canais, por sua vez, depende de vários fatores, dentre os quais podem ser destacados:

a. tamanho dos grãos sólidos do solo

Sabe-se que quanto maior o diâmetro representativo de um determinado solo, maiores serão os vazios formados. Portanto, pelo menos indiretamente, o diâmetro das partículas sólidas do solo influi na sua permeabilidade.

b. porosidade da amostra (n)

De (3.1.1.2), constata-se que a velocidade de percolação na amostra depende da porosidade da mesma. Portanto, a permeabilidade também depende da porosidade da amostra.

c. Índice de vazios (e)

Pela simples substituição da porosidade em função

do índice de vazios, através de $n = \frac{e}{1 + e}$, na equação (3.1.1.2), constata-se que a permeabilidade depende do índice de vazios do solo.

Além disso, a permeabilidade depende também de outros parâmetros, tais como:

d. propriedades do fluído

Na equação (3.1.1.1), pode ser observado que a permeabilidade depende também da temperatura do fluído. Na equação (3.1.1.2), os termos γ e μ dependem da temperatura, sendo que a variação de μ com a temperatura é muito mais acentuada que a de γ .

A relação $\frac{K_1}{K_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$, válida para $\gamma = \text{constante}$, é amplamente aplicada, admitindo-se um pequeno erro.

e. grau de saturação

O grau de saturação do solo também tem muita influência na medição de sua permeabilidade. A presença de ar, nos vazios do solo, tem papel muito importante no fenômeno: quanto mais ar, mais dificuldade para a percolação do fluxo, menor o valor medido da permeabilidade.

f. estruturação do solo

Afeta a permeabilidade dos materiais mais finos, tais como siltes e argilas. No caso de solos granulares, deixa de ter importância.

g. estratificação do solo

Tem grande influência na permeabilidade de campo,

quando o solo é encarado do ponto de vista do maciço que ele constitui. Não afeta os ensaios de laboratório.

h. esfericidade e arredondamento dos grãos

Conforme Peixoto (20), estas grandezas não chegam a afetar praticamente a permeabilidade dos solos arenosos mais finos, segundo verificação em seu trabalho experimental. No entanto, para solos de granulometria mais grossa (de pedregulhos para maiores), a influência destes fatores deve ser investigada.

3.3. Conceituação de Vazios nos Solos Granulares

O levantamento da curva de distribuição granulométrica de um material granular não oferece dificuldades, uma vez que é de fácil obtenção em laboratório, através de processos rotineiros de peneiramento, e, quando houver necessidade, de sedimentação.

Normalmente, as curvas de distribuição granulométricas são apresentadas em escalas semi-logarítmicas, tendo nas abscissas (escala logarítmica) os diâmetros dos grãos, e nas ordenadas (escala aritmética) as porcentagens acumuladas nos respectivos diâmetros.

Quanto a distribuição dos vazios em um meio poroso, formado por partículas sólidas de diferentes dimensões, será conseguida a partir da probabilidade de ocorrência de determinados agrupamentos de partículas, aos quais corresponderão determinados vazios, que terão as suas probabilidades de ocorrência definidas,

sendo possível assim a construção de uma curva de distribuição dos vazios do solo.

De acordo com Silveira, A. (23), definem-se curvas de distribuição de vazios para duas condições de um material granular: estado compacto e estado fôfo.

3.3.1. Estado Compacto

O estado mais compacto de um material granular é aquele em que, qualquer que seja a posição analisada no interior do mesmo, suas partículas sólidas estarão em contato três a três, conforme pode ser visto na Fig. 3.3.1.1.

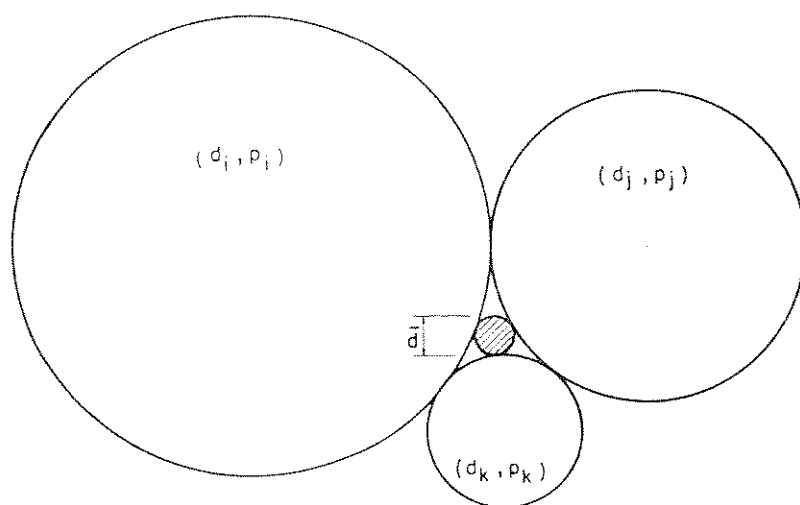


FIGURA 3.3.1.1.

Representação do vazio tangente no estado compacto.

As três partículas sólidas em contato podem ser representadas, no plano, por três circunferências tangentes entre si. A esfera tangente às três partículas também pode ser representada, no plano por uma circunferência de diâmetro $\bar{d}$.

Portanto, para cada um destes agrupamentos de três circunferências de diâmetros d_i , d_j e d_k , tangentes entre si, resultará um vazio interno que será representado pela circunferência interna tangente às três externas, de diâmetro $\bar{d}$.

O diâmetro $\bar{d}$, então, passará a representar o vazio resultante do agrupamento de três grãos quaisquer, que serão também representados pelos seus diâmetros d_i , d_j e d_k .

Logo, o diâmetro $\bar{d}$ será função apenas dos três diâmetros d_i , d_j e d_k , ou:

$$\bar{d} = f(d_i, d_j, d_k) \quad (3.3.1.1)$$

A probabilidade de ocorrência do diâmetro $\bar{d}$ será igual à probabilidade da tangência das três partículas de diâmetros d_i , d_j , d_k .

Para facilitar os cálculos, e chegar à curva de distribuição de vazios, Silveira discreteou a curva granulométrica contínua em estudo, que passou a ser representada pelos seus m diâmetros

$$d_1, d_2, d_3, \dots d_i, \dots d_j, \dots d_k, \dots d_m,$$

e suas respectivas probabilidades

$$p_1, p_2, p_3, \dots p_i, \dots p_j, \dots p_k, \dots p_m,$$

onde i, j, k , indicam elementos genéricos quaisquer.

O cálculo das probabilidades $\bar{P}$ de ocorrência dos vazios de diâmetro $\bar{d}$, igual à probabilidade da tangência das três esferas de diâmetros d_i, d_j, d_k , pode ser feito como se segue

$$\bar{P}_{C_{i,i,i}}^r = 1 \times p_i \times p_i \times p_i = p_i^3, \quad (3.3.1.2)$$

$$\bar{P}_{C_{i,i,j}}^r = 3 \times p_i \times p_i \times p_j = 3 \cdot p_i^2 \cdot p_j \quad \text{e} \quad (3.3.1.3)$$

$$\bar{P}_{C_{i,j,k}}^r = 6 \times p_i \times p_j \times p_k \quad (3.3.1.4)$$

Assim, resumidamente, os diâmetros $\bar{d}$ dos vazios, e sua probabilidade de ocorrência $\bar{P}$ podem ser calculados por

$$\bar{d} = f(d_i, d_j, d_k) \quad \text{e} \quad (3.3.1.5)$$

$$\bar{P} = \frac{3!}{r_i! r_j! r_k!} \cdot p_i^{r_i} \times p_j^{r_j} \times p_k^{r_k}, \quad (3.3.1.6)$$

onde $r_i + r_j + r_k = 3 \quad \text{e} \quad (3.3.1.7)$

r_i, r_j, r_k são respectivamente o número de vezes que ocorrem os diâmetros d_i, d_j, d_k em cada agrupamento possível para estes diâmetros.

Para a obtenção da curva de distribuição dos vazios, representada pelos pares de valores $(\bar{d}, \Sigma \bar{P})$, foi utilizado um programa desenvolvido na época da elaboração do trabalho de Peixoto (20), para o computador IBM-1130.

Foram fornecidos dez diâmetros da curva granulométrica

ca do material granular

$(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9 \text{ e } d_{10})$,

que representassem bastante bem a mencionada curva, e suas respectivas porcentagens de ocorrência

$p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9 \text{ e } p_{10}$.

O computador forneceu pares de valores $(\bar{d}, \Sigma \bar{P})$, em número mais que suficiente para o traçado da curva de distribuição de vazios no estado compacto.

3.3.2. Estado Fôfo

O estado fôfo, ou menos denso, de um material granular, caracteriza-se pela existência, em qualquer posição no interior do material, de quatro partículas esféricas tangenciando-se, duas a duas, entre si. O estado fôfo pode ser visualizado como aparece na figura 3.3.2.1., na página seguinte.

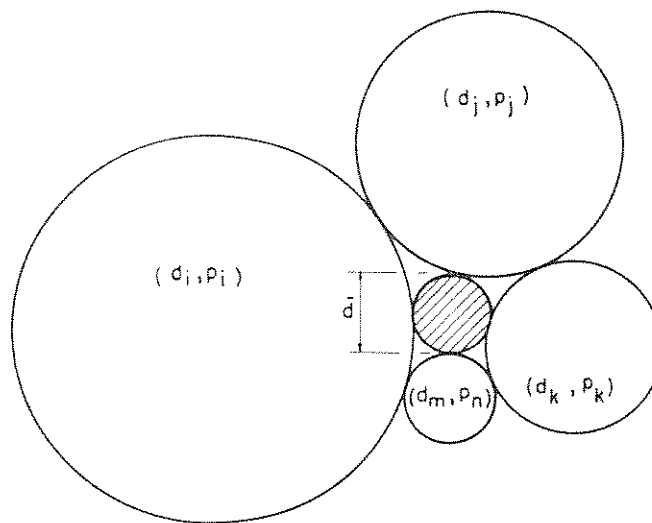


FIGURA 3.3.2.1.

Representação do vazio tangente no estado fôfo.

Silveira (27), fez algumas considerações adicionais às já feitas para o estado compacto.

- a. são três esferas com centro em um mesmo plano.
- b. a quarta esfera tem o seu centro no mesmo plano, ou é a projeção no plano considerado, de uma esfera que tenha o mesmo efeito, com relação a este plano, que a esfera verdadeira.
- c. deverá ser procurada a posição relativa das quatro partículas de diâmetros d_i , d_j , d_k , d_m , tangentes entre si, que resulte no máximo vazio possível.

Os diâmetros $\bar{d}$ dos vazios serão então função dos diâmetros d_i, d_j, d_k, d_m , das partículas sólidas, ou seja,

$$\bar{d} = f(d_i, d_j, d_k, d_m). \quad (3.3.2.1)$$

As respectivas probabilidades de ocorrência $\bar{P}$, dos diâmetros $\bar{d}$, são fornecidas pela equação

$$\bar{P} = \frac{4!}{r_i! r_j! r_k! r_m!} \cdot p_i^{r_i} \cdot p_j^{r_j} \cdot p_k^{r_k} \cdot p_m^{r_m} \quad (3.3.2.2)$$

onde

p_i, p_j, p_k, p_m - probabilidade de ocorrência de d_i, d_j, d_k, d_m

r_i, r_j, r_k, r_m - número de vezes em que ocorrem d_i, d_j, d_k, d_m em cada agrupamento, sendo cada um deles um número inteiro não negativo, e tal que $r_i + r_j + r_k + r_m = 4$.
(3.3.2.3)

Silveira (27), resolveu o problema de encontrar a função f , que fornece o diâmetro dos vazios em função dos diâmetros das partículas sólidas, por processo geométrico. São necessários cinco diâmetros da curva granulométrica, isto é, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 ; o diâmetro $\bar{d}$, para as várias combinações possíveis, é sempre fornecido em função do menor deles (d_1).

Para a obtenção dos pares de valores $(\bar{d}, \Sigma \bar{P})$, necessários ao traçado das curvas de distribuição de vazios, correspondentes ao estado fôfo, foi desenvolvido, para este trabalho, um programa para computador, que fornece pontos em número mais que

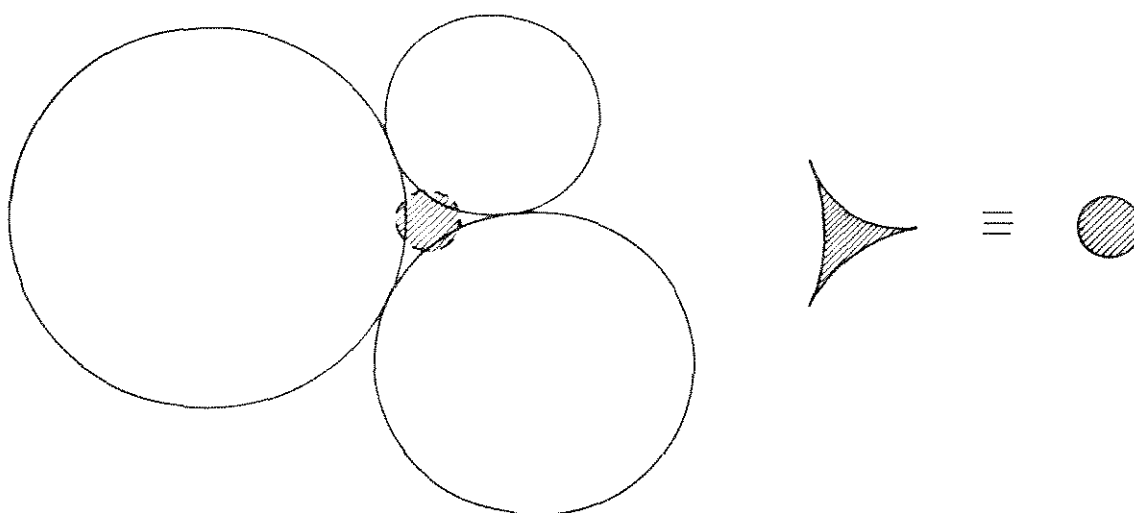
suficiente para a definição das mencionadas curvas.

3.3.3. Vazio Equivalente

Nogueira (19), desenvolveu processo de cálculo que permite calcular o vazio equivalente, ou seja, o diâmetro da circunferência de mesma área que o vazio efetivamente formado pela tangência das partículas sólidas, para o estado compacto e estado fôfo. Conseguiu assim, chegar a um valor mais próximo da realidade, do que para o vazio denominado "tangente", dos trabalhos de Silveira.

No entanto, para estudos de permeabilidade, segundo Peixoto (20), o vazio tangente forneceu correlações mais bem ajustadas do que o vazio equivalente.

O conceito geométrico do vazio equivalente pode ser visualizado na figura 3.3.3.1.



- FIGURA 3.3.3.1.

- Representação do vazio equivalente.

3.3.4. A Distribuição de Vazios a ser Utilizada

Face aos argumentos apresentados em 3.3.1., 3.3.2., e 3.3.3., no presente trabalho serão utilizadas as curvas de distribuição de vazios conforme desenvolvimento de Silveira (23) e (27), isto é, serão utilizadas as curvas de distribuição dos vazios "tangentes", e não dos vazios "equivalentes".

O aspecto típico das curvas de distribuição de vazios pode ser visto na Fig. 3.3.4.1, juntamente com uma curva de distribuição granulométrica.

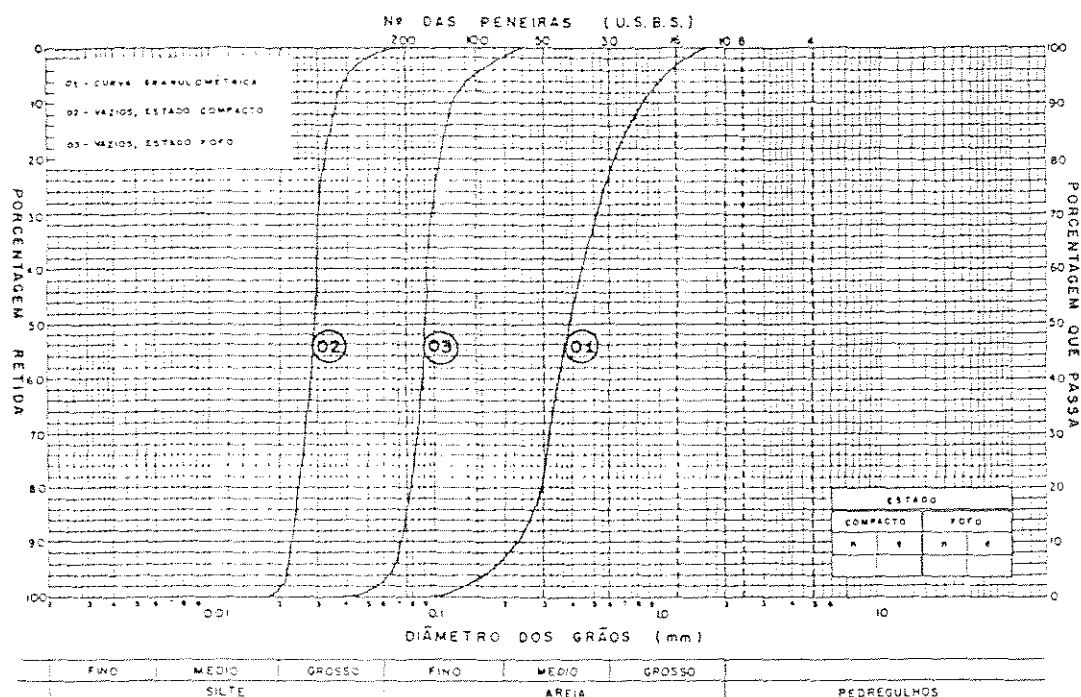


FIGURA 3.3.4.1.

Curvas características para materiais granulares.

Na Fig. 3.3.4.1, são definidas:

Curva 01 - curva de distribuição granulométrica do material granular.

Curva 02 - curva de distribuição de vazios, estado compacto.

Curva 03 - curva de distribuição de vazios, estado fôfo.

CAPÍTULO IV

ESTIMATIVA DA PERMEABILIDADE - CORRELAÇÕES EXISTENTES

4. ESTIMATIVA DA PERMEABILIDADE - CORRELAÇÕES EXISTENTES

Vários autores têm tentado estabelecer correlações, ligando a permeabilidade de diferentes tipos de solos, a parâmetros característicos desses mesmos materiais.

Evidentemente, a escolha dos parâmetros característicos, de tal maneira que a partir deles a permeabilidade pudesse ser estimada, foi limitada ao que era disponível, ou de obtenção relativamente fácil, na época em que os estudos foram feitos.

A seguir serão apresentadas as correlações mais conhecidas e utilizadas na prática.

4.1. Em Função da Curva Granulométrica, ou de um de seus Diâmetros

4.1.1. Fórmula de Hazen

Allen Hazen (apud Taylor (30)), em 1911, obteve expe-

rimentalmente a correlação

$$K = C_1 \cdot D_e^2 \text{ (cm/seg)}, \quad (4.1.1.1)$$

onde

K - cm/s

D_e - cm

C_1 - varia de 41 a 146

que é uma das mais conhecidas e utilizadas.

A fórmula de Hazen vale para areias com diâmetros efetivos (D_e) variando entre 0,1 mm e 3,0 mm, e para as quais o coeficiente de não uniformidade (U) não seja maior que 5, isto é,

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 5.$$

Portanto, a fórmula de Hazen vale para areias razoavelmente uniformes, e, freqüentemente, tem sido usado um valor aproximadamente médio para C_1 ($C_1 \approx 100$), ou seja

$$K \approx 100 \cdot D_e^2 \text{ (cm/s)} \quad (4.1.1.2)$$

Na fórmula de Hazen, o efeito da temperatura também tem sido levado em consideração, resultando

$$K = C_1(0,7 + 0,03T) \times D_e^2 \text{ (cm/s)} \quad (4.1.1.3)$$

onde T é a temperatura em Graus Celsius e os outros símbolos tem o mesmo significado já a eles atribuído.

4.1.2. Fôrmla de Schlichter

Schlichter introduziu na equação (4.1.1.3) a influência da compacidade do material, chegando a

$$K = \frac{771}{C'} (0,7 + 0,03 T) \cdot D_e^2 \text{ (cm/s)} \quad (4.1.2.1)$$

onde C' é função de " n " (porosidade), e é dado pela tabela (4.1.2.1).

n	C'
0,26	84,3
0,38	24,1
0,46	12,8

Tabela 4.1.2.1

Coeficiente C' em função da porosidade " n "

4.1.3. Fôrmla de Terzaghi

Terzaghi retrabalhou a fôrmla de Hazen, estabelecendo que

$$K = C_2 (0,7 + 0,03 T) D_e^2 \text{ (cm/s)} \quad (4.1.3.1)$$

onde

$$C_2 = C_0 \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \quad (4.1.3.2)$$

sendo

n - porosidade

C_o - coeficiente fornecido pela tabela 4.1.3.1.

TIPOS DE AREIAS	C_o
Areias com grãos arredondados	800
Areias com grãos angulosos	460
Areias siltosas	40

Tabela 4.1.3.1

Coeficiente C_o em função de vários tipos de areias

4.2. Em função da porosidade

Sabe-se que, indiretamente, a porosidade sempre afeta a permeabilidade de um meio poroso ((vide equação (4.1.2.1) e tabela 4.1.2.1.)).

Explicitamente, a porosidade entra como um dos fatores determinantes na equação (4.1.3.1), através da relação (4.1.3.2); o mesmo acontece, analogamente, na equação (3.1.1.2).

4.3. Em função do Índice de vazios

Na equação (3.1.1.2), substituindo a porosidade " n " pelo seu valor em função do Índice de vazios " e " ($n = \frac{e}{1 + e}$), e introduzindo um fator de forma composto C , chega-se a (apud Taylor

(30), pag. 111)

$$Q = (D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C) i . A \quad (4.3.1.1)$$

ou

$$K = D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C \quad (4.3.1.2)$$

onde $D_s = 6 \frac{R_h}{e}$

Experimentalmente, também já foi verificado que

$$K = f \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad (4.3.1.3)$$

e também que (F. Zunker, 1930, apud Taylor (30))

$$K = f(e^2) \quad (4.3.1.4)$$

4.4. Em função das propriedades do fluído em percolação

Na equação (4.3.1.2), pode ser visto que a permeabilidade depende da relação γ/μ , ou seja, do quociente peso específico da água dividido pela sua viscosidade.

Na mecânica dos solos, é prática comum executar os ensaios de permeabilidade a uma temperatura conveniente, e depois reduzir os coeficientes de permeabilidade a coeficientes para a temperatura de 20°C. Assim, quaisquer valores, obtidos em diferentes laboratórios a diferentes condições de ensaio, podem ser comparados.

É amplamente utilizada, também, a relação $k_1/k_2 = \mu_2/\mu_1$, válida para $\gamma = \text{constante}$ com a temperatura, admitindo-se um pequeno erro.

Além disso, qualquer quantidade de ar e de outros gases pode estar presente, dissolvida na água. Uma mudança nas condições de pressão e/ou temperatura pode liberar parcelas deste ar ou gás, resultando em presença de ar nos vazios.

Assim, devem ser eliminadas todas as possíveis fontes geradoras de ar durante os ensaios, até o ponto em que se tornar inexecutível qualquer tentativa de diminuição de ar nos experimentos.

Dessa maneira, é desejável que não aconteça qualquer aumento da temperatura da água durante os ensaios, pois isto libera gases; mesmo o método de ensaio a carga variável, com a carga diminuindo durante o ensaio, pode liberar gases dissolvidos e prejudicar os resultados obtidos.

Também a temperatura do fluido, além de afetar o seu peso específico e a sua viscosidade, afeta diretamente a permeabilidade obtida experimentalmente, como pode ser visto nas equações (4.1.1.2), (4.1.2.1) e (4.1.3.1).

4.5. Em função do grau de saturação

A presença de ar nos vazios, mesmo em pequena quantidade, dependendo do tipo de solo, pode ter um efeito marcante no coeficiente de permeabilidade.

Normalmente, em qualquer ensaio de permeabilidade, o solo é submetido a processos de saturação antes da execução do ensaio, e é então considerado como completamente saturado.

No entanto, nem sempre é alcançado um grau de saturação igual ou muito próximo de 100%, embora seja do conhecimento geral que a permeabilidade depende, e muito, do grau de saturação

da amostra.

Ainda assim, com todas estas precauções, se existir uma quantidade muito pequena de ar nos vazios, este ar pode migrar até pontos críticos dos canalículos formados pelos vazios, e aí então dificultar a passagem da água e influir na permeabilidade.

4.6. Em função da estruturação e estratificação do solo

Estes parâmetros têm influência nos ensaios "in situ", não afetando, devido à natureza e processos de execução, os ensaios de laboratório.

4.7. Em função da esfericidade e arredondamento dos grãos

Uma das hipóteses básicas, adotada para o desenvolvimento da teoria das curvas de distribuição de vazios, é a de que os grãos tem a forma esferoidal.

Por outro lado, é sabido que os vazios formados por partículas sólidas, devem ter o seu formato e tamanho dependentes da forma das partículas sólidas.

Assim, serão tecidas breves considerações sobre a esfericidade e o arredondamento dessas partículas.

Segundo Wadell, apud Peixoto (20), a esfericidade é expressa por

$$S = \sqrt[3]{\frac{v_p}{v_e}} \quad (4.7.1.1)$$

onde

S - esfericidade

V_p - volume da partícula

V_e - volume da esfera circunscrita

Ainda segundo Wadell, apud Peixoto (20), o arredondamento é traduzido por

$$\text{Arredondamento} = \frac{\text{raio médio dos cantos e saliências}}{\text{raio do máximo círculo inscrito}}$$

Segundo Peixoto (20), para a precisão e refinamento quantitativo tratados nos ensaios de permeabilidade dos materiais granulares, os diferentes graus de esfericidade e arredondamento dos grãos constituintes das amostras analisadas, em nada influenciaram nos resultados obtidos, na faixa granulométrica considerada.

Portanto, a hipótese adotada por Silveira (23), de grãos esferoidais, não deve alterar o rumo dos estudos para serem obtidos $K = f(\bar{d})$.

Certamente essa influência deve ser pesquisada quando os ensaios forem executados em materiais de granulometria mais grossa que a abordada neste trabalho. Já Terzaghi, na equação (4.1.3.1), considerou este aspecto, fazendo o coeficiente C_2 variar em função da forma dos grãos de areia.

CAPÍTULO V

MATERIAIS E MÉTODOS

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais

5.1.1. Generalidades

Foram utilizadas areias finas, médias e grossas, que, misturadas em diversas proporções, resultaram nas areias de diferentes curvas granulométricas, que foram então submetidas aos ensaios de permeabilidade.

As areias que entraram na mistura foram adquiridas em diferentes depósitos de materiais de construção, propositadamente de origens diversas, de cores diferentes, com grãos de formatos quaisquer, e foram assim escolhidas para poderem representar um material de qualquer procedência, bastando para isso que sua curva granulométrica seja aproximadamente a mesma.

5.1.2. Identificação das amostras

As amostras constituídas pelas misturas já menciona-

das, são representadas através de sua curva granulométrica (curva 01), e têm a sua distribuição de vazios representada pela curva 02 (estado compacto) e curva 03 (estado fôfo).

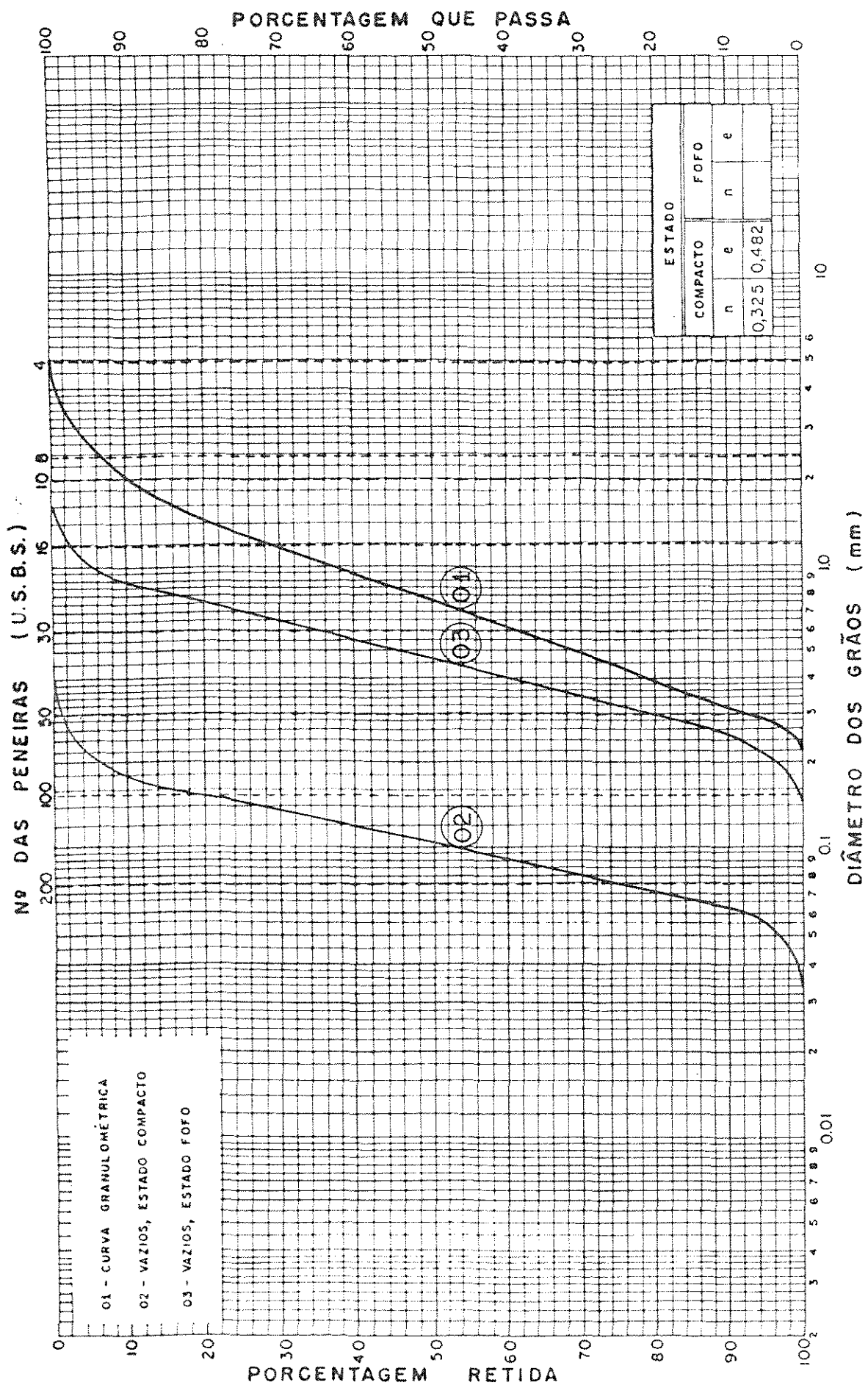
As amostras são identificadas pela adição de um número (01 a 43) à palavra AMOSTRA. Exemplo: AMOSTRA 03, AMOSTRA 15, etc.

No desenho representativo de cada amostra, estão incluídas também a porosidade "n", e o índice de vazios "e", correspondentes a cada condição de compactação submetida a ensaio de permeabilidade (estado compacto e estado fôfo).

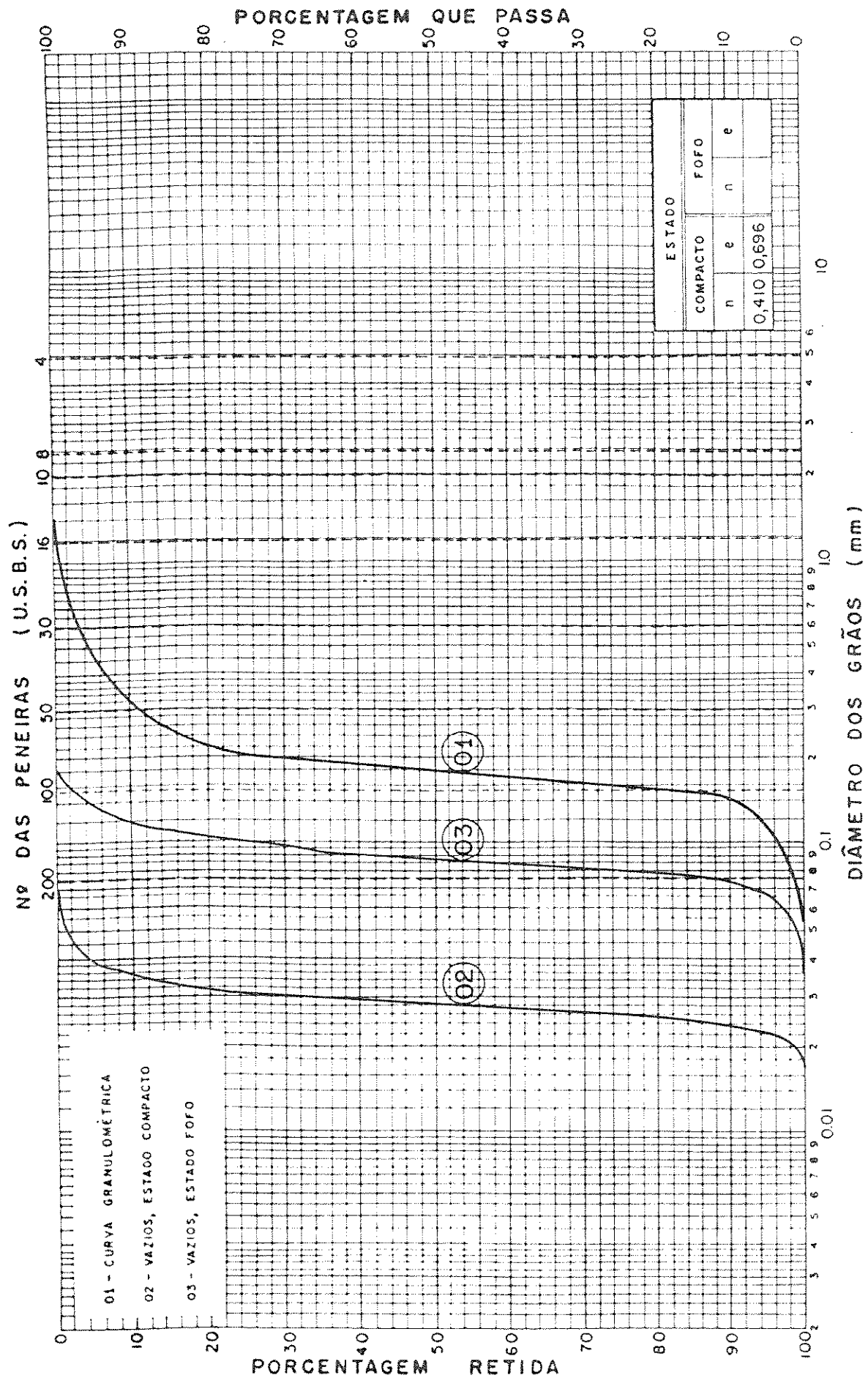
5.1.3. Faixa granulométrica em estudo

A mistura das areias finas, médias e grossas, conforme já citado em 5.1.1, foi feita de maneira a resultar predominantemente em areias médias e grossas, já que Peixoto (20), embora tenha planejado estudar as areias finas, médias e grossas, ficou condicionado ao equipamento de que dispunha, e estudou a permeabilidade das areias finas e médias, e Felex (09), os materiais de granulometria mais grossa, variando de areia média a pedregulho.

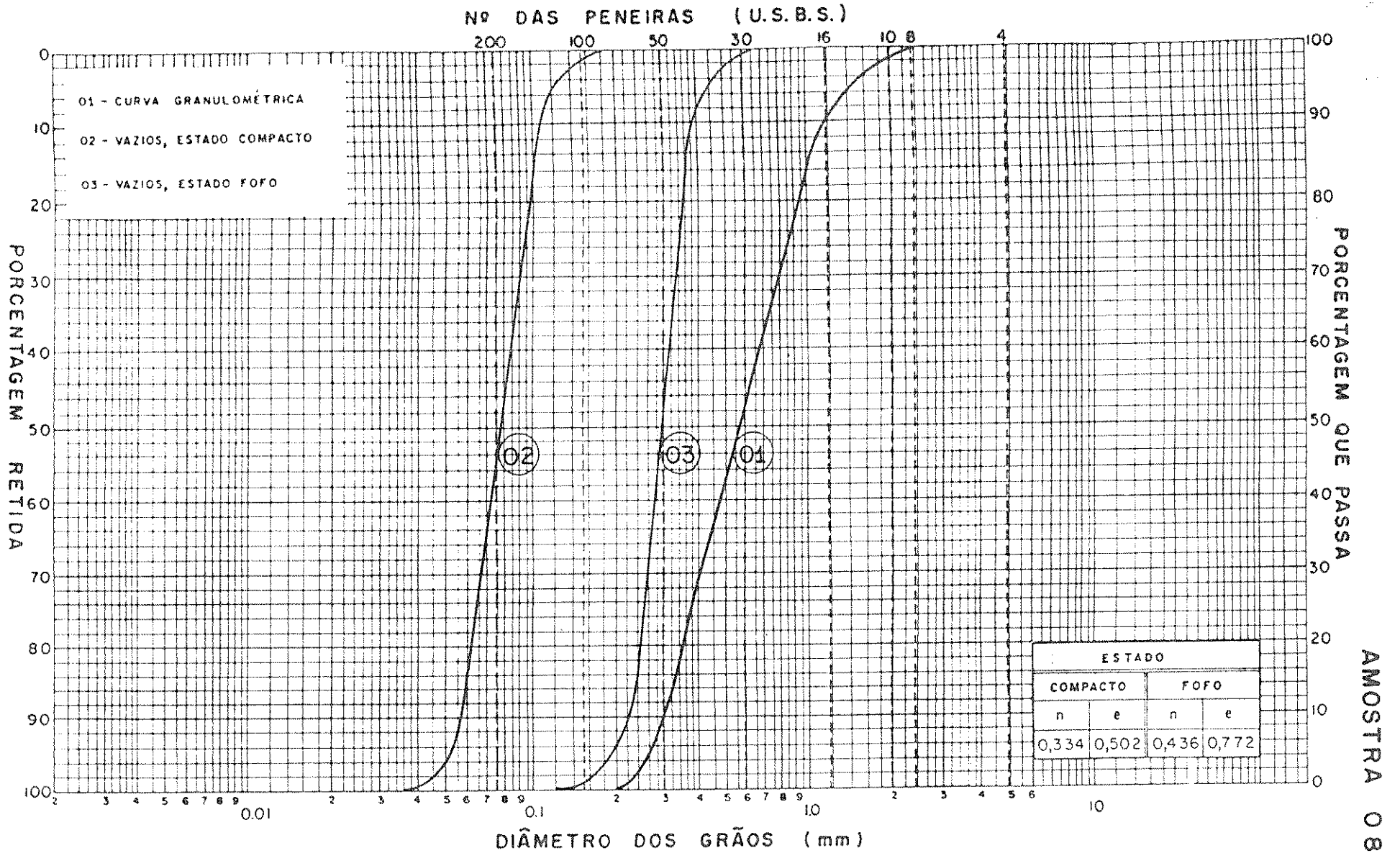
A seguir, são apresentadas as curvas granulométricas, e de distribuição de vazios (estado compacto e estado fôfo), para cada amostra ensaiada, correspondendo a cada amostra uma página.



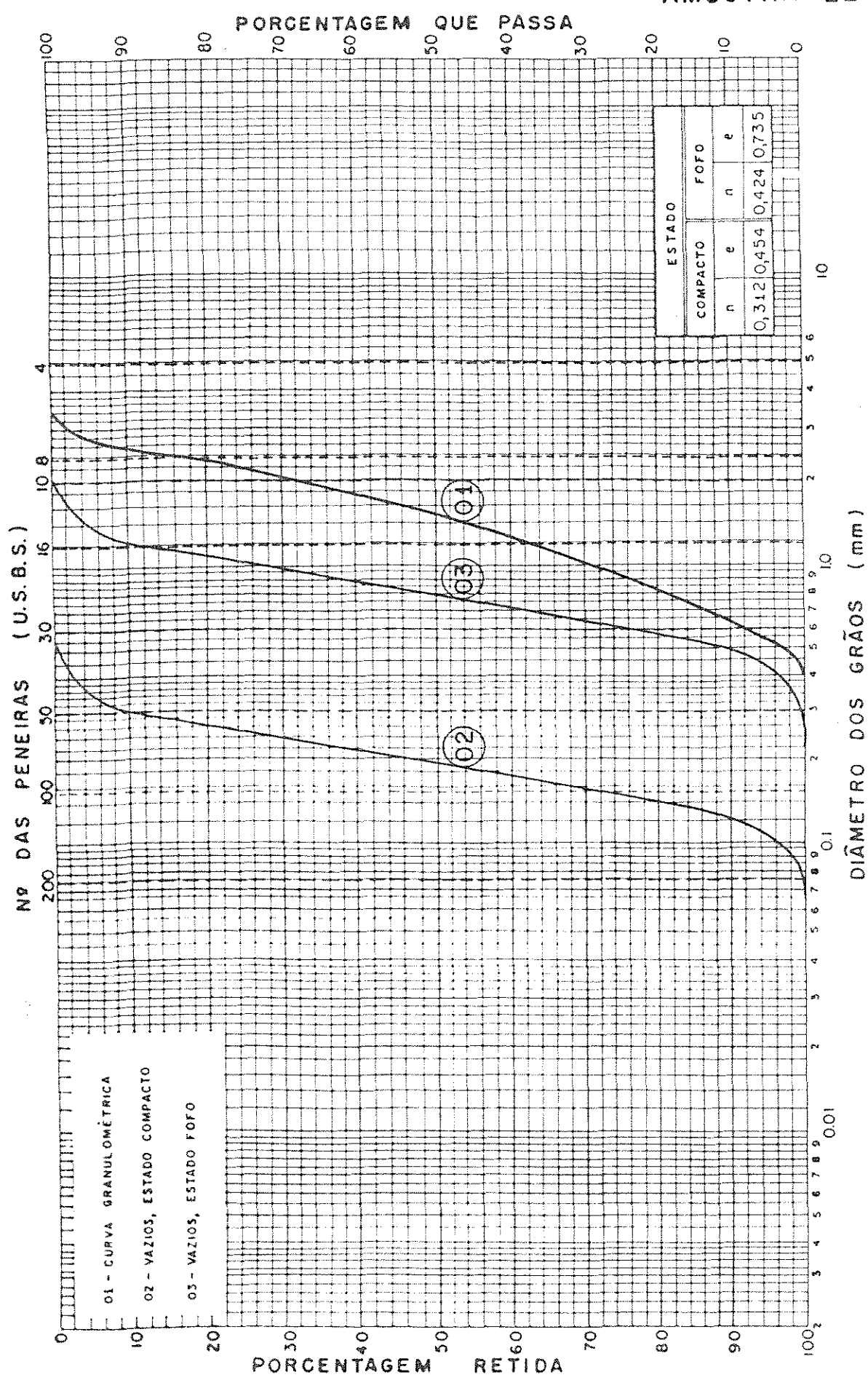
SILTE			AREIA			GROSSO			PEDREGULHOS		
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO



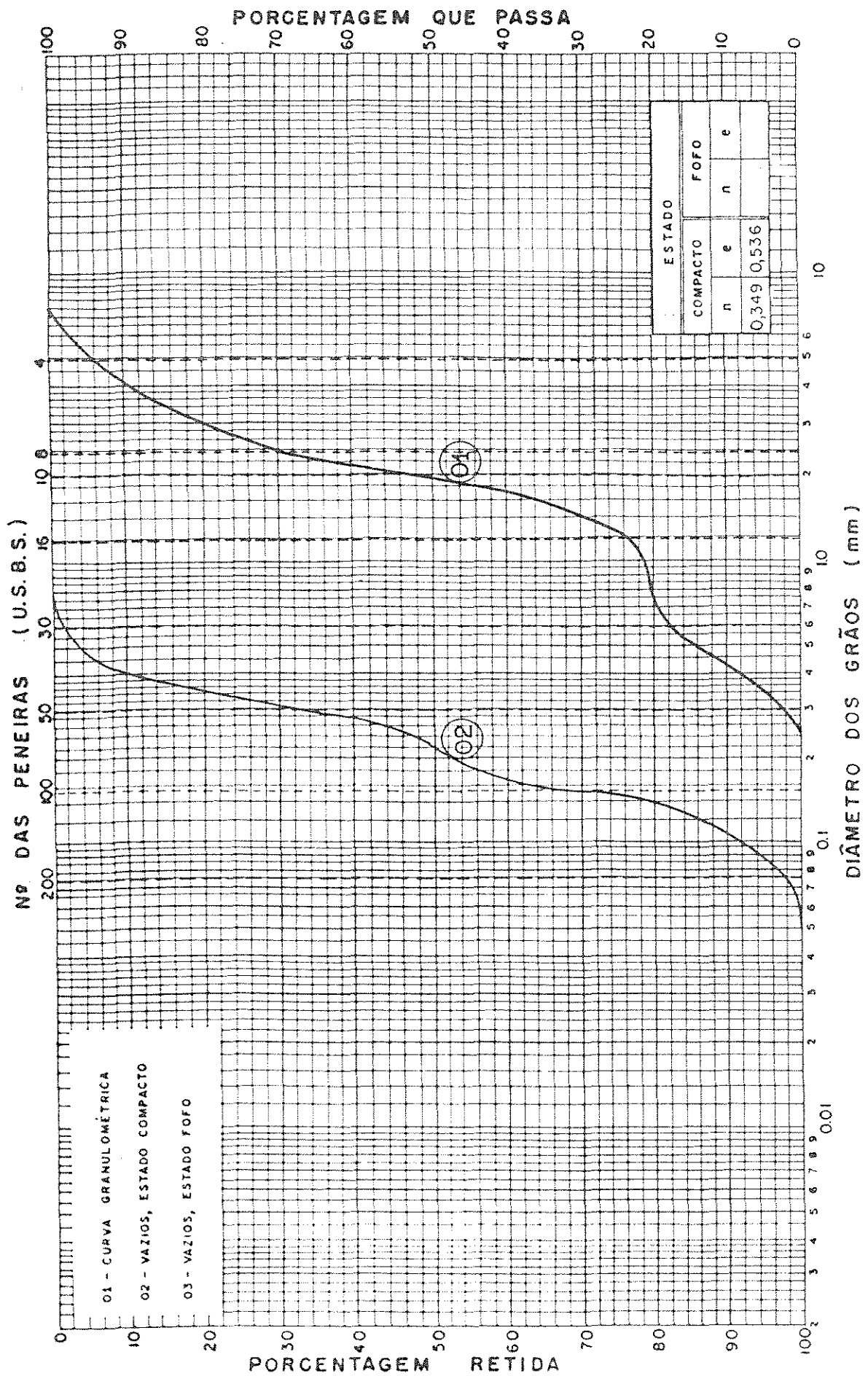
AREIA			PEDREGULHOS		
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO



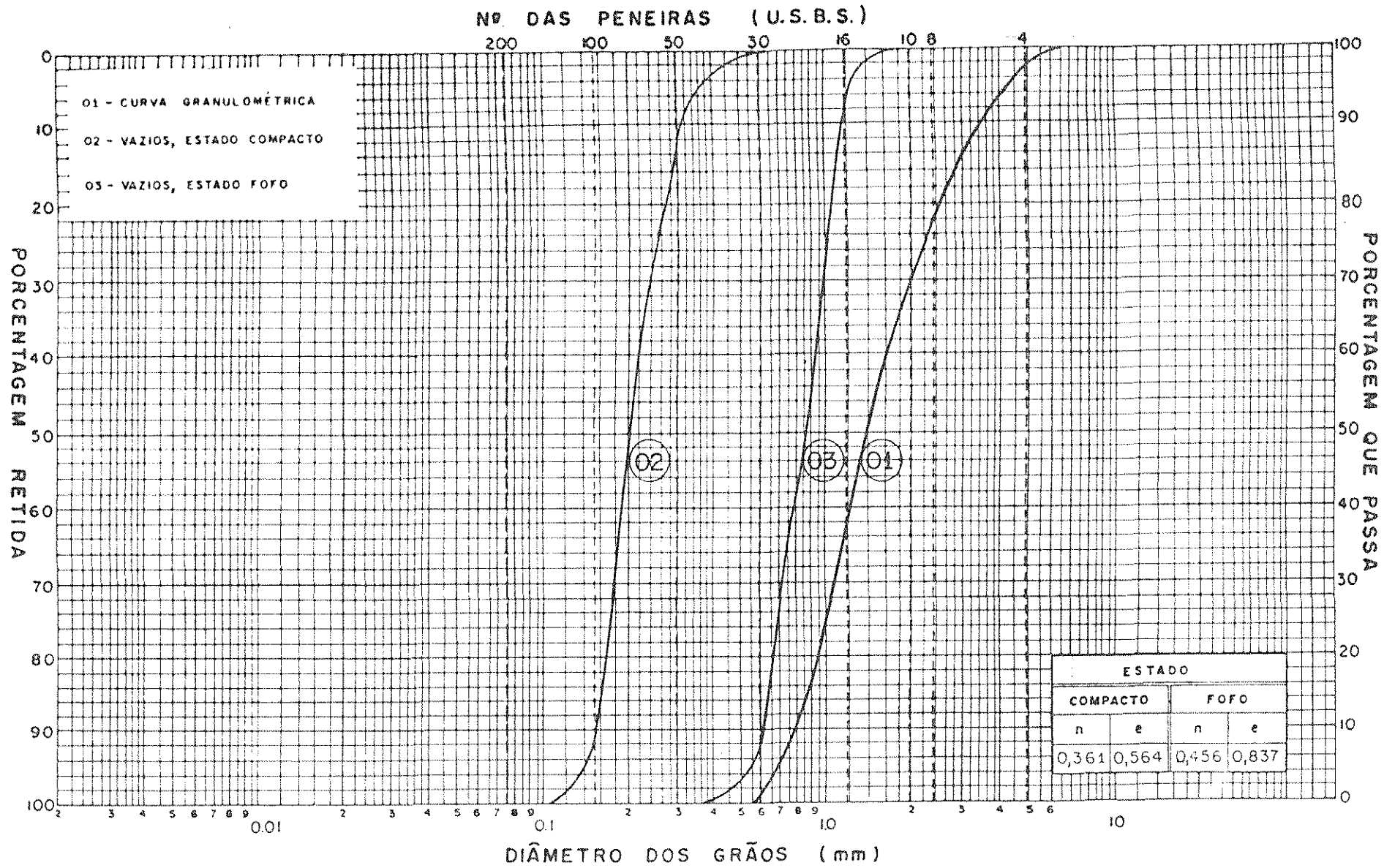
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS



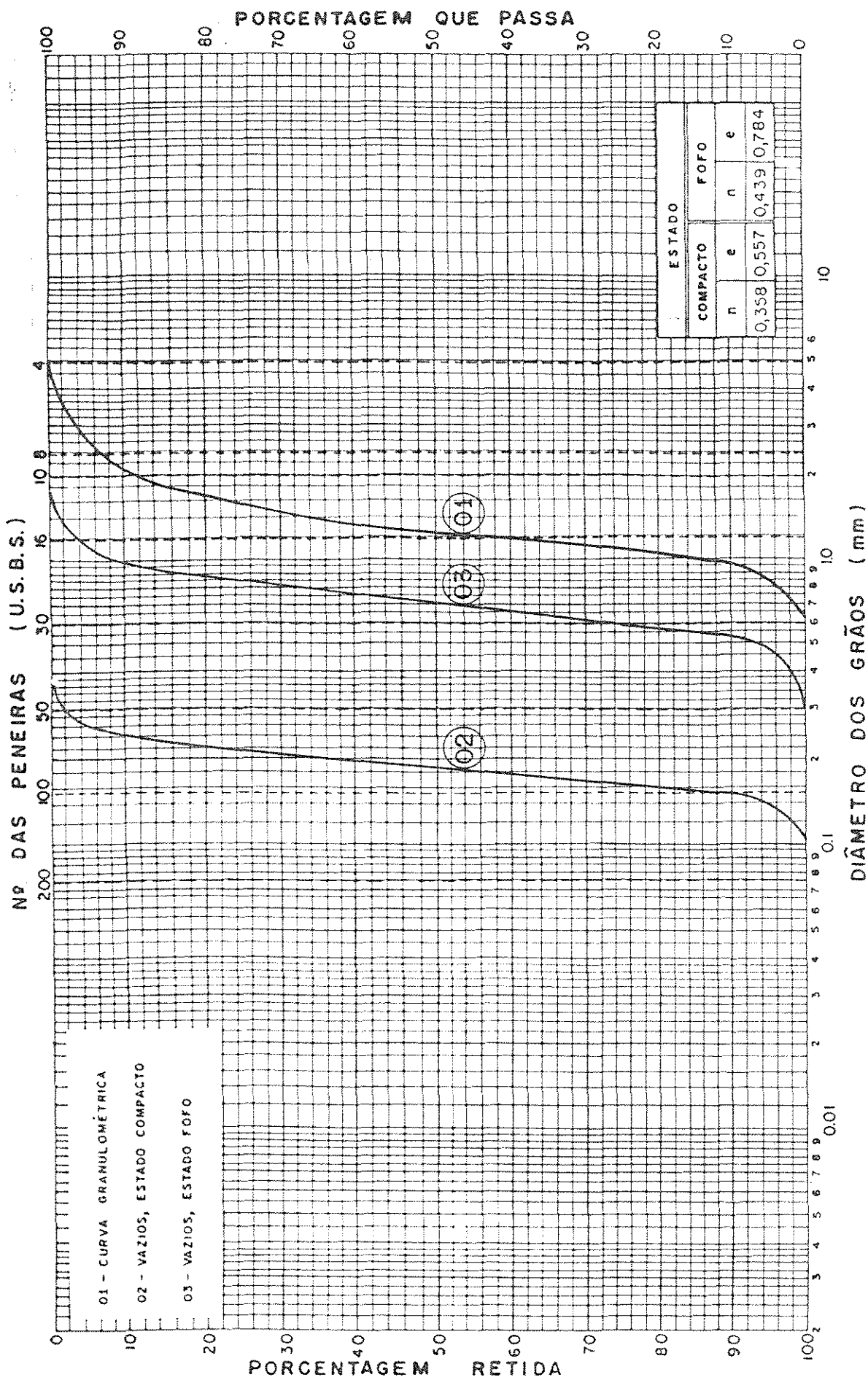
AREIA			PEDREGULHOS	
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	GROSSO



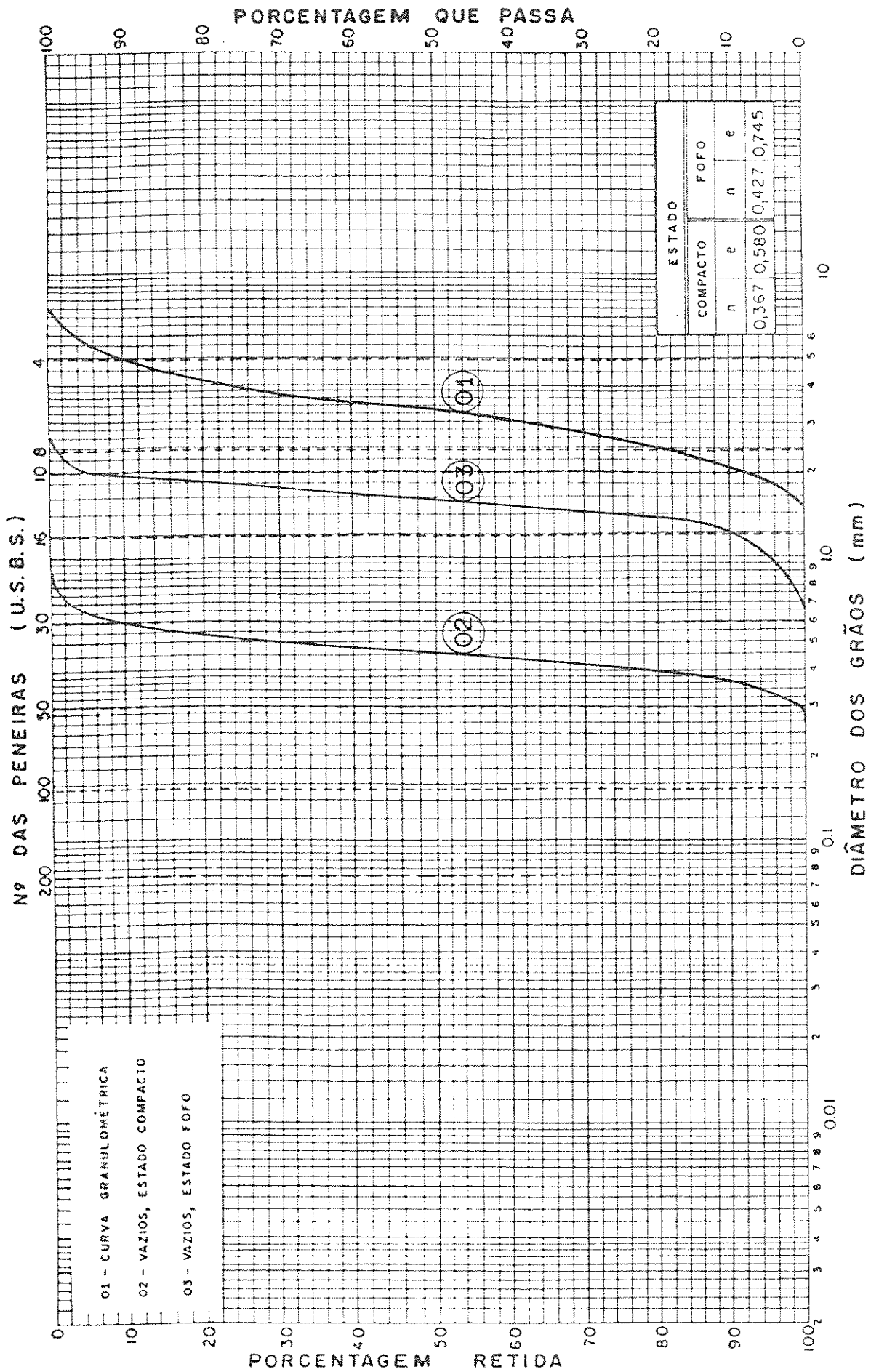
FINO		MÉDIO	GROSSO	GROSSO	
SILTE		AREIA		PEDREGULHOS	



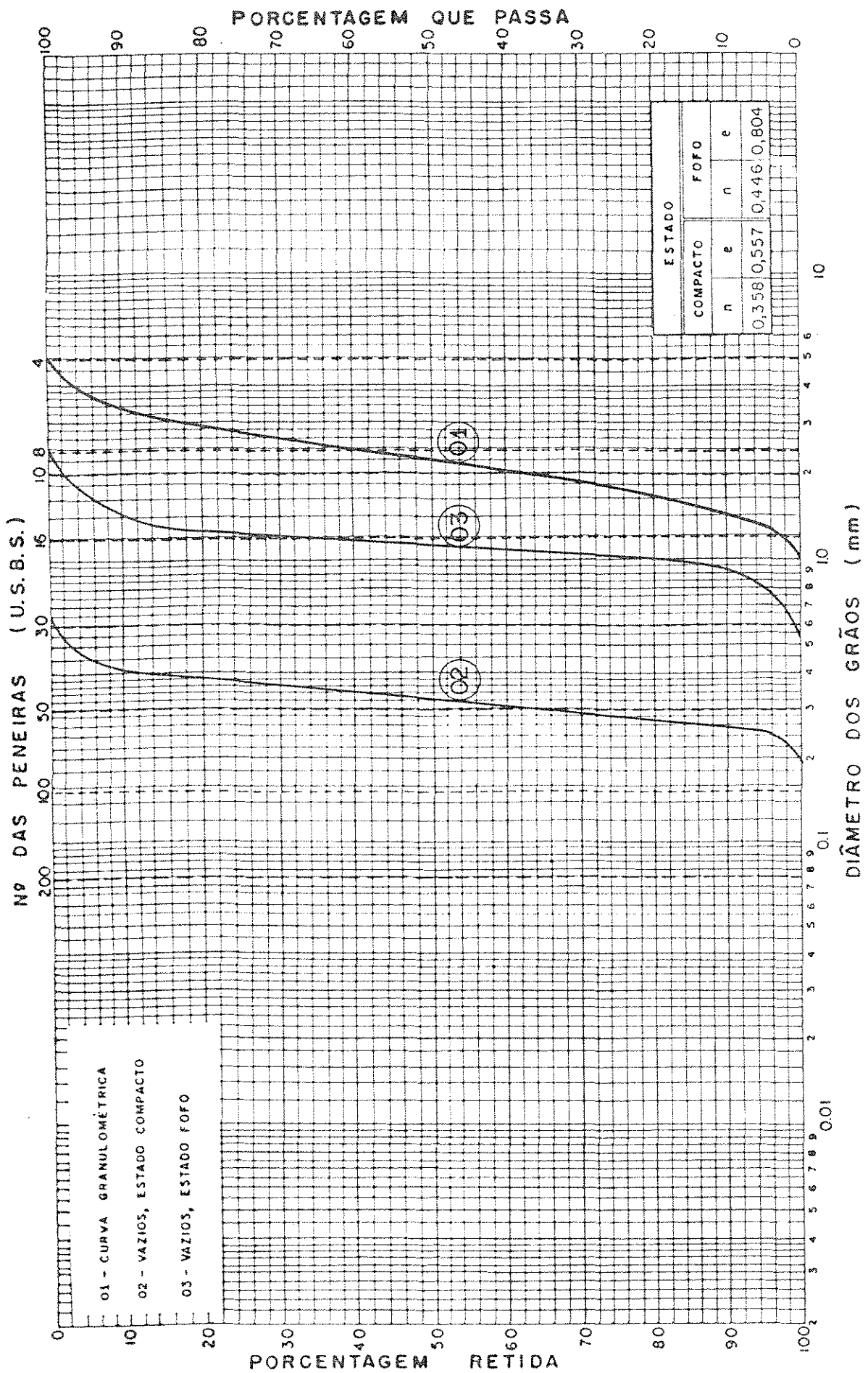
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS



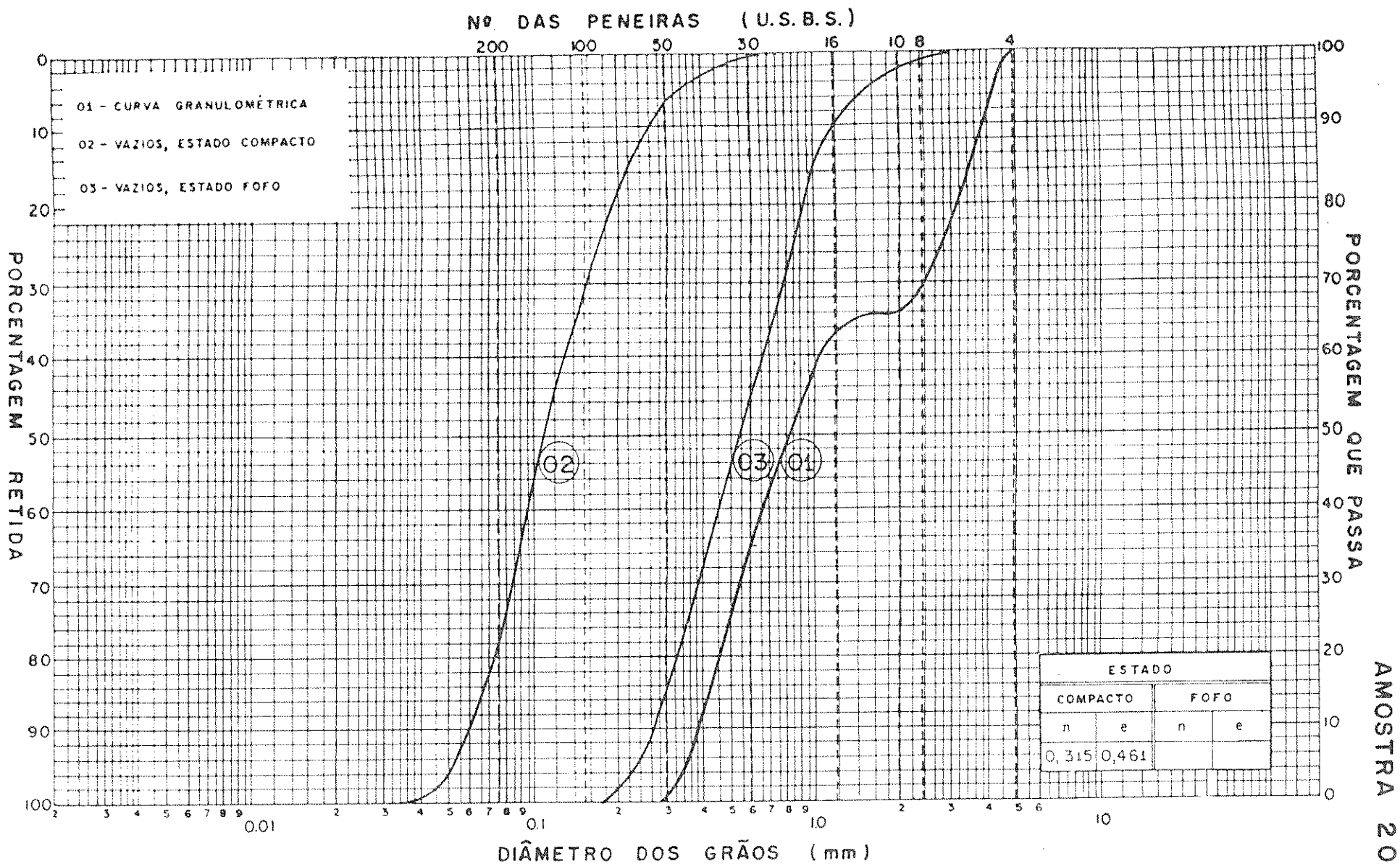
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS		
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO			



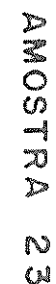
SILTE		AREIA		PEDREGULHOS	
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO



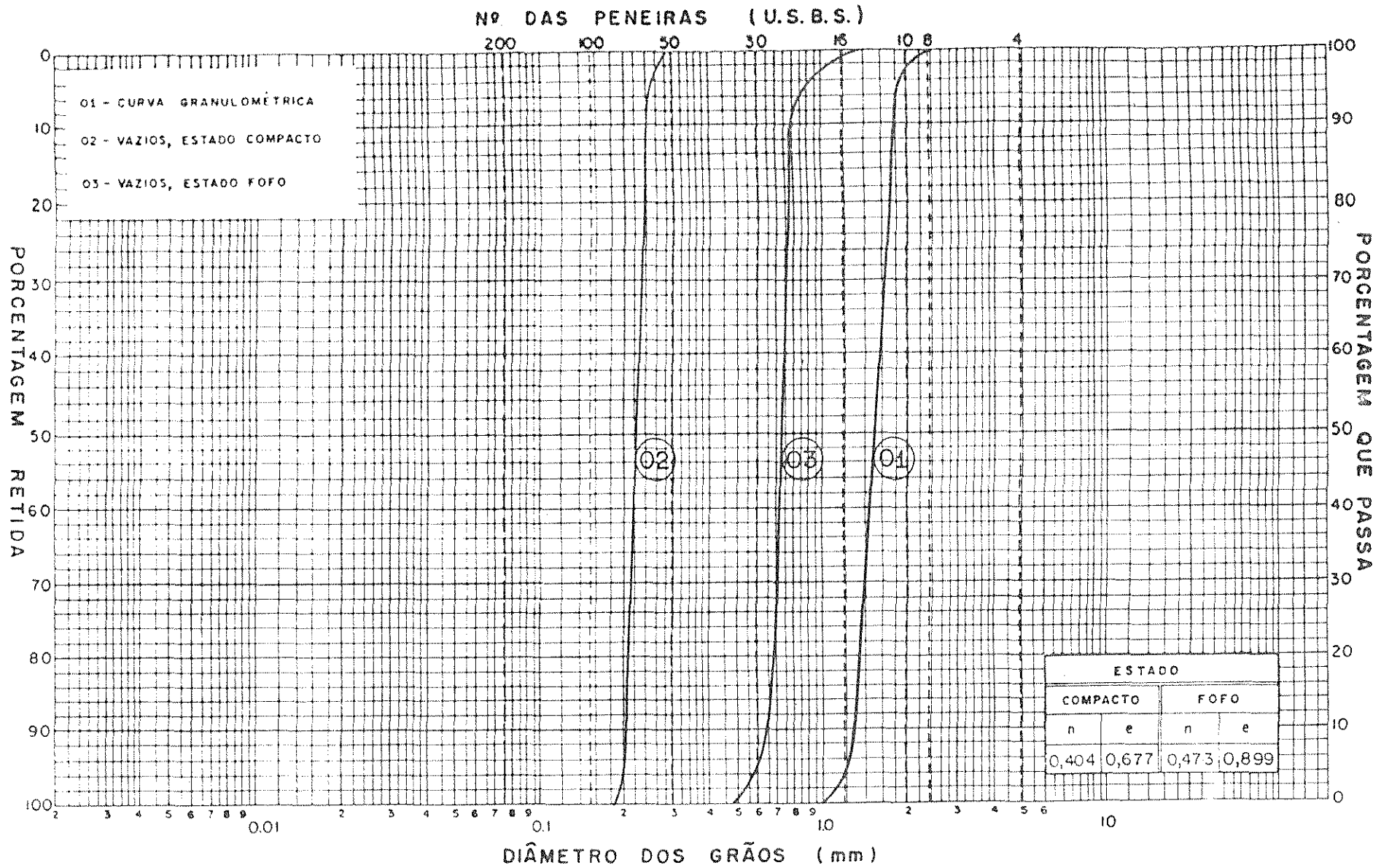
FINO		MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	PEDREGULHOS
SILTE		AREIA					



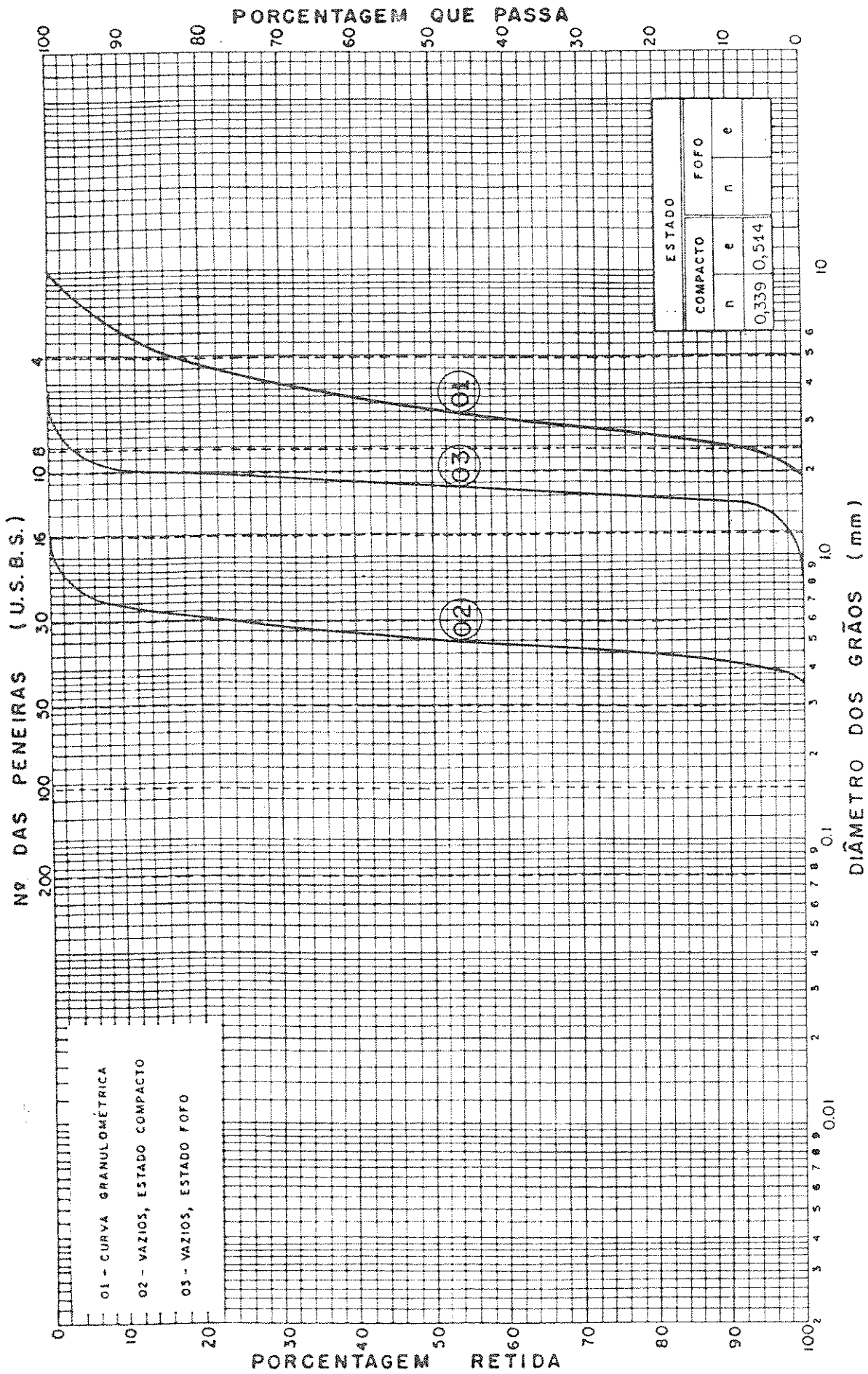
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS



FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS

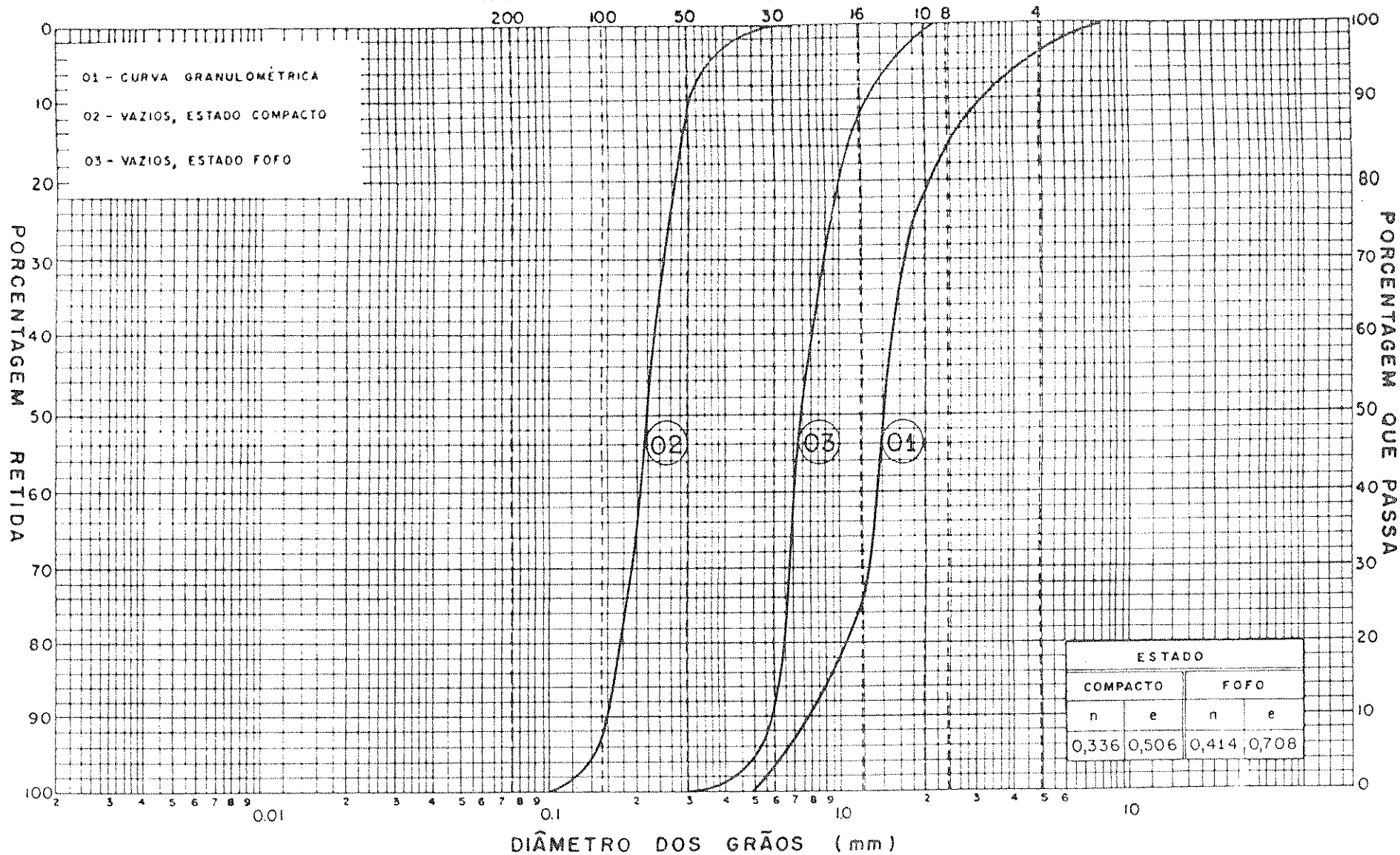


FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS

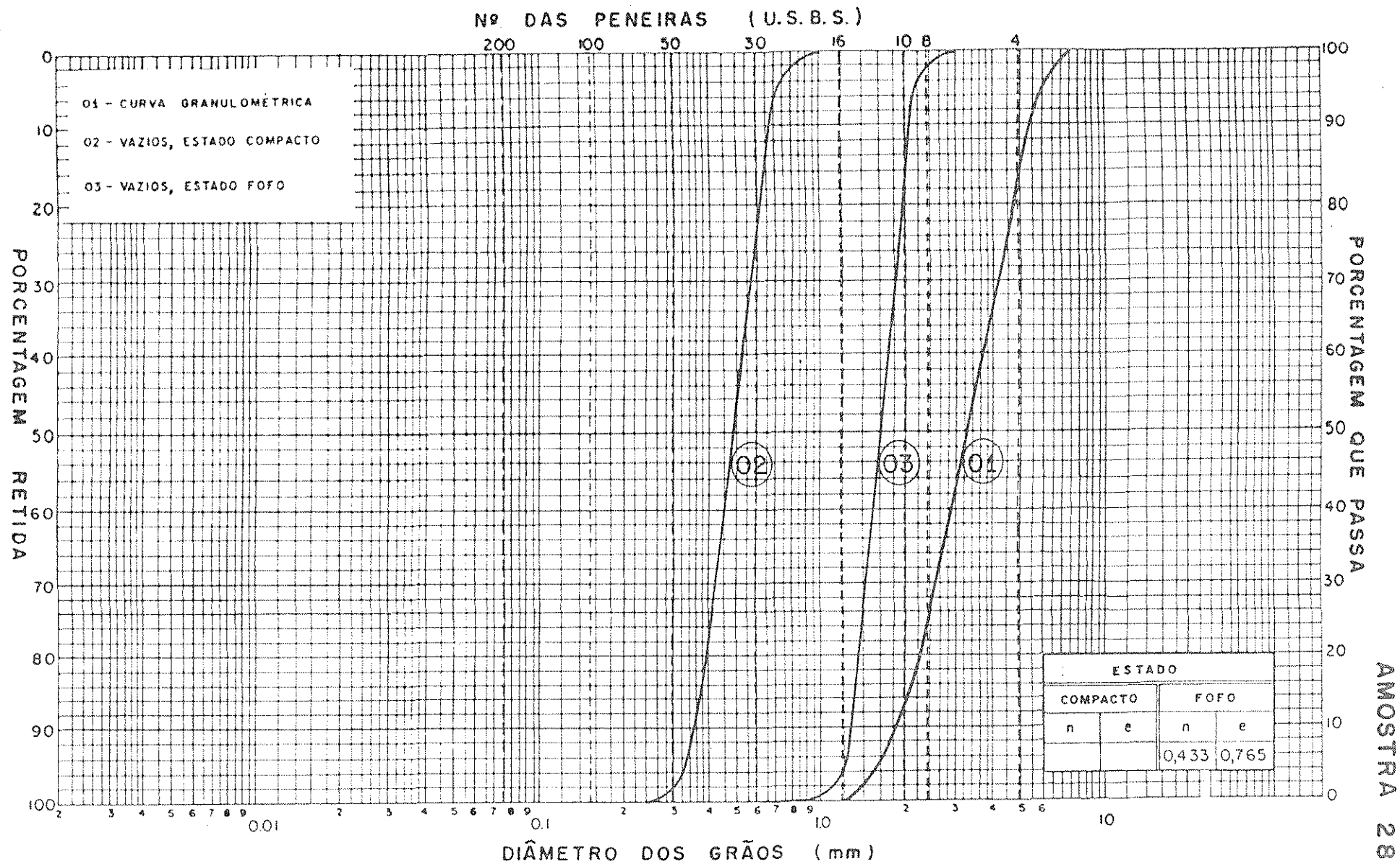


FINO		MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	PEDREGULHOS	
SILTE							AREIA	

Nº DAS PENEIRAS (U.S.B.S.)

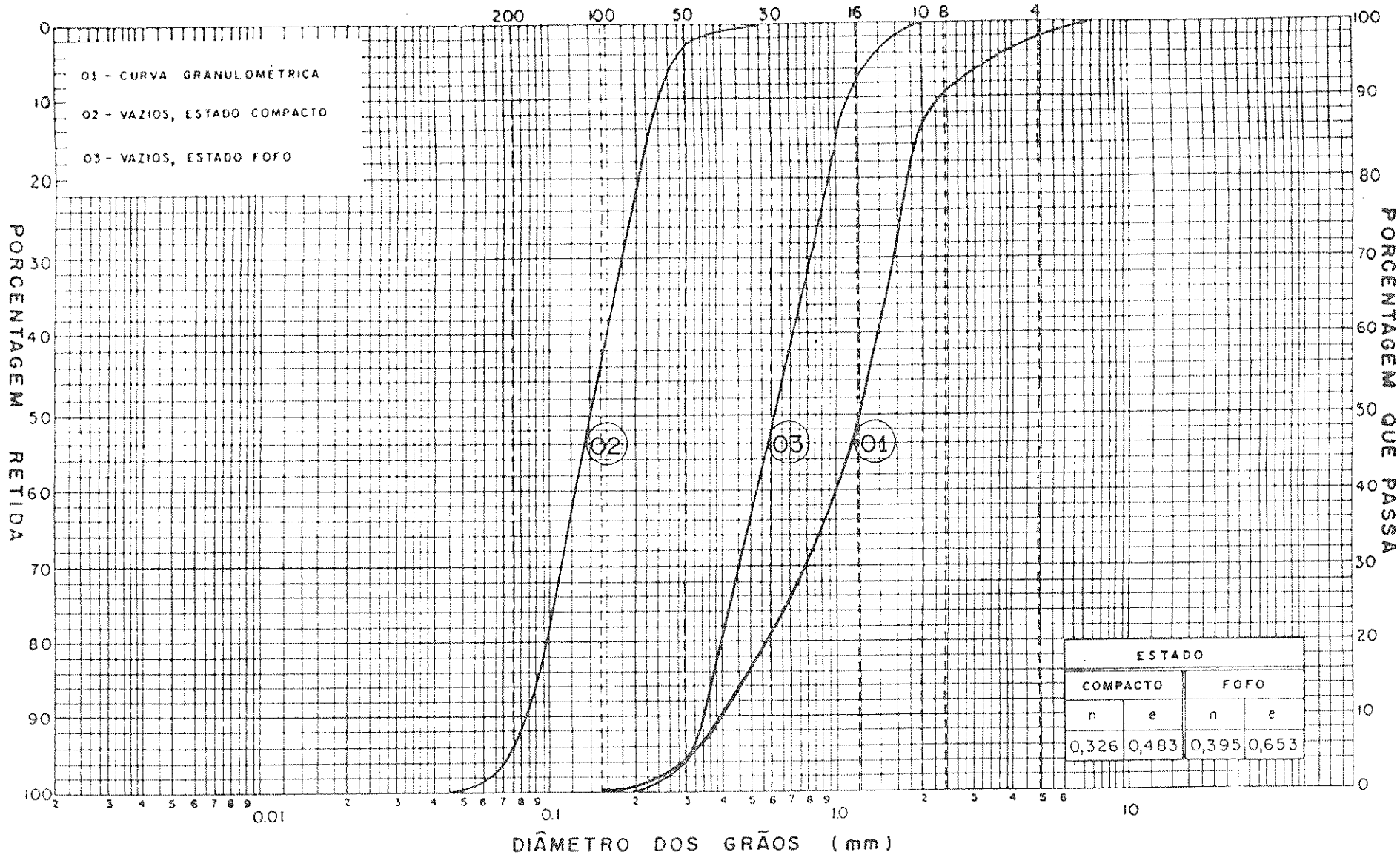


FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
	SILTE			AREIA		PEDREGULHOS



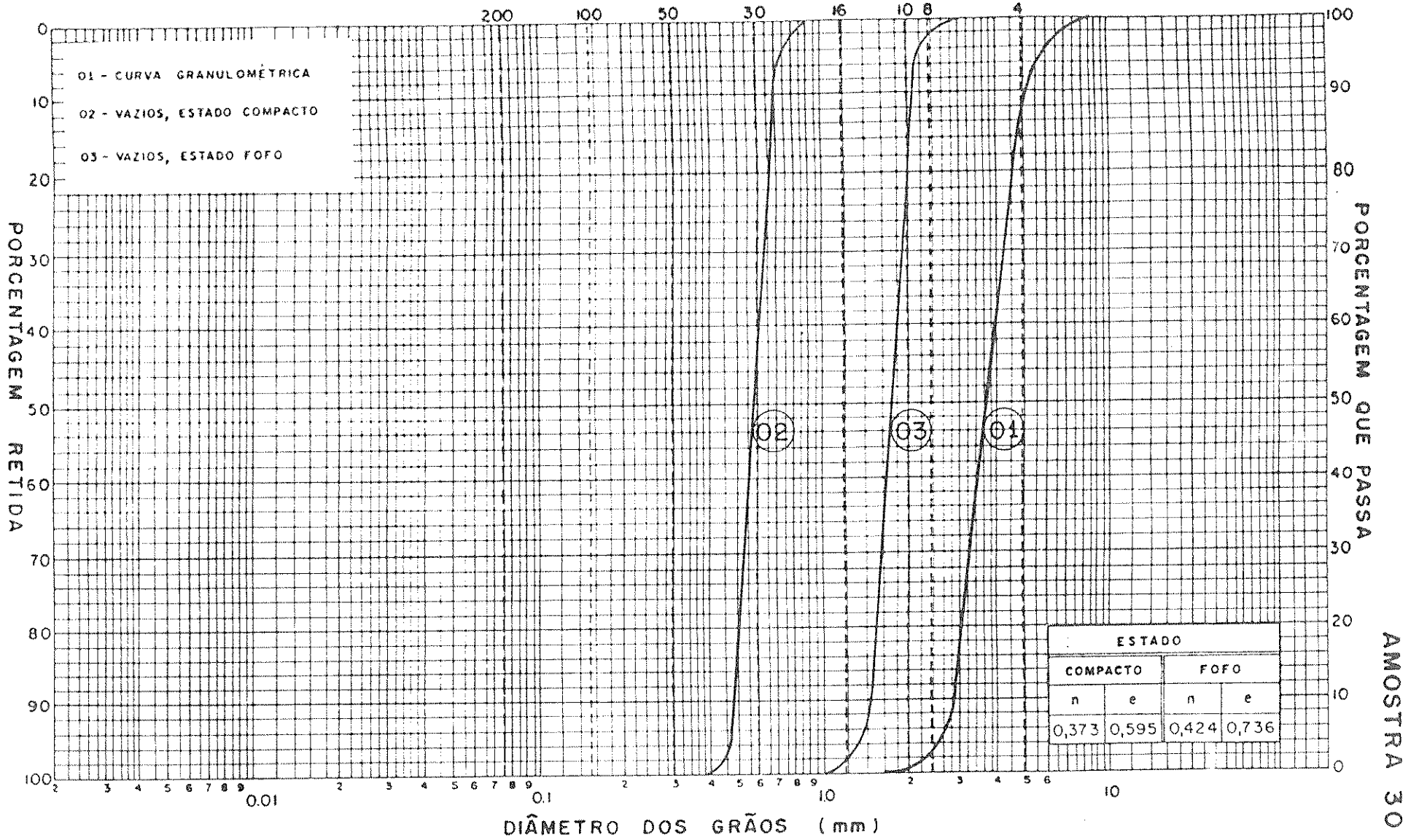
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	PEDREGULHOS
SILTE			AREIA			

Nº DAS PENEIRAS (U.S.B.S.)

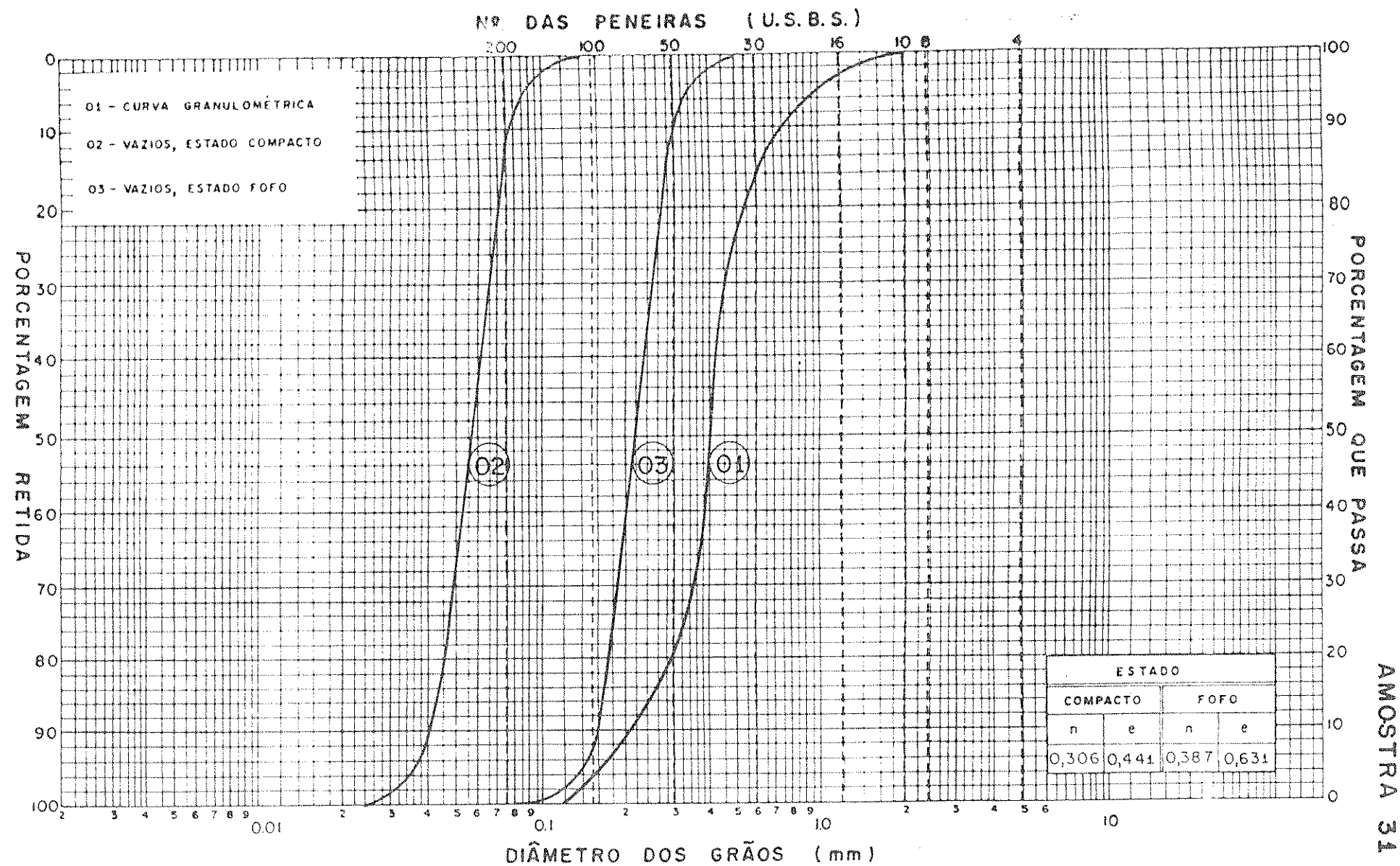


FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS

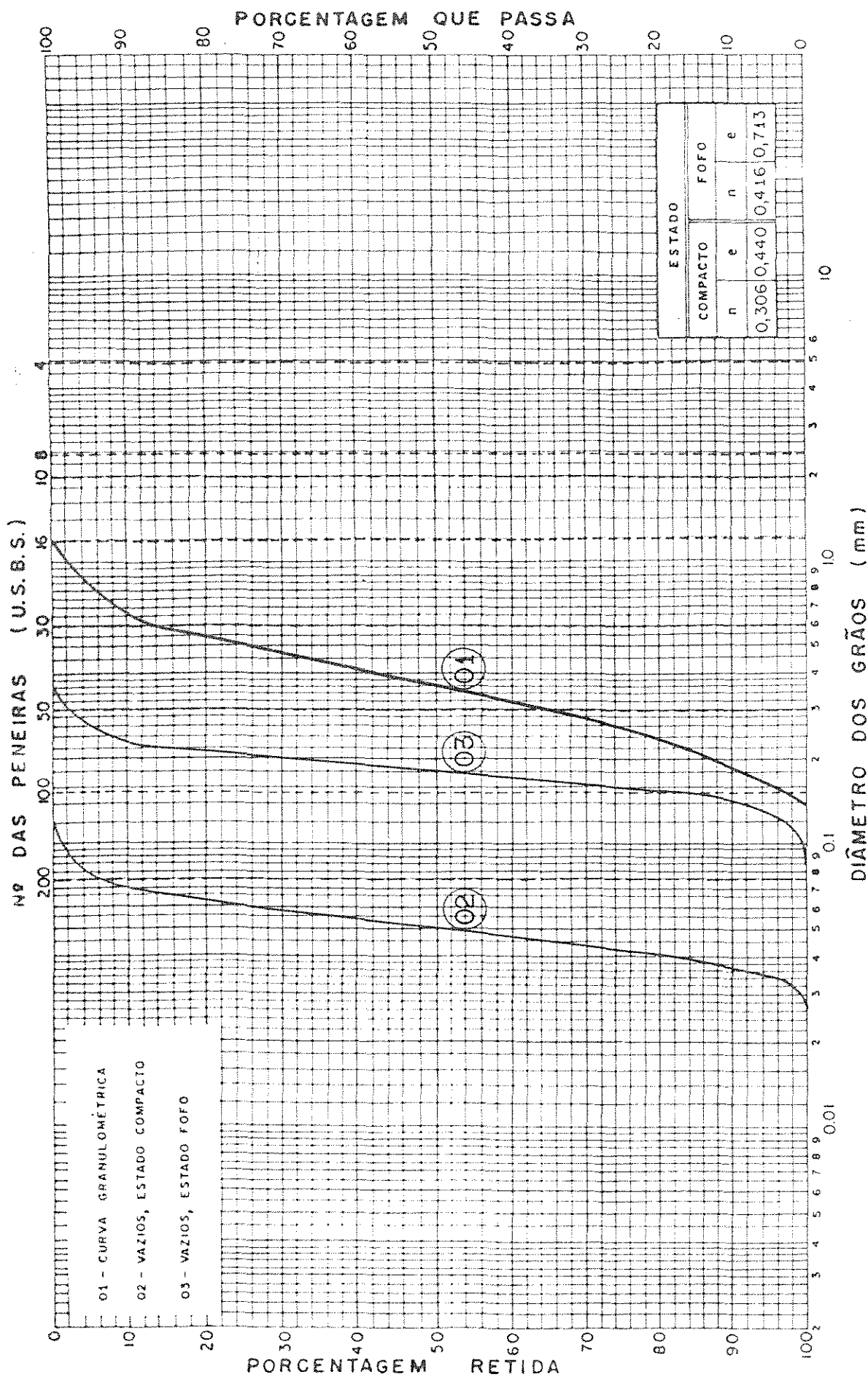
Nº DAS PENEIRAS (U.S.B.S.)



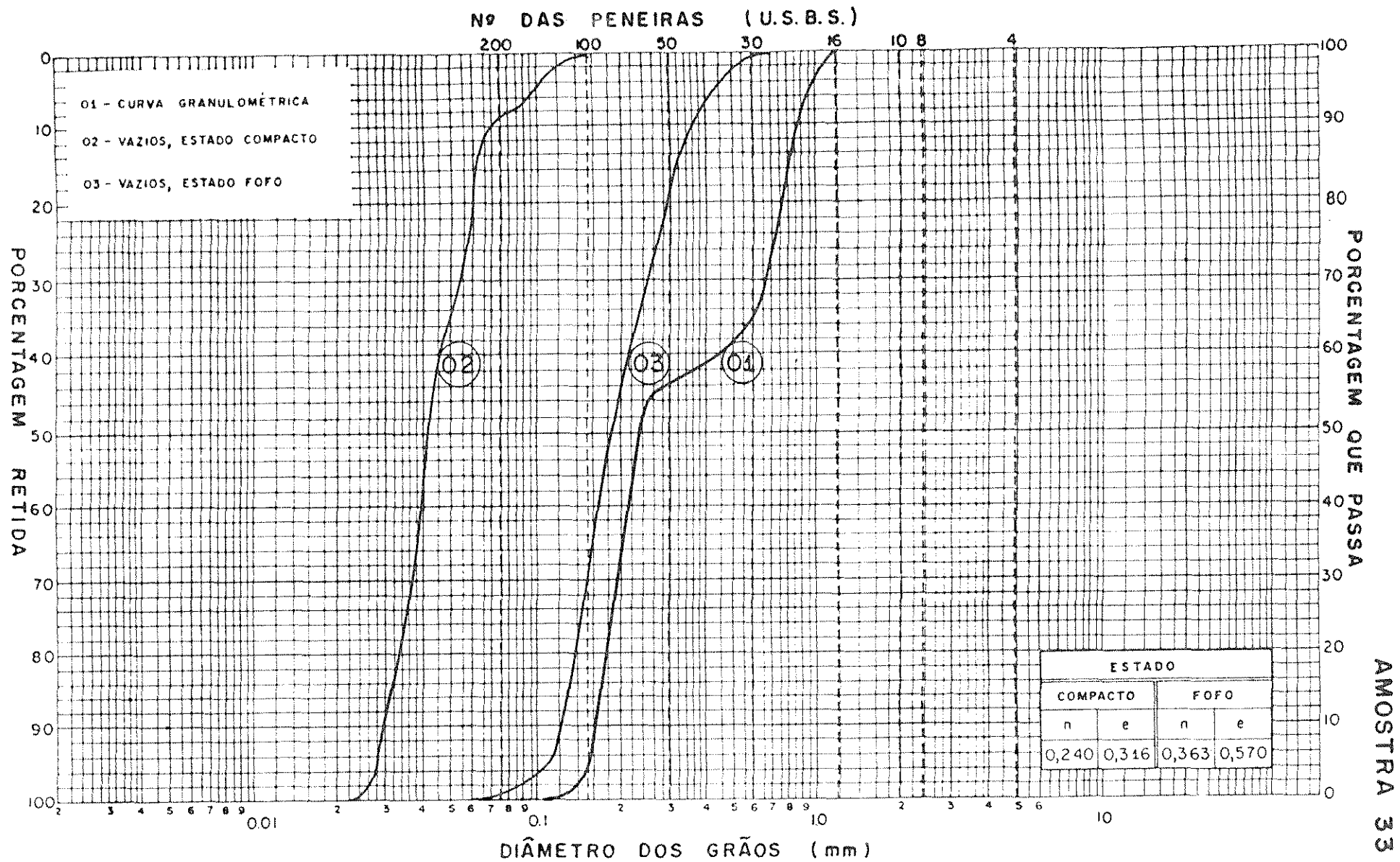
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS



FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS

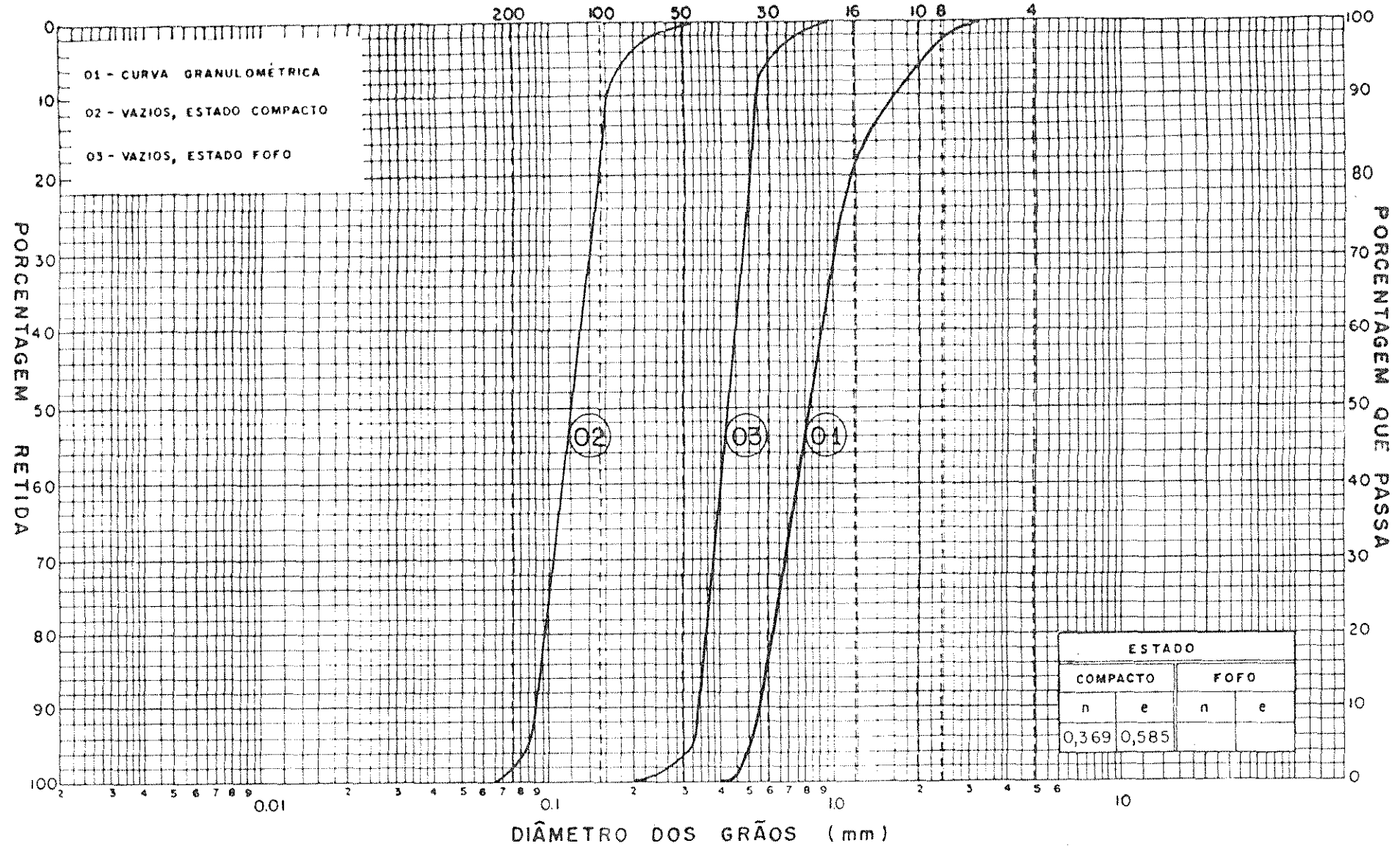


FINO		MÉDIO		GROSSO		MÉDIO		GROSSO		PEDREGULHOS	
SILTE						AREIA					



FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS

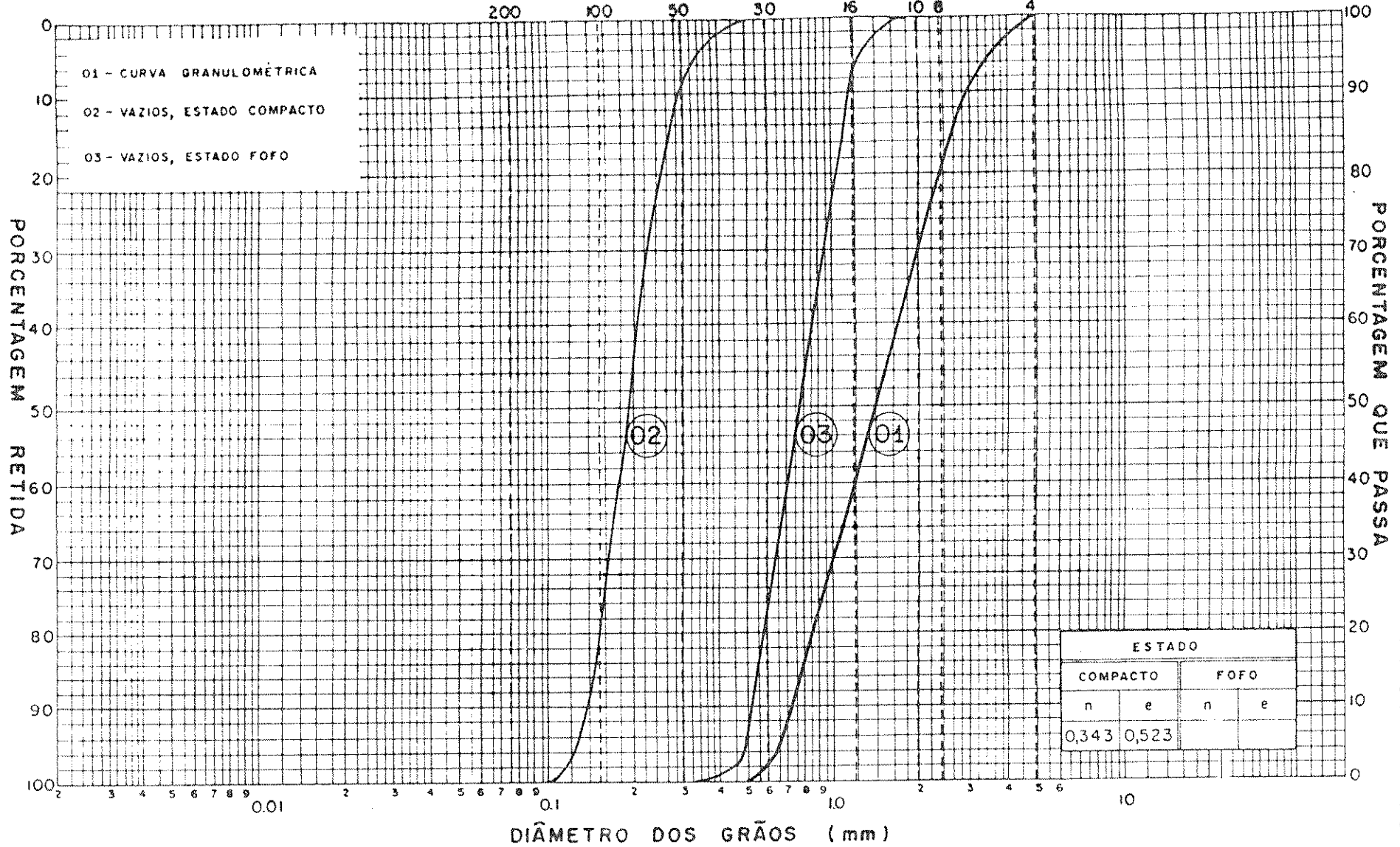
Nº DAS PENEIRAS (U.S.B.S.)



ESTADO			
COMPACTO		FOFO	
n	e	n	e
0,369	0,585		

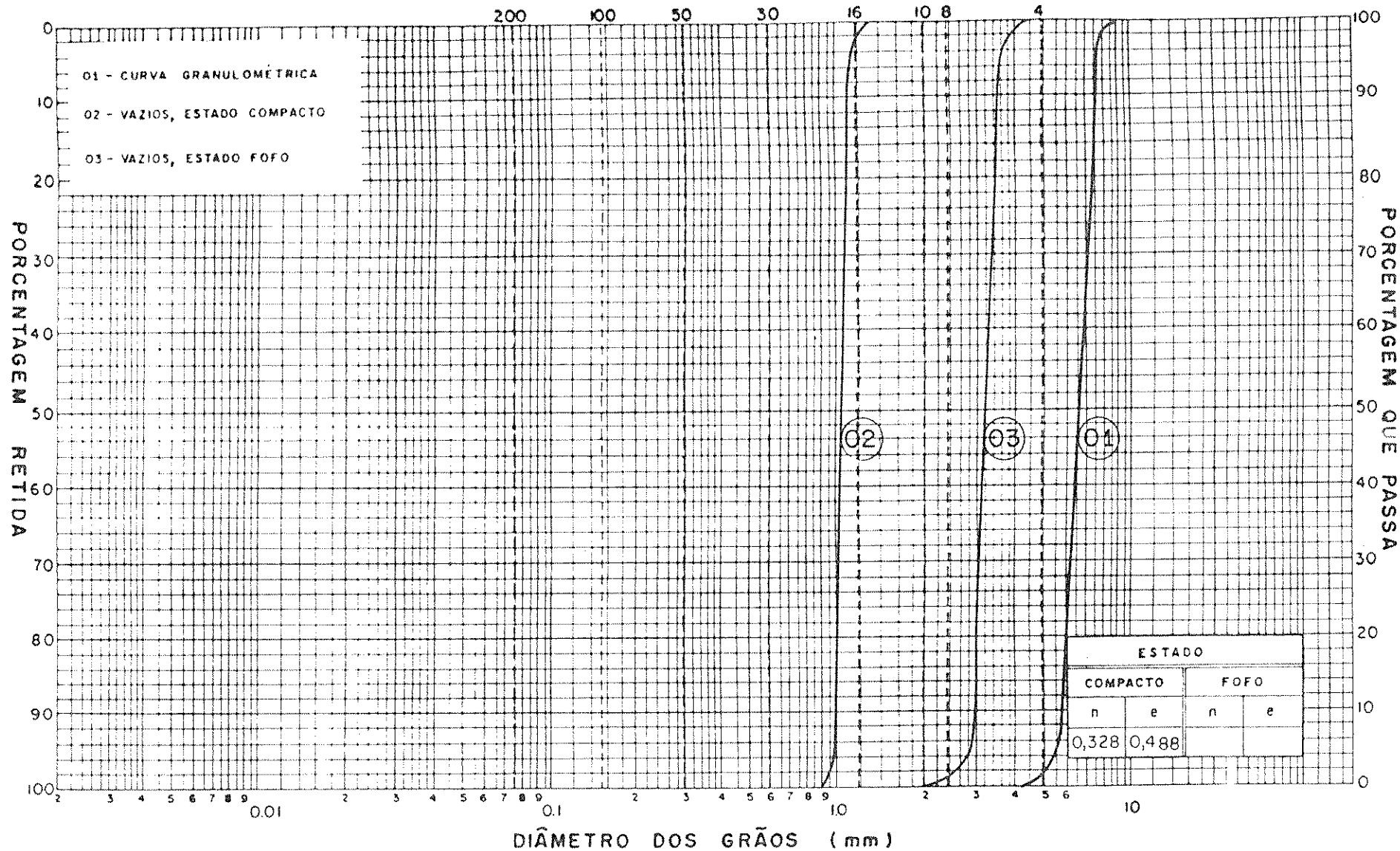
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
	SILTE			AREIA		PEDREGULHOS

Nº DAS PENEIRAS (U.S.B.S.)



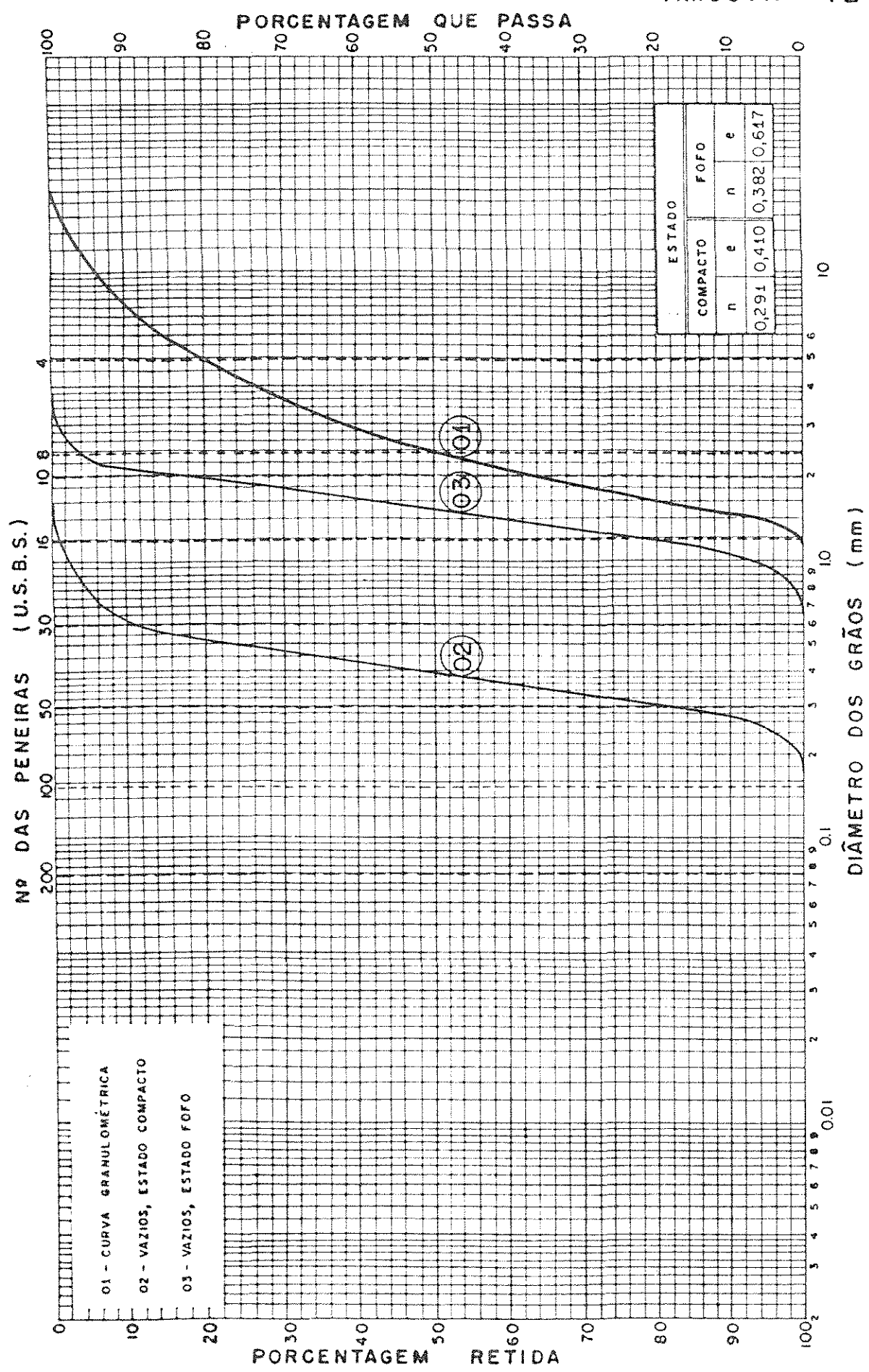
FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS

Nº DAS PENEIRAS (U.S.B.S.)

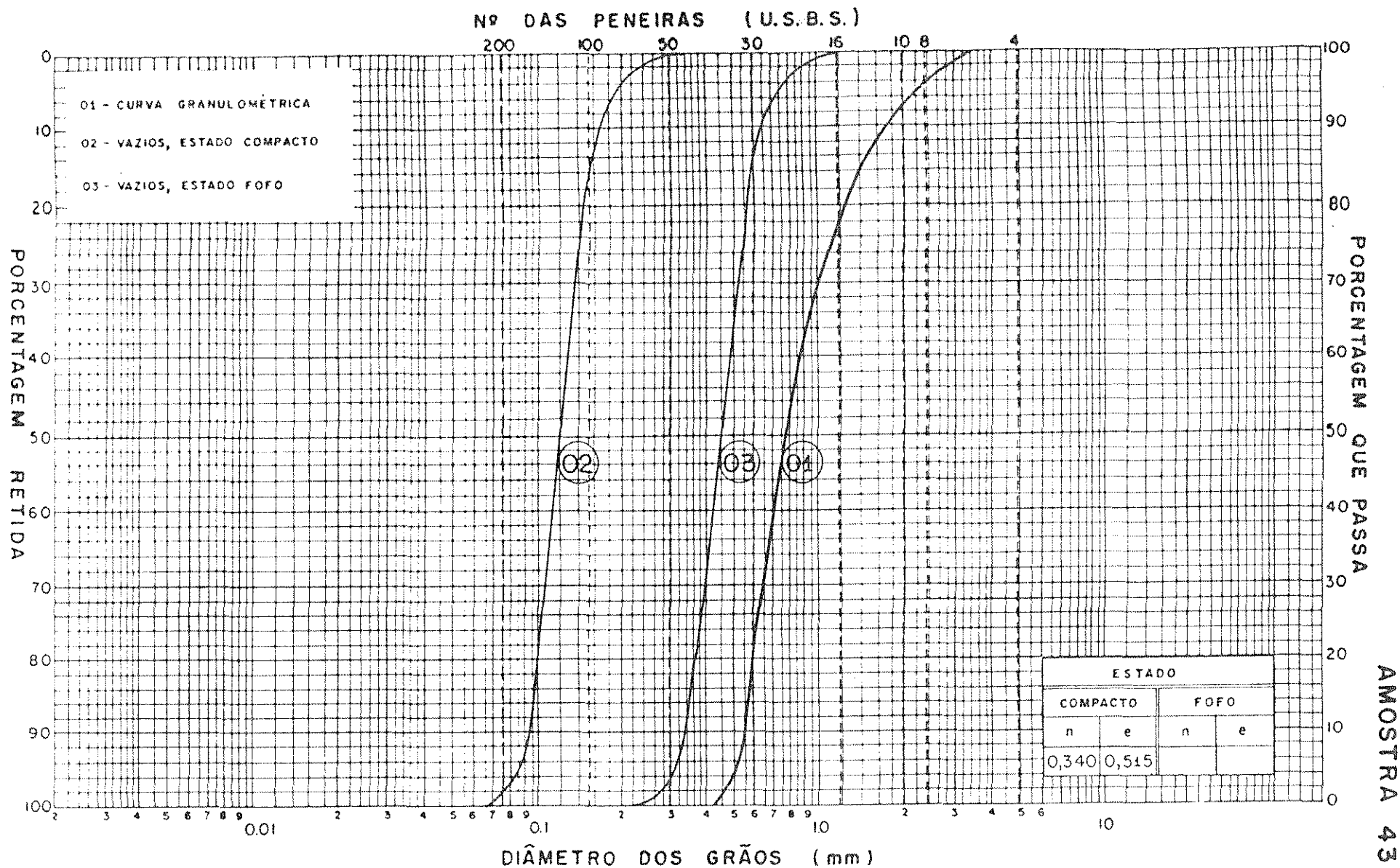


AMOSTRA 38

FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
SILTE			AREIA			PEDREGULHOS



FINO		MÉDIO	GROSSO	GROSSO	
SILTE		AREIA		PEDREGULHOS	



FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO	
	SILTE			AREIA		PEDREGULHOS

5.1.4. Permeâmetro

O permeâmetro utilizado para a execução dos ensaios necessários à elaboração deste trabalho, é de lucite transparente, cilíndrico, e tem as seguintes medidas:

D = diâmetro interno = 11,40 cm

L = comprimento = 9,38 cm

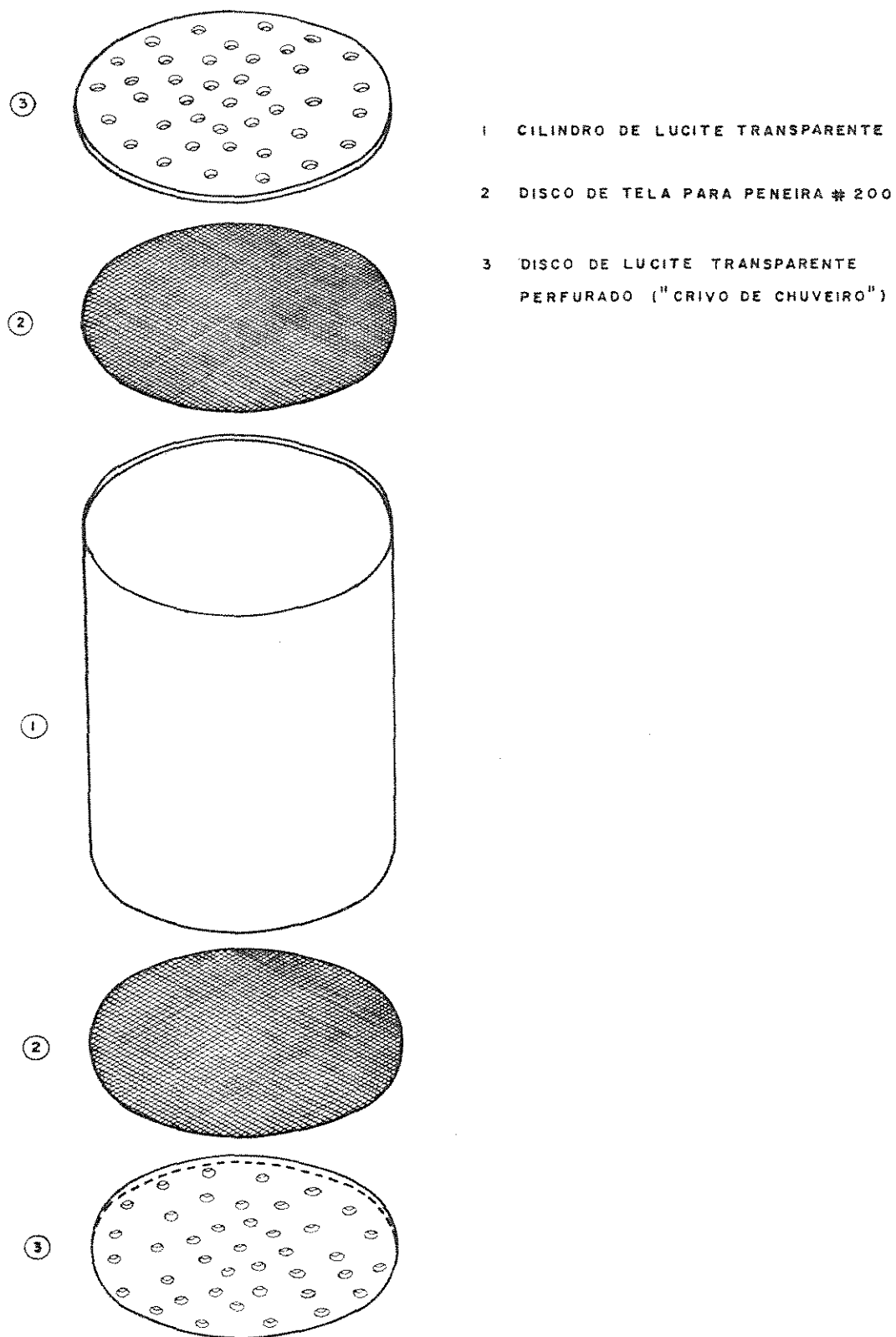
A = área da secção transversal = 102,10 cm²

V = volume interno = 957,40 cm³

A transparência das paredes do permeâmetro era absolutamente necessária, para permitir o controle visual da existência de bolhas de ar nas amostras. O controle visual das bolhas, na verdade, foi um controle adicional na execução dos ensaios, pois foi tomada uma série de precauções para a eliminação destas bolhas, durante a moldagem dos corpos de prova, conforme está exposto no capítulo seguinte (5.2. Métodos).

Ainda assim, vários ensaios foram repetidos devido à presença de bolhas de ar nas amostras, nas paredes do permeâmetro ou nos vários condutos transparentes, existentes no equipamento.

Na Fig. 5.1.4.1, é representado o corpo principal do permeâmetro, com todos os seus componentes, tal e qual foi utilizado para a execução dos ensaios de permeabilidade.



- FIGURA 5.1.4.1.

- Corpo principal do permeâmetro

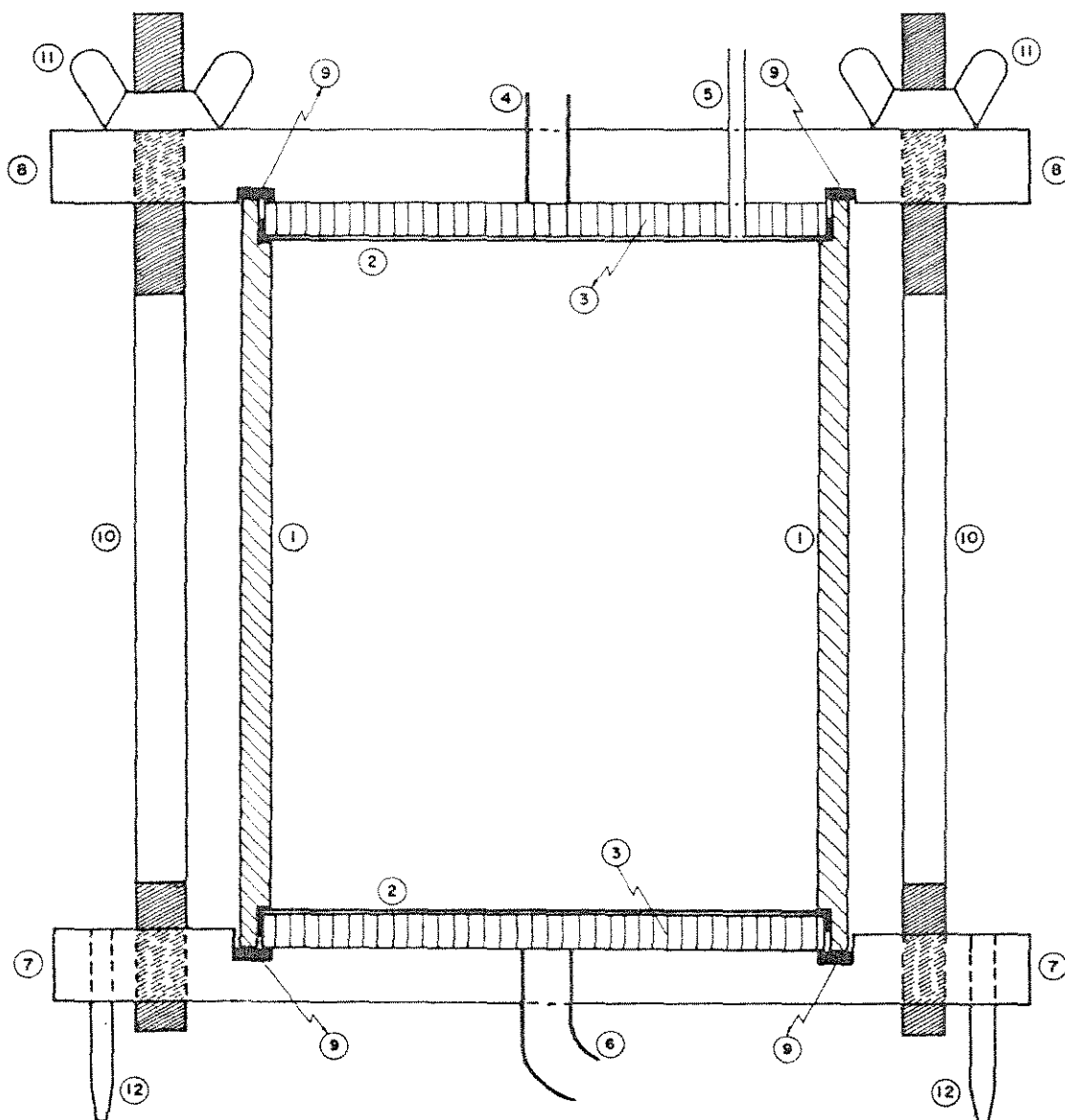
O corpo principal do permeâmetro é composto por um cilindro transparente de lucite, cuja parede interna é dotada de uma reentrância na parte superior (topo do cilindro), e outra idêntica na parte inferior (base do cilindro), por duas peças circulares feitas de tela própria para peneira # 200, e por dois discos perfurados de lucite.

Nessas reentrâncias, são encaixadas primeiramente as duas peças circulares feitas de tela para peneira # 200. Exteriormente a elas, são ajustados os dois discos de lucite, feitos com diâmetro tal que se encaixam bem apertados nas reentrâncias existentes. Os discos de lucite são perfurados, como se fossem verdadeiros crivos de chuveiro, para que não acontecesse uma concentração de fluxo pela parte central da amostra.

As peças feitas de tela própria para peneira # 200 foram utilizadas para evitar que, partículas mais finas de solo, passassem pelos furos dos discos de lucite, alterando assim as condições do corpo de prova durante um determinado ensaio. Foi constatado também que o uso da peneira contribuiu sobremaneira para uma maior difusão do fluxo de água pelo corpo de prova.

O corpo principal do permeâmetro é fixado numa base de latão, cuja parte inferior é provida de uma ranhura circular, na qual é afixada uma junta de borracha.

Na Fig. 5.1.4.2, é representado o permeâmetro já fixo na base de latão, tal e qual foi utilizado para a execução dos ensaios.



I. CORPO PRINCIPAL DO PERMEÂMETRO

- ① - CILINDRO DE LUCITE TRANSPARENTE
- ② - DISCO DE TELA PARA PENEIRA # 200
- ③ - DISCO DE LUCITE, TRANSPARENTE, PERFURADO ("CRIVO DE CHUVEIRO")

II. BASE

- ④ - ENTRADA OU SAÍDA DE ÁGUA
- ⑤ - ELIMINADOR DE BOLHAS DE AR E MEDIDOR DE PRESSÃO DA ÁGUA

- ⑥ - ENTRADA E SAÍDA DE ÁGUA
- ⑦ - BASE DE LATÃO
- ⑧ - TAMPA DE LUCITE, TRANSPARENTE
- ⑨ - JUNTA DE BORRACHA
- ⑩ - PARAFUSO PARA FIXAÇÃO E AJUSTE DO PERMEÂMETRO
- ⑪ - PORCAS PARA APERTO DO PERMEÂMETRO
- ⑫ - PÉS DO PERMEÂMETRO

- FIGURA 5.1.4.2.

- Permeâmetro montado na sua base

No centro da base, existe um orifício que permite a passagem do fluxo de água que percola pelo corpo de prova.

A base é provida de três pés para apoio na bancada de ensaio, assim como de três parafusos longos destinados à fixação e aperto do permeâmetro.

Na ranhura circular da base, sobre a junta de borracha, é fixada a parte inferior do permeâmetro.

Para fixar a parte superior do permeâmetro, existe uma tampa circular de lucite, provida de uma ranhura na qual é fixada uma junta de borracha. Esta peça tem diâmetro maior que o diâmetro do permeâmetro, e é perfurada em três locais de sua periferia, para permitir a passagem dos três parafusos de fixação que estão presos à base de latão. Apresenta também um orifício central, pelo qual pode passar a água para execução do ensaio, assim como um orifício de menor diâmetro deslocado do centro da peça, destinado a expulsão de ar eventualmente existente no interior do permeâmetro, e à medida da pressão que atua no tampo da amostra.

Para a fixação, aperto e vedação do permeâmetro na base, procede-se da seguinte maneira:

- a. Montagem do permeâmetro - encaixe da tela e do disco de lucite perfurado nas reentrâncias da base e do tampo do permeâmetro.
- b. Fixação do permeâmetro - encaixe cuidadoso da base do permeâmetro na borracha da ranhura situada na base de latão.
- c. Fixação da tampa do permeâmetro - encaixe cuidadoso da tampa de lucite no tampo do permeâmetro. A

parede do permeâmetro deve se situar sobre a borraça da ranhura da tampa de lucite.

- d. Aperto do permeâmetro - com os orifícios da tampa de lucite encaixados nos três parafusos de fixação ligados à base de latão, é dado o aperto necessário nas três porcas, comprimindo assim a parede do permeâmetro entre a base de latão e a tampa de lucite.

5.2. Métodos

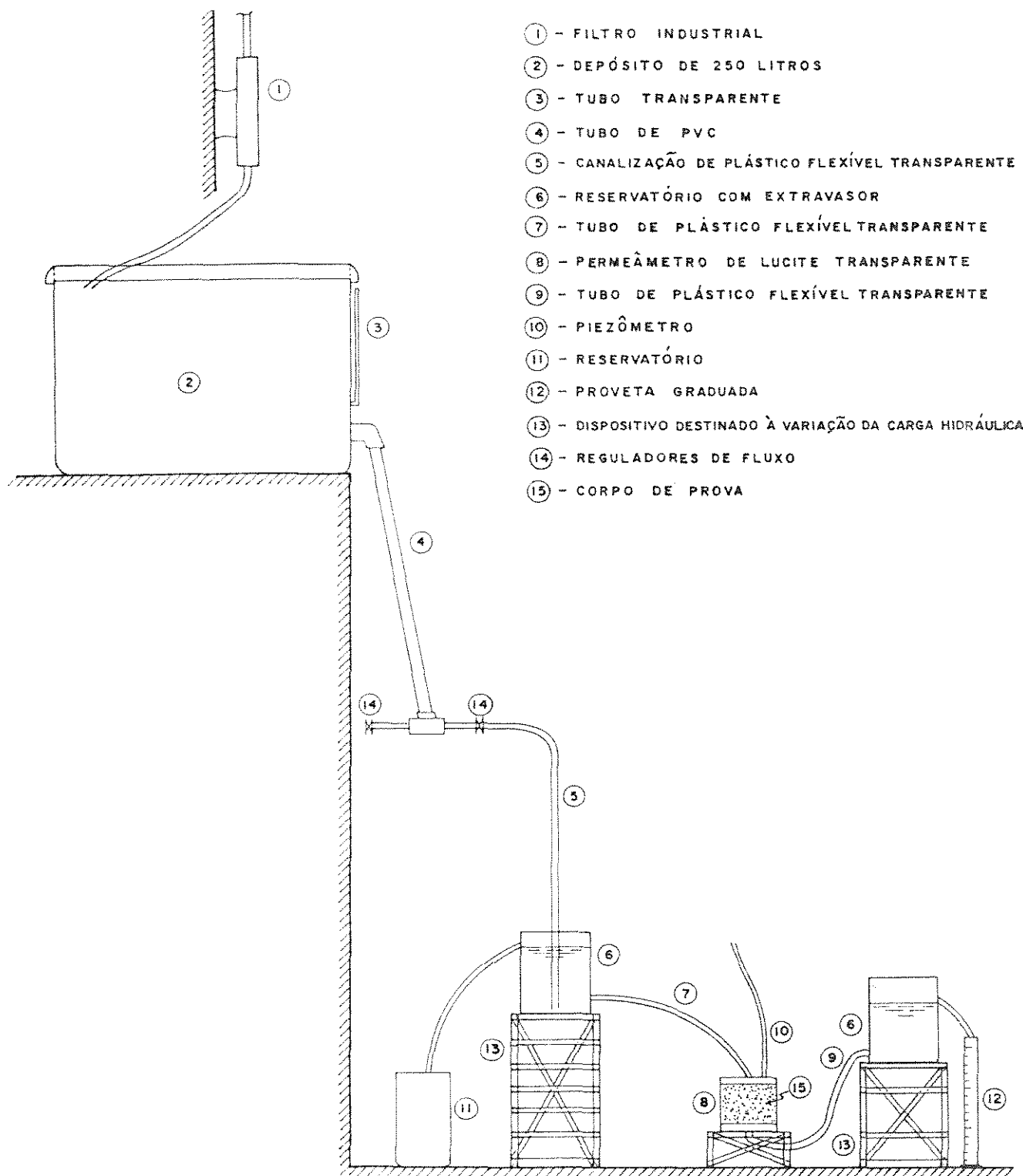
5.2.1. Generalidades

Para a execução dos ensaios de permeabilidade, dentro do refinamento e precisão necessários à esta pesquisa, alguns cuidados tinham que ser observados.

- a. Execução do ensaio com água isenta de material sólido em suspensão.
- b. Execução do ensaio a uma temperatura constante, ou variando muito pouco no mesmo ensaio.
- c. Ausência de bolhas de ar, no equipamento e na amostra, durante o transcorrer do ensaio.
- d. Execução do ensaio em condições de regime laminar de percolação.

e. Execução do ensaio em corpo de prova previamente saturado.

Para tanto, foi utilizado o sistema esquematizado na figura 5.2.1.1.



- FIGURA 5.2.1.1.

- Equipamento para execução dos ensaios - Corte esquemático

O sistema utilizado foi composto por:

- 1 - filtro industrial, destinado a eliminar as partículas em suspensão, presentes na água da rede.
- 2 - depósito de 250 litros, destinado a armazenar a água filtrada da rede. Como a temperatura da água da rede é variável, a permanência de água já filtrada, no depósito, por algum tempo, uniformizava esta temperatura para toda a água do depósito. A saída de água do depósito foi posicionada a aproximadamente 10 cm do fundo, de tal maneira que as partículas sólidas, que tivessem passado pelo filtro, e com dimensão suficiente para sedimentar no fundo do depósito, aí permanecessem, diminuindo ainda mais as partículas presentes na água em percolação. O armazenamento de água no depósito também eliminou as bolhas de ar presentes em grande quantidade na água da rede.
- 3 - tubo transparente, destinado ao controle visual do nível d'água dentro de depósito, que estava a uma altura de aproximadamente 3 metros.
- 4 - tubo de PVC, para levar a água aos terminais de onde saia a canalização para os reservatórios de nível d'água constante.
- 5 - canalizações de plástico flexível, destinadas a levar a água aos reservatórios de nível constante.

- 6 - reservatórios com extravasor para manter o nível da água constante, destinados a fornecer a carga hidráulica necessária aos ensaios.
- 7 - tubo de plástico transparente, flexível, para fornecer água, com uma determinada carga, à amostra situada no interior do permeâmetro.
- 8 - permeâmetro de lucite, transparente, para possibilitar um controle visual da existência de bolhas de ar na amostra, e em suas próprias paredes.
- 9 - tubo de plástico transparente, flexível, para dar vazão à água que percola pelo permeâmetro.
- 10 - piezômetro situado na entrada de água para o permeâmetro, destinado a medir a carga com a qual o ensaio está sendo executado.
- 11 - reservatório destinado a recolher o excesso de água que chega ao vaso 6.
- 12 - proveta graduada, destinada a medir a vazão que percola pela amostra, sob a ação da carga hidráulica.
- 13 - dispositivo auxiliar, destinado a possibilitar variações na carga hidráulica.
- 14 - dispositivos para regular o fluxo de água.

15 - corpo de prova (areia), objeto da execução do ensaio de permeabilidade.

Com este equipamento, o procedimento foi o seguinte:

- a. abria-se a torneira (14), de entrada da rede para o filtro (1) e enchia-se o depósito (2).
- b. deixava-se a água em repouso por algum tempo, e então abria-se uma das torneiras (14), e deixava-se encher o vaso (6).
- c. após cheio o vaso (6), regulava-se a entrada de água através de (14), de maneira a estar sempre vazando água pelo extravasor do vaso (6), que era recolhida no vaso (11) por questões de limpeza na bancada de execução de ensaios.
- d. a água que percolava pelo corpo de prova (15) era recolhida na proveta (12).
- e. anotados os resultados numa planilha de ensaios, passava-se à fase de cálculos.

5.2.2. Obtenção dos Corpos de Prova

Para cada diferente material, obtido da mistura em diferentes proporções, das areias previamente selecionadas, foram moldados dois diferentes corpos de prova, para serem ensaiados no

permeâmetro: um no estado fôfo e um no estado compacto.

5.2.2.1. Estado Compacto

O estado compacto de um material arenoso caracteriza-se pela existência, em qualquer ponto do corpo de prova, de 3 grãos tangentes entre si.

Essa condição geométrica de 3 grãos tangentes entre si resultará no índice de vazios (e) mínimo para um determinado material, que será denominado $e_{\min}$; esse estado traduz também o estado de máxima compacidade do material.

Na prática, quando então os grãos já não são perfeitamente esféricos, para ser alcançada a condição de máxima compacidade do material, é necessário promover um certo "encaixamento" entre os grãos, de maneira que partículas sólidas passem a ocupar a maior parte possível dos vazios existentes.

Na prática, então, para ser alcançado um grau de compacidade mais próximo da máxima compacidade, é necessário transmitir ao corpo de prova uma alta energia de compactação, bem como uma energia adicional que promova um rearranjo dos grãos, destinada a forçar um maior "encaixe" entre eles.

A primeira tentativa de compactação, para a obtenção do estado compacto, foi feita com o equipamento E-01, representado na Figura 5.2.2.1, com o auxílio do qual foi aplicada uma energia estática de compactação, juntamente com uma pequena rotação, destinada a promover um melhor "encaixe" entre os grãos. Os resultados obtidos não foram satisfatórios, tanto em termos de índice de vazios como em termos de compacidade.

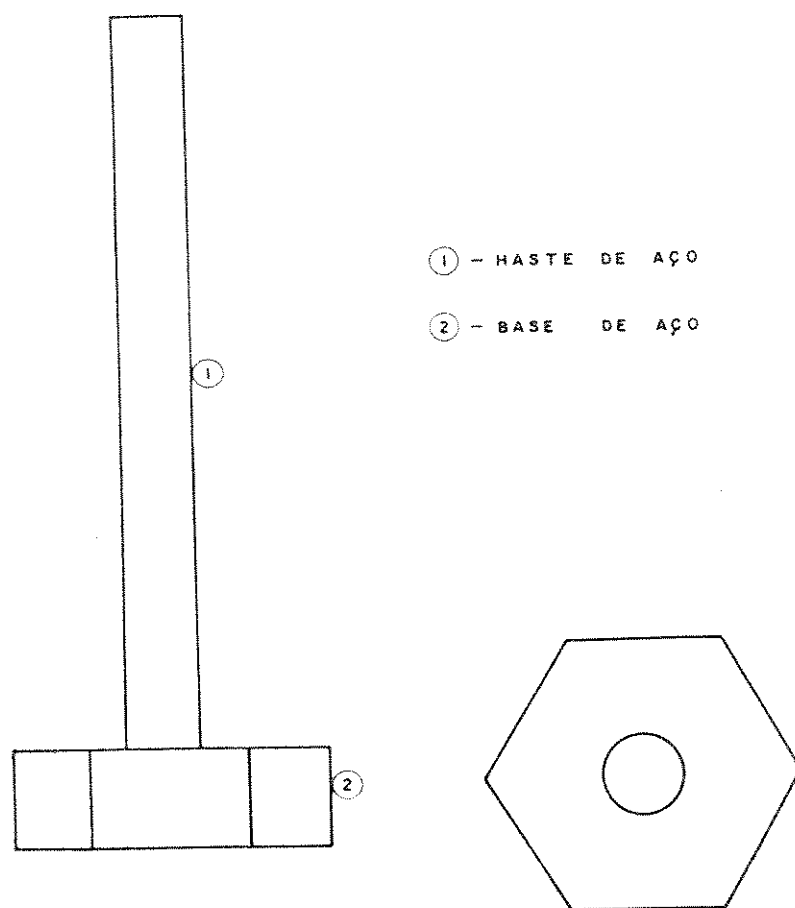
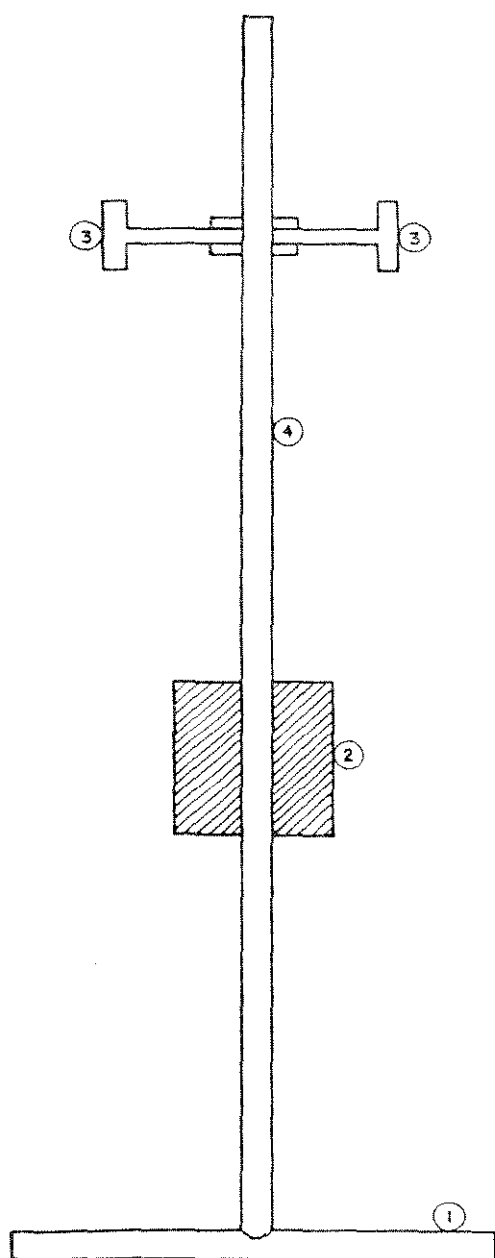


FIGURA 5.2.2.1.

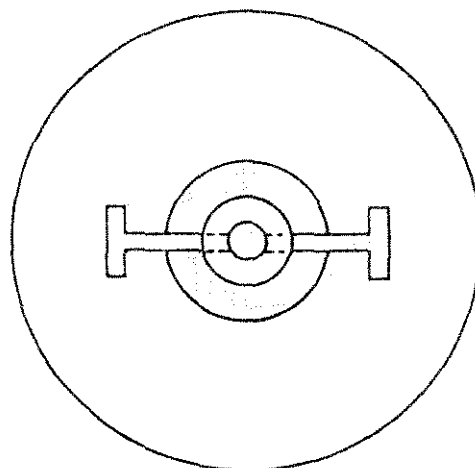
Equipamento E-01

Sabe-se que a aplicação de energia dinâmica provoca uma maior compactidade nas amostras de material arenoso. Foi decidido então fazer tentativas nêsse sentido, para averiguar os resultados possíveis de serem obtidos.

Transmitir ao corpo de prova uma alta energia de compactação dinâmica é relativamente fácil; o difícil, com os processos usuais de compactação em laboratório, é transmitir os esforços necessários sem que haja quebra de grãos, o que viria modificar a curva granulométrica do material. Uma tentativa nêsse sentido foi feita com o equipamento compactador E-02, esquematizado na Figura 5.2.2.2, que acrescenta aos equipamentos usuais de laboratório a placa metálica soldada na base. Com isso, a energia obtida da queda do peso, que transmite energia de compactação ao corpo de prova, é melhor distribuída. Várias experimentações foram feitas; como resultado, ficou bastante evidente que, quando a placa era cuidadosamente apoiada na superfície da areia, a compactação necessária era conseguida, sem quebra significativa de grãos durante o processo. Este fato foi constatado através do levantamento da curva granulométrica da areia antes e depois da compactação.



- ① - PLACA SOLDADA E FIXA NA BASE
- ② - SOQUETE DE PESO VARIÁVEL E DESLOCÁVEL AO LONGO DA HASTE GUIA
- ③ - REFERENCIAL PARA ALTURA DE QUEDA DO SOQUETE, REGULÁVEL POR PARAFUSOS
- ④ - HASTE GUIA



- FIGURA 5.2.2.2.

- Equipamento E-02

Ainda assim, os índices de vazios calculados não haviam atingido valores satisfatórios. O próximo passo seria aplicar algum tipo de vibração na amostra; sabe-se porém, que a aplicação de vibração produz o indesejável efeito de segregação das partículas mais grossas. W.E. Strohm, E.C. Nettles e C.C. Calhoun Jr., apud Felex (09), pag. 32, submeteram os corpos de prova a um pequeno ângulo de giro em ciclos repetitivos, com alta eficiência. Ainda segundo Felex (09), no trabalho citado não havia detalhes suficientes para a reprodução do equipamento utilizado.

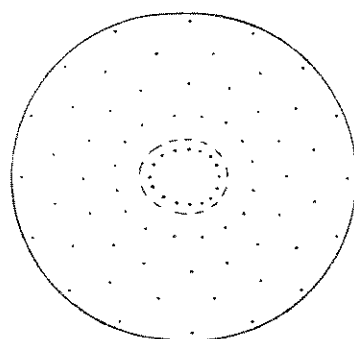
Sendo assim, foi decidido que seriam feitas tentativas para a aplicação de um pequeno ângulo de giro no corpo de prova, com um equipamento desenvolvido independentemente, para este trabalho.

Após várias tentativas infrutíferas, foi construído o equipamento E-03, representado na Figura 5.2.2.3, em corte e planta, que produziu resultados satisfatórios, isto é, diminuição nos índices de vazios das amostras, sempre que utilizado.

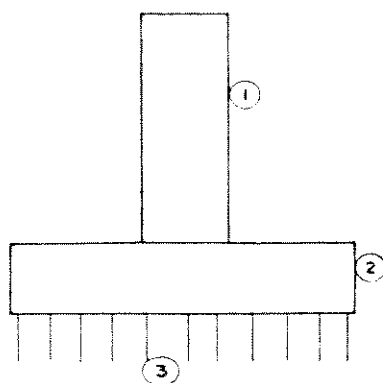
Pode-se dizer que, para uma compactação global do tipo da utilizada neste trabalho, constituída por várias etapas de compactação parcial, em várias camadas de pequena espessura, e com a aplicação conjunta de diferentes tipos de compactadores, o uso do equipamento E-03 em muito contribuiu para aumentar significativamente a compacidade da amostra.

Para a obtenção dos corpos de prova no estado compacto, e nas condições especificadas no item 5.2.1, foi seguido o roteiro adiante descrito.

- a. foram misturadas diferentes quantidades das areias anteriormente selecionadas, para resultar num material de curva granulométrica desejada.



- ① - HASTE DE MADEIRA
- ② - BASE DE MADEIRA
- ③ - PINOS DE AÇO



- FIGURA 5.2.2.3.

- Equipamento E-03.

- b. o material, após devidamente homogeneizado, foi depositado num recipiente contendo a mesma água do depósito (2).
- c. a mistura de água e amostra, dentro do recipiente, foi cuidadosamente agitada, para que saíssem as bolhas de ar eventualmente existentes.
- d. o permeâmetro foi previamente cheio com a mesma água do depósito (2), para que fosse expulso o ar existente no seu interior e no interior dos condutos do corpo principal do permeâmetro.
- e. a mistura (amostra + água) foi cuidadosamente retirada do recipiente em que repousava, com o auxílio de uma pequena pá de plástico, apropriada para a operação a ser executada, e, com muito cuidado, depositada no permeâmetro parcialmente cheio d'água, em várias operações executadas com pequenas quantidades de cada vez.
- f. novamente, a mistura (amostra + água) foi cuidadosamente agitada no interior do permeâmetro, de maneira a expulsar bolhas de ar remanescentes, e a seguir compactada.
- g. a compactação para a obtenção do estado compacto foi constituída de diversas fases:

g.1. inicialmente, foi imposta uma compactação leve, destinada mais a promover um "encaixamento" dos grãos, executada com o equipamento E-01, e composta por movimentos de rotação do compactador, acrescidos de uma pressão estática durante a rotação, aplicados manualmente.

g.2. em seguida, foi utilizado o compactador E-02, através do qual foi aplicada uma energia de compactação dinâmica, necessária a obtenção do estado compacto.

g.3. após isso, foi usado o equipamento E-03, com o qual eram aplicados vários e pequenos movimentos de rotação, em vários pontos da amostra, cuidadosamente, com a finalidade de impor um maior "encaixamento" entre os grãos.

g.4. finalmente, foi utilizado novamente o compactador E-02, que obrigava os grãos já "encaixados" entre si, a ocuparem uma posição de grande compacidade relativa ou densidade.

g.5. geralmente, este processo foi aplicado, para cada amostra, em cinco camadas consecutivas; quando o índice de vazios não era satisfatório, a compactação foi repetida, com um número maior de camadas.

g.6. por último, a amostra foi submetida a pancadas horizontais aplicadas com muito cuidado, com a finalidade de promover ainda mais o ajustamento das partículas entre si.

5.2.2.2. Estado Fôfo

O estado fôfo pode ser caracterizado como aquele que apresenta o maior índice de vazios e porosidade, sem que deixe de existir o contato entre os grãos.

Para a obtenção dos corpos de prova no estado fôfo, as amostras passaram pelas etapas anteriormente descritas, que se constituem no processo já apresentado e utilizado por Peixoto (20), acrescido dos itens a., b., c., e d., em 5.2.2.1. (Estado Compacto).

Cumprir notar que, quando a amostra, após passar por todo o processo destinado a resultar no estado fôfo, apresentava uma diminuição de altura quando submetida a percolação de baixo para cima, a altura do corpo de prova, considerada nos cálculos, foi a nova altura estabilizada com a percolação no sentido ascendente.

5.2.3. Execução dos Ensaios

5.2.3.1. Generalidades

Por ocasião do início da execução dos ensaios que

compõem a parte experimental deste trabalho, já eram esperadas pelos menos grande parte das dificuldades que teriam que ser enfrentadas.

Do trabalho de Peixoto (20), já eram conhecidas as dificuldades para a eliminação das bolhas de ar na amostra, e as dificuldades maiores ainda, para a eliminação de bolhas de ar na tampa furada do permeâmetro.

A impossibilidade de trabalhar com água deairada também deveria trazer alguma imprecisão aos resultados dos ensaios, conforme já havia mostrado Bertram (03), embora Peixoto (20) já tivesse apontado o caminho para eliminar a imprecisão, e utilizado no seu mencionado trabalho com ótimos resultados. No presente trabalho, a posição relativa ocupada pelos vasos (6) e pelo permeâmetro (8) foi, em todos os ensaios, a mesma que Peixoto utilizou em seu trabalho (20). Pode ser comprovado que, uma vez estabelecido o fluxo pelo corpo de prova, a permeabilidade não variava com o tempo, visto que a água que percolava, foi muito bem filtrada e submetida a todos os cuidados já mencionados. Portanto, fazendo com que o permeâmetro, e conseqüentemente o corpo de prova ocupassem uma posição inferior às dos vasos (6), foi verificado que $K = f(T) \approx \text{constante}$.

Outra preocupação sempre presente neste trabalho foi a de trabalhar, em todos os ensaios executados, no regime laminar, condição na qual são válidas as hipóteses adotadas para o cálculo das permeabilidades.

5.2.3.2. O controle da turbulência nos ensaios

Conforme já foi abordado no capítulo I deste traba-

lho, o fluxo d'água através dos solos tem sido encarado do ponto de vista macroscópico, isto é, em termos médios, separando-se as áreas ocupadas pelos sólidos e pelos vazios, como se eles existissem independentemente um do outro, cada qual ocupando uma região bem definida no permeâmetro, como bem o mostra a dedução matemática desenvolvida de (3.1.1.9) a (3.1.1.16).

Por outro lado, tem sido largamente utilizado o conceito de "Número de Reynolds" ($N_R = \frac{v_c \cdot d}{\nu} \ll 2.000$), aplicável a tubos lisos de pequenos diâmetros, para mostrar que o regime de fluxo nos solos é laminar ou não, assumindo que os solos podem ser divididos em parte sólida e parte vazia, e encaminhando os cálculos como já foi exposto no parágrafo anterior.

Na execução da parte experimental deste trabalho, principalmente no que diz respeito ao fluxo ascensional nos corpos de prova moldados no estado fôfo, havia a preocupação de que os esforços de cisalhamento nas partículas, advindas da percolação da água, fossem os mínimos possíveis, para não haver riscos da provocação do fenômeno de areia movediça, ou mesmo de alteração do arranjo das partículas, à medida que a água fosse percolando.

Para tanto, foram iniciados estudos experimentais para o estabelecimento de uma carga hidráulica razoável, de maneira a evitar os fenômenos retro mencionados. Destes estudos, começou a se evidenciar um fato importante: à medida que a carga hidráulica, e conseqüentemente o gradiente hidráulico, ia aumentando, a partir de um certo valor, variável de amostra para amostra, a permeabilidade começava a diminuir.

Os mesmos estudos foram estendidos para as amostras no estado compacto, com o fluxo no sentido de cima para baixo, e foi constatado o mesmo fenômeno: a partir de um certo valor do gradiente hidráulico, a permeabilidade diminuía.

Os pares de pontos (v,i) , num gráfico, mostraram nitidamente um comportamento muito semelhante ao que pode ser verificado na figura 1.1.1.1, isto é, a partir de um determinado valor do gradiente hidráulico i , o regime passava a ser turbulento, e a permeabilidade diminuía de valor, verificando-se ainda que a equação representativa do fenômeno, de $v = K_1 \cdot i$ (1.1.1.2) passava para $v = \sqrt[n]{K_2 \cdot i}$ (1.1.1.3), $n > 1$.

A partir desta constatação, foi adotada uma diretriz que talvez tenha conduzido este trabalho a sua mais importante conclusão: o procedimento para o controle do regime de fluxo dos ensaios.

Este processo foi constituído pelos seguintes passos:

- a. a carga hidráulica, para as areias estudadas neste trabalho, não poderia passar de um certo valor, variável de amostra para amostra, sob pena de se estar trabalhando no regime turbulento.
- b. para cada ensaio, foram tomadas pelos menos 3 (três) medidas da permeabilidade, com 3 (três) gradientes hidráulicos diferentes.
- c. os três pares de pontos (v, i) , num gráfico $i \times v$, deveriam estar numa reta passando pela origem, como bem mostram os pontos da região I da figura 1.1.1.1.
- d. se tal não acontecesse para os três primeiros pontos estudados, a carga hidráulica era diminuída, mais pontos adicionados aos já existentes, até que

se pudesse ter certeza de estar trabalhando na região I.

Com este procedimento, foi abandonada a idéia de controlar o regime do fluxo através do Número de Reynolds, utilizando a equação (3.1.1.16) para determinar a velocidade de percolação no interior do corpo de prova, por uma série de motivos.

d.1. inicialmente, a grande dificuldade para a escolha de um Número de Reynolds adequado à percolação de água nos solos. A esse respeito, os experimentos de Reynolds estabelecem $N_R \leq 2.000$ para tubos lisos e de pequeno diâmetro, e Taylor (30) cita $N_R \leq 1$ para solos. A literatura consultada não entra no mérito do problema, não se dispondo portanto de mais dados a respeito do assunto; este fato, aliás, merece ser mais profundamente pesquisado experimentalmente.

d.2. a certeza de que a velocidade de percolação na amostra, calculada através da equação (3.1.1.16), não exprime a velocidade real de percolação do ensaio, podendo levar a erros muito grandes e a conclusões absurdas.

d.3. a dificuldade para a escolha de um diâmetro de canal representativo dos vários diâmetros, entre os inúmeros canalículos existentes na amostra.

d.4. a certeza de que os canalículos, formados pelo solo das amostras, devem ser encarados como rugosos, e não como lisos, para os quais valem as conclusões de Reynolds.

e. finalizando, e resumindo os motivos sucintamente comentados, na equação $N_R = \frac{v_c \cdot d}{\nu}$, não há possibilidades da determinação, com razoável precisão, nem de v_c e nem de d , e mais ainda, não existem dados também para a escolha do N_R apropriado.

Sendo assim, este processo, para controle do regime de fluxo na amostra, não foi utilizado, tendo sido adotado o processo já anteriormente detalhado.

5.2.3.3. Medição do gradiente hidráulico no corpo de prova

Conforme pode ser visto na Figura 5.2.1.1., o sistema de execução dos ensaios foi dotado de um piezômetro [10], destinado a medir a carga hidráulica realmente atuante no corpo de prova.

Para tanto, foi adotado o seguinte procedimento:

a. inicialmente, era medida a diferença de cota entre os níveis superiores da água contida nos reservatórios com extravasores [6], sendo obtida a carga hidráulica bruta do ensaio.

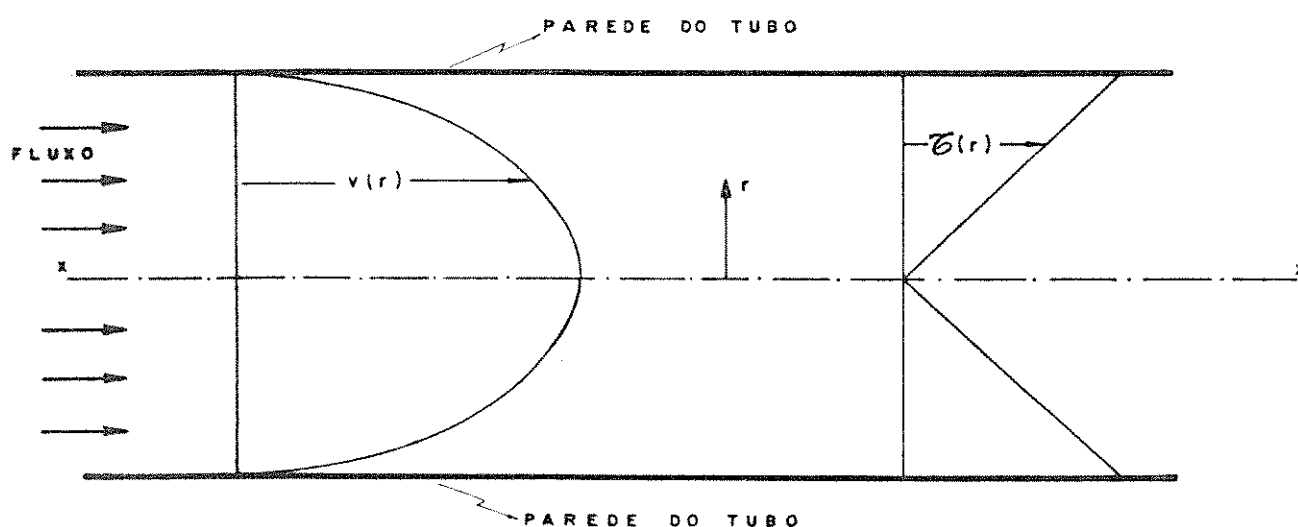
- b. a seguir, através do piezômetro [10], foi medida a carga hidráulica que atuava no topo do corpo de prova, e conseqüentemente, a perda da carga que ocorria no trajeto entre o vaso com extravasor [6] superior, e o permeâmetro.
- c. como o trajeto entre o vaso com extravasor [6] superior e o permeâmetro, deliberadamente, foi construído idêntico ao trajeto entre o permeâmetro e o vaso com extravasor [6] inferior, a perda de carga também era idêntica nos dois trajetos.
- d. como a perda de carga no trajeto superior era medida, ela foi subtraída em dobro da carga hidráulica bruta, sendo possível assim avaliar a carga hidráulica líquida, que efetivamente atuava durante os ensaios executados.
- e. a permeabilidade obtida em todos os ensaios, foi calculada utilizando-se os valores da carga hidráulica líquida que realmente atuava no corpo de prova.

5.2.3.4. Comentários

As amostras de material arenoso, preparadas e compactadas como já exposto anteriormente, foram submetidas aos ensaios de permeabilidade, executados com gradientes hidráulicos suficientemente pequenos para que o regime de percolação fosse sempre laminar.

Sabe-se que a turbulência é gerada pelo aparecimento de tensões de cisalhamento internas ao fluído. Quando essas tensões ultrapassam determinados valores, variáveis de fluído para fluído, aparece a turbulência no fenómeno de percolação.

Na Figura 5.2.3.1., estão representados os parâmetros que influem no aparecimento da turbulência, para um tubo circular de raio r .



- FIGURA 5.2.3.1.

- Distribuição da velocidade e das tensões de cisalhamento num tubo circular de pequeno diâmetro.

Sabe-se que

$$\tau = \mu \frac{dv}{dr}$$

Para um mesmo diâmetro, e para um mesmo fluido em percolação (μ = constante), quanto maior a velocidade média, maior será o $\frac{d_v}{d_r}$. Para valores de $\frac{d_v}{d_r}$ a partir de um determinado valor, surge a turbulência. Como a turbulência surge quando as tensões de cisalhamento são relativamente grandes, a permeabilidade diminui.

Quando os pontos, no gráfico ($i \times v$), dispunham-se numa reta passando pela origem, era obtido o maior coeficiente de permeabilidade, que também era constante para qualquer ponto situado na região I (Fig. 1.1.1.1). Nos experimentos executados, a permeabilidade sob regime turbulento foi sempre menor que qualquer permeabilidade sob regime laminar, mantidas constantes as demais condições de ensaio, como seria de se esperar.

5.2.4. Permeabilidade Característica do Equipamento

5.2.4.1. Introdução

Para avaliar a "Permeabilidade Característica" do equipamento, foi executado um ensaio com o equipamento completo, apenas sem a amostra no interior do permeâmetro.

Este ensaio destina-se a estabelecer um limite para o valor da permeabilidade do material ensaiado, pois essa permeabilidade ficará limitada pela permeabilidade do próprio equipamento.

Foi adotado o mesmo processo já descrito para o controle da turbulência durante o ensaio, tendo este sido executado

no regime laminar.

Os dados utilizados para a execução do ensaio em vá-
zio são:

a. Permeâmetro

D = diâmetro = 11,40 cm

L = comprimento = 9,38 cm

A = área da secção transversal = 102,10 cm²

V = volume = 957,4 cm³

b. Ensaio

h = carga = 0,5 cm

V_t = volume = 452 cm³

t = tempo = 100 s

T = temperatura = 22°C

c. Resultados

$$K_T = \frac{V_t \cdot L}{t \cdot A \cdot h} \quad (\text{à temperatura de } 22^\circ\text{C})$$

$$K_T = \frac{452 \times 9,38}{100 \times 102,10 \times 0,5} = 0,8305$$

$$K_{20} = K_T \cdot \frac{\mu_T}{\mu_{20}} = 0,8305 \cdot \frac{\mu_{22}}{\mu_{20}}$$

$$K_{20} = 79 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$$

5.2.4.2. Comentários

Portanto, a Permeabilidade Característica do equipamento é da ordem de 80×10^{-2} cm/s.

Foi adotada, como permeabilidade máxima significativa a ser obtida nos ensaios, um valor de cerca de 80% da Permeabilidade Característica do equipamento, pois senão poderiam estar sendo atingidos valores, para a permeabilidade do material em ensaio, muito próximos da permeabilidade do equipamento vazio. Como ainda é desconhecida a influência que a permeabilidade característica do equipamento exerce no resultado final da permeabilidade do material ensaiado, foi adotado este valor como permeabilidade máxima significativa.

Os ensaios que resultaram em valores maiores que os 80% já adotados, foram abandonados e não entraram nos cálculos.

5.2.6. Ensaio Executados

Foram executados 2 ensaios de permeabilidade em cada amostra, sendo 1 no estado compacto e 1 no estado fôfo.

Para um total de 25 amostras consideradas e aproveitadas para os estudos, o número total de ensaios foi de 39, somados aos ensaios que necessitaram de repetição, e aos ensaios cujos resultados foram abandonados por apresentarem valores perigosamente próximos ao valor da permeabilidade característica do equipamento.

Antes do início da execução dos ensaios necessários, foi executada uma série de ensaios visando a familiarização com o uso do equipamento, e também o seu ajuste e adequação às neces-

sidades da pesquisa.

Assim é que, na fase inicial, foi previsto um equipamento que permitia valores da carga hidráulica de 12,5 cm, 7,5 cm e 5,0 cm.

Posteriormente, foi verificado que, para a grande maioria das amostras, estas cargas resultavam em regime turbulento de percolação. Foi construído então o equipamento definitivo, que permitia variações menores de carga hidráulica, e que possibilitava ainda chegar a cargas hidráulicas da ordem de 0,5 cm quando necessário à manutenção do regime laminar.

CAPITULO VI

RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

Os coeficientes de permeabilidade obtidos nos ensaios, são sempre fornecidos em termos de permeabilidade a 20°C , para uniformização dos resultados e possibilidade de comparação com resultados já existentes, de pesquisas anteriores ou de outros trabalhos publicados.

Os coeficientes de permeabilidade a 20°C serão denominados neste trabalho de K_{20} .

Foram também calculados, para cada amostra, em cada estado de compacidade, a porosidade "n" e o índice de vazios "e".

A seguir, é apresentada a Tabela 6.1.1.1, contendo a identificação da amostra, e os correspondentes diâmetros efetivos dos grãos, D_{10} .

Na Tabela 6.1.1.2, podem ser encontrados os valores do diâmetro de vazios $\bar{d}_{10}$, do índice de vazios "e", da porosidade "n", e da permeabilidade K_{20} , nos estados de compacidade fôfo e compacto, para cada ensaio executado nas amostras utilizadas neste trabalho.

AMOSTRA	DIÂMETRO EFETIVO DOS GRÃOS " D_{10} " (mm)
01	0,330
02	0,160
08	0,320
11	0,600
12	0,430
13	0,800
14	0,900
15	2,000
16	1,400
20	0,380
23	2,000
24	1,250
25	2,500
27	0,750
28	1,800
29	0,420
30	2,800
31	0,200
32	0,190
33	1,800
34	0,550
35	0,720
38	6,000
42	0,145
43	0,580

TABELA 6.1.1.1.

Diâmetro efetivo dos grãos (D_{10}) de cada amostra

ENSAIO	AMOSTRA	ESTADO DE COMPACIDADE	d_{10} (mm)	e	n	K_{20} (10^{-2} cm/s)
1	01	Compacto	0,065	0,482	0,355	5,89
2	02	Compacto	0,025	0,696	0,410	2,26
3	08	Compacto	0,060	0,502	0,334	7,36
4		Fôfo	0,230	0,772	0,436	20,02
5	11	Compacto	0,125	0,454	0,312	6,35
6		Fôfo	0,500	0,735	0,424	21,25
7	12	Compacto	0,110	0,536	0,349	19,01
8	13	Compacto	0,155	0,564	0,361	15,11
9		Fôfo	0,600	0,837	0,456	33,24
10	14	Compacto	0,150	0,557	0,358	11,92
11		Fôfo	0,520	0,784	0,439	34,49
12	15	Compacto	0,360	0,580	0,367	22,38
13		Fôfo	1,200	0,745	0,427	38,20
14	16	Compacto	0,260	0,557	0,358	30,14
15		Fôfo	0,900	0,804	0,446	58,13
16	20	Compacto	0,062	0,461	0,315	11,61
17	23	Fôfo	0,950	0,832	0,454	57,78
18	24	Compacto	0,210	0,677	0,404	26,88
19		Fôfo	0,630	0,899	0,473	43,02
20	25	Compacto	0,420	0,514	0,339	31,01

Continua

TABELA 6.1.1.2.

Permeabilidade e demais parâmetros nos ensaios executados

ENSAIO	AMOSTRA	ESTADO DE COMPACIDADE	$\bar{d}_{10}$ (mm)	e	n	K_{20} (10^{-2} cm/s)
21	27	Compacto	0,150	0,506	0,336	16,04
22		Fôfo	0,570	0,708	0,414	35,81
23	28	Fôfo	1,250	0,765	0,433	63,75
24	29	Compacto	0,087	0,483	0,326	12,19
25		Fôfo	0,340	0,653	0,395	35,45
26	30	Compacto	0,500	0,595	0,373	26,50
27		Fôfo	1,470	0,736	0,424	58,55
28	31	Compacto	0,042	0,441	0,306	3,19
29		Fôfo	0,160	0,631	0,387	15,67
30	32	Compacto	0,038	0,440	0,306	2,90
31		Fôfo	0,135	0,713	0,416	14,18
32	33	Compacto	0,034	0,316	0,240	0,98
33		Fôfo	0,130	0,570	0,363	3,44
34	34	Compacto	0,095	0,585	0,369	11,75
35	35	Compacto	0,145	0,523	0,343	23,84
36	38	Compacto	0,990	0,488	0,328	47,56
37	42	Compacto	0,029	0,410	0,291	1,34
38		Fôfo	0,110	0,617	0,382	5,69
39	43	Compacto	0,105	0,515	0,340	19,88

TABELA 6.1.1.2. (continuação)

Permeabilidade e demais parâmetros nos ensaios executados

CAPÍTULO VII

ANÁLISE DOS RESULTADOS

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1. Introdução

O escopo do trabalho é chegar a algum tipo de função $K_{20} = f(\bar{d}_{10})$, pois Peixoto (20), após extensa análise, chegou a conclusão que o diâmetro que melhor representa o fenômeno da percolação através de um solo granular, está em torno do $\bar{d}_{10}$.

Assim sendo, serão pesquisadas, através de análise estatística, várias funções que forneçam a permeabilidade em função do diâmetro de vazio $\bar{d}_{10}$. Para tanto, através de uma análise de regressão estatística, foram estudadas várias formas de expressar a permeabilidade em função do diâmetro de vazio $\bar{d}_{10}$.

7.2. Estudo das Regressões

Peixoto (20) analisou extensamente o assunto, e chegou a conclusão que as formas que melhor expressavam K_{20} em função de $\bar{d}_{10}$ eram a linear ($K_{20} = a + b \times \bar{d}_{10}$) e a logarítmica

$$(K_{20} = a + b \times \log \bar{d}_{10}).$$

Levando em consideração conveniências de ordem prática, optou por representar K_{20} em função de $\bar{d}_{10}$ pela expressão linear.

No entanto, para testar mais uma vez as regressões possíveis, neste trabalho foram pesquisados vários tipos de regressões diferentes.

As equações de regressões foram obtidas utilizando o Programa de Análise Estatística "REGRLIN", desenvolvido pela Área de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia de Transportes - DET -, da Faculdade de Engenharia de Limeira - FEL -, da UNICAMP.

O "REGRLIN" utiliza o método dos mínimos quadrados para os cálculos de regressões lineares; no presente trabalho, face à necessidade de serem analisadas regressões não lineares, foram utilizados artifícios no fornecimento de dados, de maneira que a regressão sempre fosse função linear, de dados convenientemente trabalhados para serem fornecidos ao computador.

7.2.1. Linhas de Regressão

O "REGRLIN" fornece a equação de regressão que melhor se ajusta aos dados, através do Método dos Mínimos Quadrados.

Dessa maneira, para regressões lineares, as equações serão do tipo

$$K = a + b \times \bar{d}_{10} \quad (7.2.1.1)$$

onde

$$a = \frac{(\sum K) (\sum \bar{d}_{10}^2) - (\sum \bar{d}_{10}) (\sum K \cdot \bar{d}_{10})}{N \sum \bar{d}_{10}^2 - (\sum \bar{d}_{10})^2} \quad (7.2.1.2)$$

e

$$b = \frac{N (\sum K \times \bar{d}_{10}) - (\sum \bar{d}_{10}) (\sum K)}{N \sum \bar{d}_{10}^2 - \sum (\bar{d}_{10})^2} \quad (7.2.1.3)$$

7.2.2. Erro padrão da estimativa

Se K_{est} representa os valores de K correspondentes a valores de $\bar{d}_{10}$, avaliados por meio da equação (7.2.1.1), uma medida da dispersão em relação à reta de regressão de K para $\bar{d}_{10}$ será calculada pela fórmula

$$S_{K.\bar{d}_{10}} = \sqrt{\frac{\sum (K - K_{est})^2}{N}} \quad (7.2.2.1)$$

denominado erro padrão de estimativa.

Para maior conveniência dos cálculos, a equação (7.2.2.1) pode ser escrita sob a forma

$$S_{K.\bar{d}_{10}}^2 = \frac{\sum K^2 - a_0 \sum K - a_1 \sum K . \bar{d}_{10}}{N} \quad (7.2.2.2)$$

No presente trabalho, o erro padrão da estimativa será calculado para $(N - c)$ graus de liberdade, onde N é o número de amostras e c é o número de coeficientes da linha de regressão. Isso equivale a dizer que será apresentado um valor $S_{K.\bar{d}_{10}}$, mais representativo para os casos em estudo, tal que

$$S_{K.d_{10}}^2 = S_{K.\bar{d}_{10}}^2 \left(\frac{N}{N - c} \right) \quad (7.2.2.3)$$

7.2.3. Coeficiente de Correlação

Uma medida do grau de dependência entre as variáveis é dada pelo coeficiente de correlação "R".

Neste trabalho, o coeficiente de correlação será calculado por

$$R' = \sqrt{\frac{\sum (K_{est} - \bar{K})^2}{\sum (K - \bar{K})^2}} \quad (7.2.3.1)$$

Para correlações lineares, o cálculo de R' pode ser feito por

$$R' = \frac{N \sum K \cdot \bar{d}_{10} - (\sum \bar{d}_{10}) (\sum K)}{\sqrt{[N \sum \bar{d}_{10}^2 - (\sum \bar{d}_{10})^2] \times [N \sum K^2 - (\sum K)^2]}} \quad (7.2.3.2)$$

que freqüentemente facilita os cálculos.

O valor de R' pode ser ajustado para o número que expressa os graus de liberdade da correlação, através de

$$R = R' \left(\frac{N}{N-c} \right) \quad (7.2.3.3)$$

7.2.4. Intervalos de Confiança

O intervalo de confiança de K_{20} será calculado por

$$K_{20} = K_{est} \pm t_p S \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(K - \bar{K})^2}{\sum K^2 - \frac{(\sum K)^2}{N}}} \quad (7.2.4.1)$$

onde:

t_p - "t" de Student para (N-c) graus de liberdade e nível de confiança desejado.

7.3. As Regressões Analisadas

Serão analisados e comparados os seguintes tipos de regressões estatísticas, advindos do ajustamento dos pares de valores obtidos nos ensaios executados, e que fornecerão a permeabilidade K_{20} variando com uma função do diâmetro de vazio $\bar{d}_{10}$, ($g(\bar{d}_{10})$).

$$a. K_{20} = a + b \times \bar{d}_{10}$$

$$b. K_{20} = a + b \times \bar{d}_{10}^2$$

$$c. K_{20} = a + b \times \log \bar{d}_{10}$$

$$d. K_{20} = a + b \times \log (\bar{d}_{10}^2)$$

$$e. \log K_{20} = a + b \times \log \bar{d}_{10}$$

Para cada equação de regressão, serão apresentadas três figuras, cada uma delas contendo os pares de valores (K_{20} , $g(\bar{d}_{10})$), a reta de regressão ajustada e o intervalo de confiança correspondente aos níveis de 80%, 90% e 95% de confiança, assim como o seu coeficiente de correlação R e o seu desvio padrão $S_{K_{20} \cdot g(\bar{d}_{10})}$.

Nas páginas seguintes, estão ilustradas as figuras.

7.3.1. $K_{20} = a + b \times \bar{d}_{10}$

$$a = 8,09$$

$$b = 41,63$$

$$\text{coeficiente de correlação: } R = 0,906$$

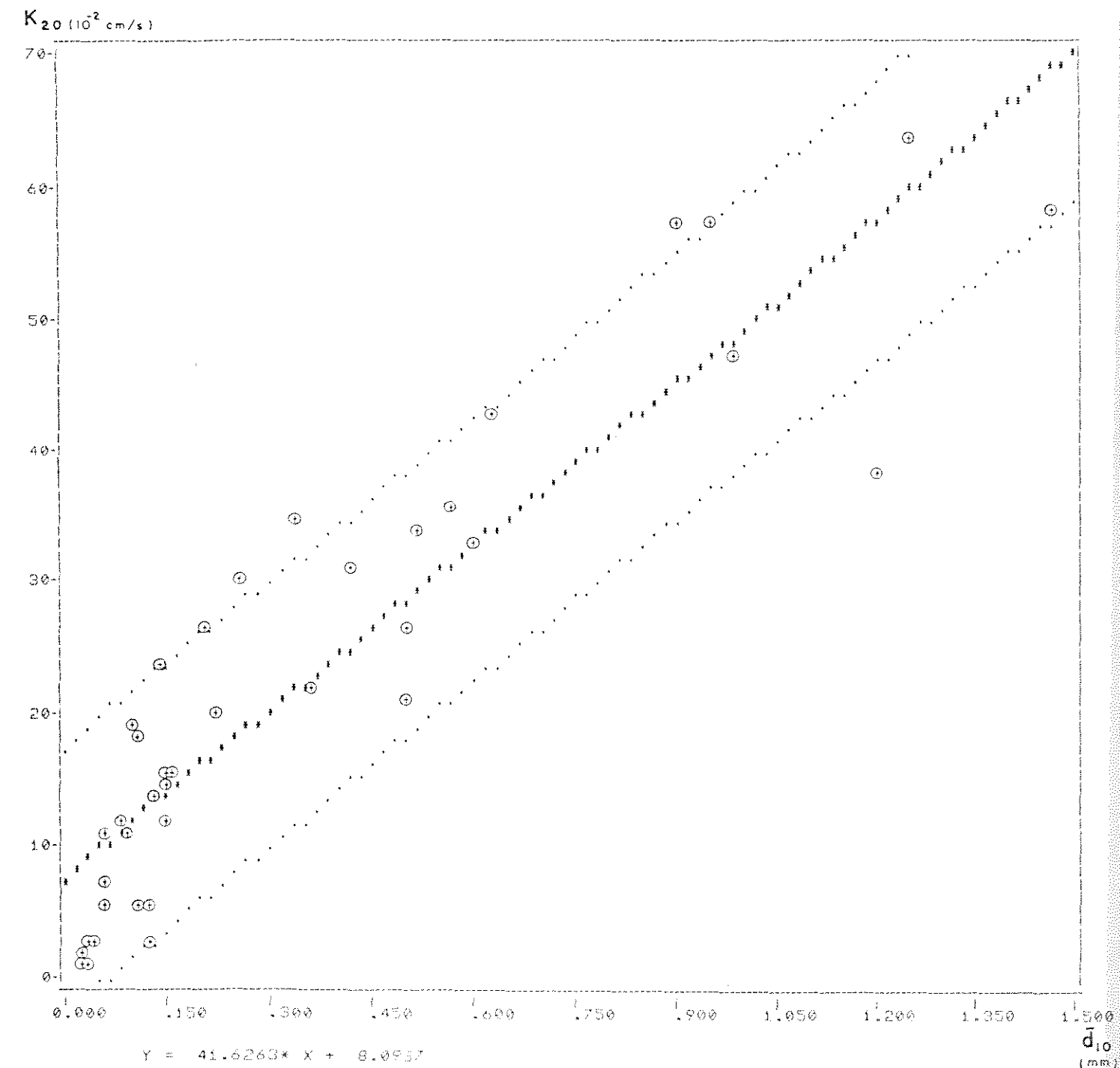
$$\text{desvio padrão} : S = 7,549$$

Equação da Regressão:

$$K_{20} = 8,09 + 41,63 \times \bar{d}_{10}$$

$$7.3.1.1. \quad K_{20} = 8.09 + 41,63 \times \bar{d}_{10}$$

. intervalo de confiança para 80% de nível de confiança.

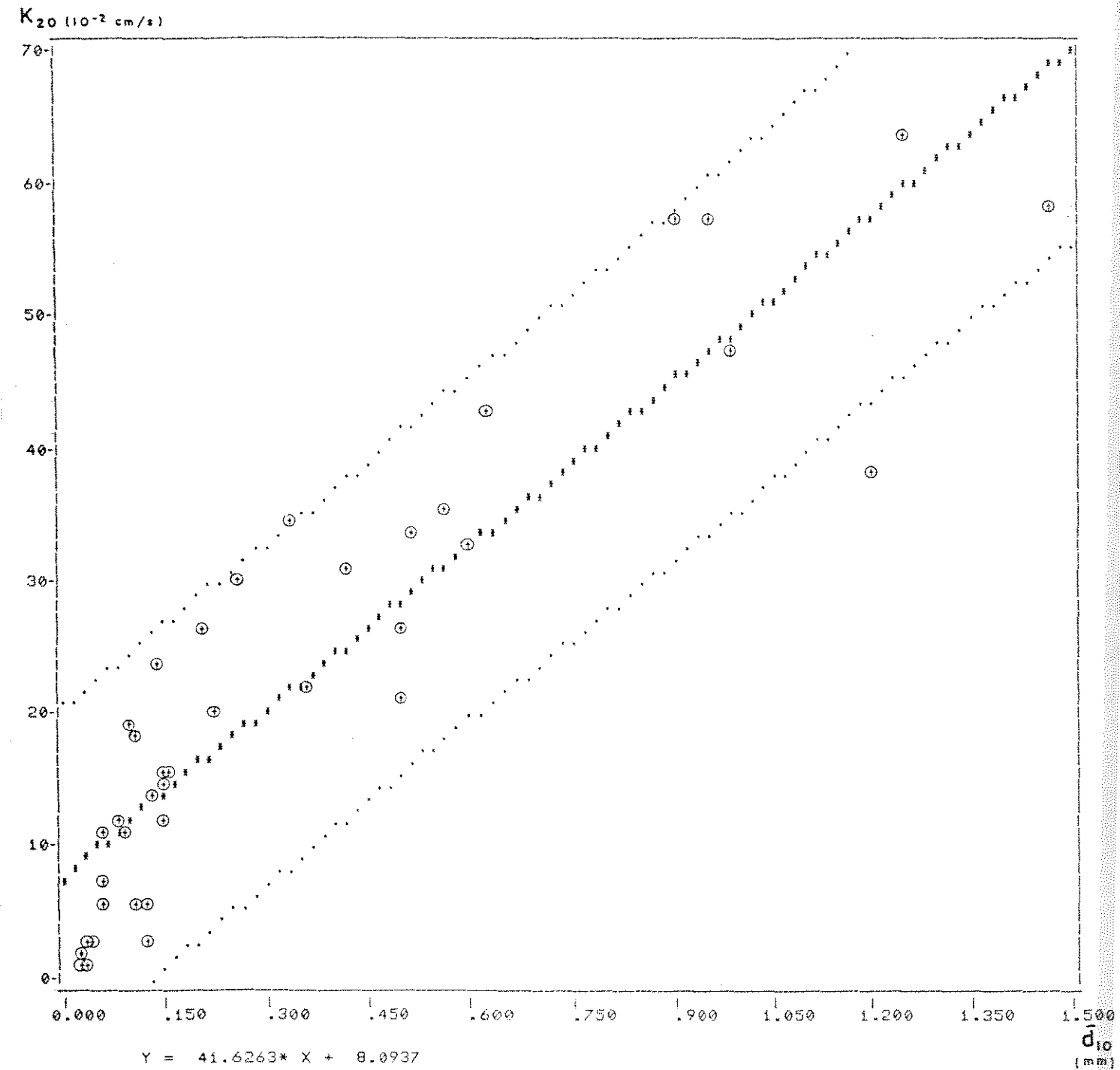


Correlação= .905882 Desvio Padrão= 7.54931

Intervalo de Confiança= $\pm 9.8543489P(1.92504+1) = .356718) \times 2 / 5.56747$ Grau de confiança= 80%

$$7.3.1.2. \quad K_{20} = 8,09 + 41,63 \times \bar{d}_{10}$$

. intervalo de confiança para 90% de nível de confiança.



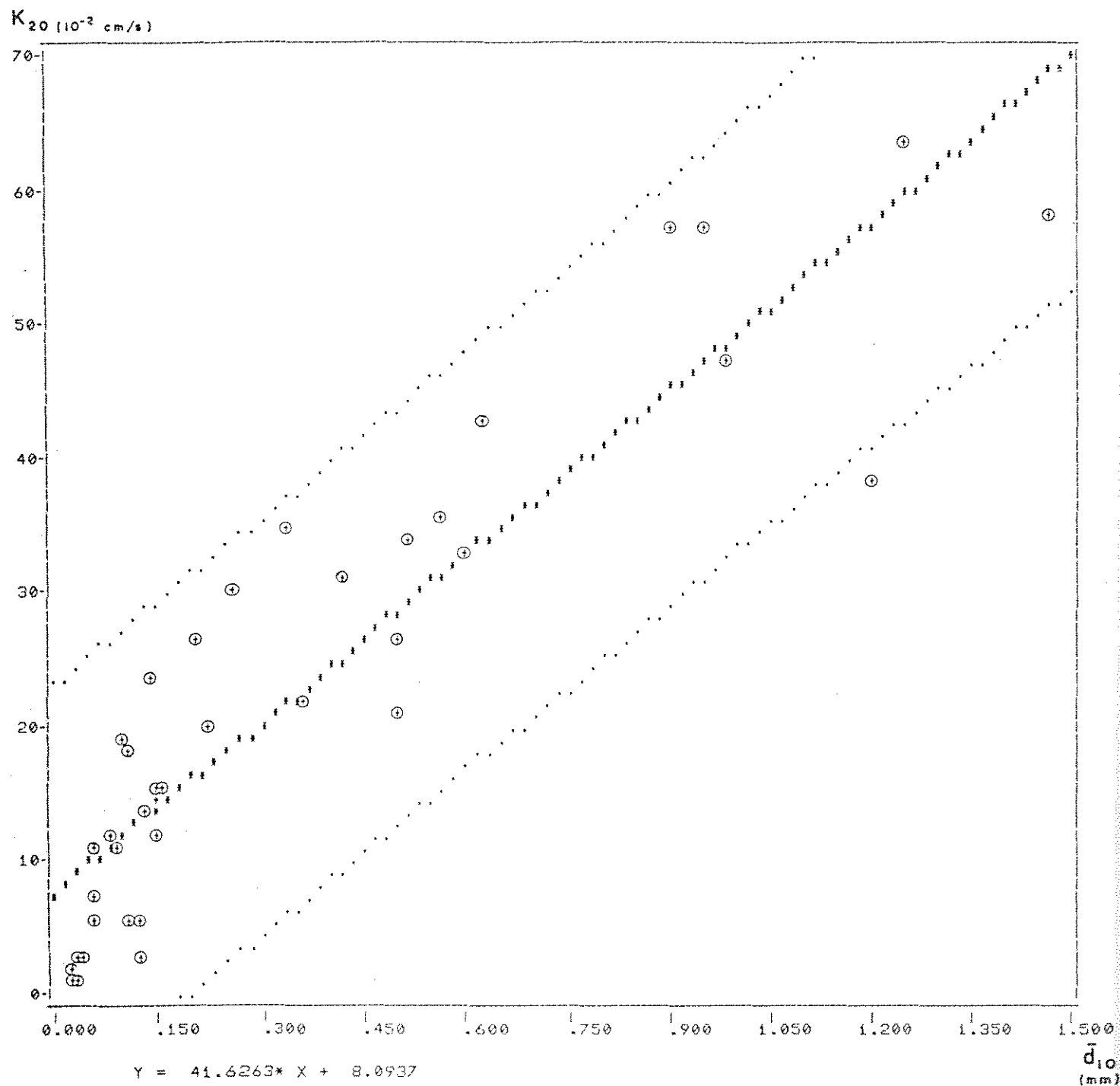
$$Y = 41.6263 \times X + 8.0937$$

Correlação= .905882 Desvio Padrão= 7.54931

Intervalo de Confiança= $\pm 12.735480 (1.02564 + (X - .356718) \times 2 / 5.56747)$ Grau de confiança= 90%

$$7.3.1.3. \quad K_{20} = 8,09 + 41,63 \times d_{10}$$

. intervalo de confiança para 95% de nível de confiança.



Correlação= .905882 Desvio Padrão= 7.54931

Intervalo de Confiança= $\pm 15.2947 \text{ SQR}(1.02564 + (X - .356718)^2 / 5.56747)$ Grau de confiança= 95%

7.3.2. $K_{20} = a + b \times \bar{d}_{10}^2$

$$a = 15,32$$

$$b = 28,24$$

$$\text{coeficiente de correlação: } R = 0,801$$

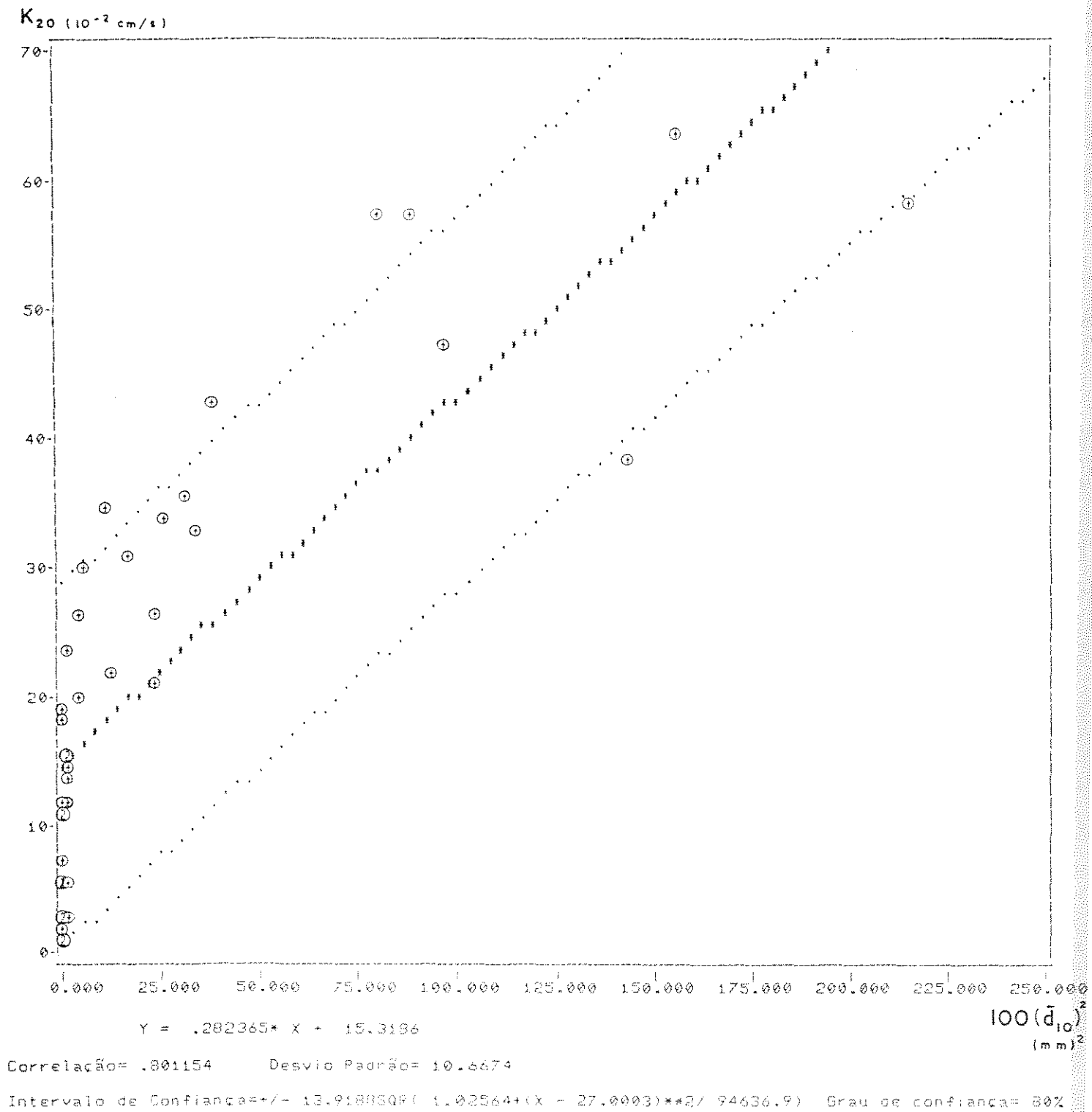
$$\text{desvio padrão} : S = 10,667$$

Equação da Regressão:

$$K_{20} = 15,32 + 28,24 \times \bar{d}_{10}^2$$

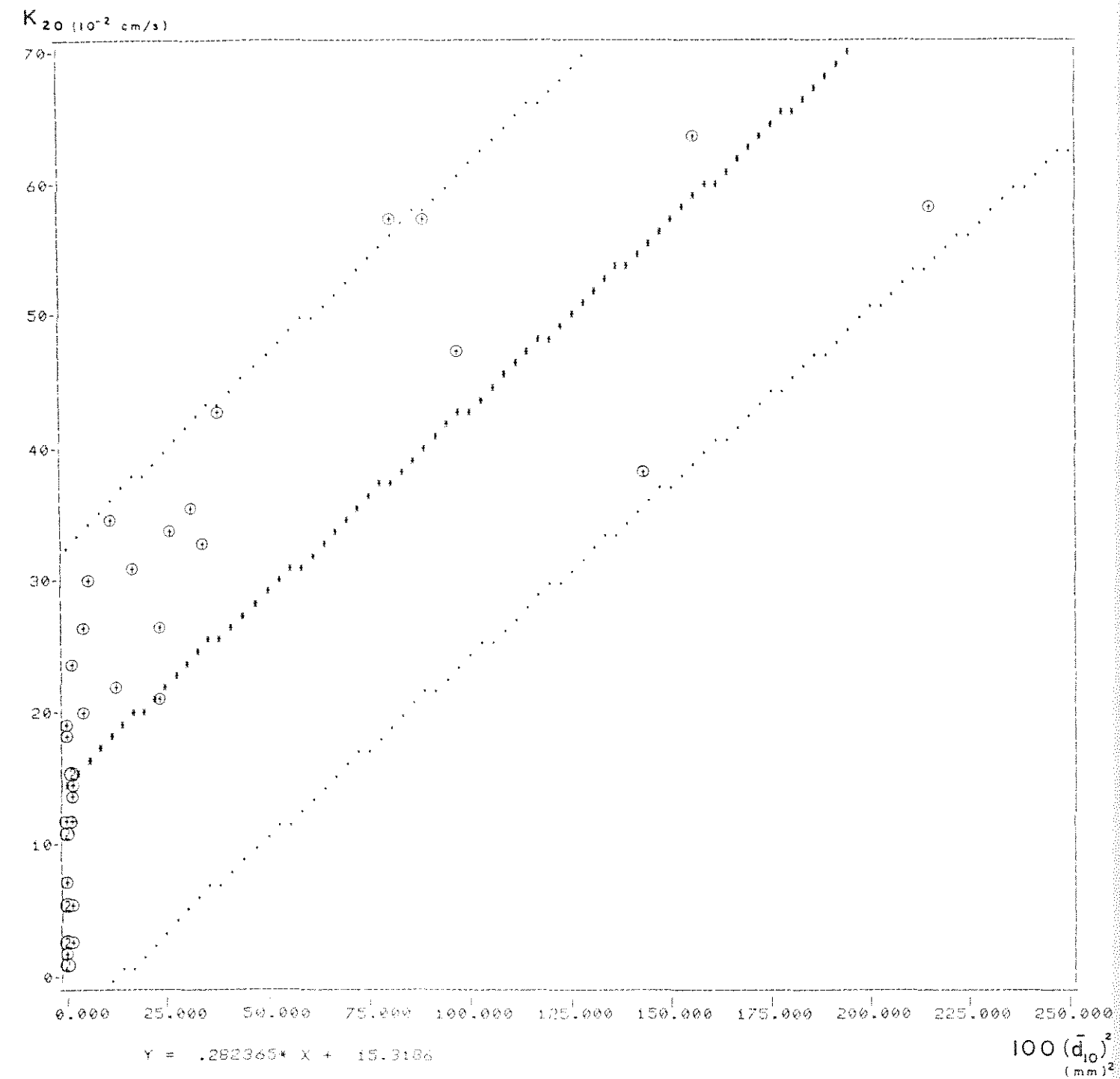
$$7.3.2.1. \quad K_{20} = 15,32 + 28,24 \times \bar{d}_{10}^2$$

. intervalo de confiança para 80% de nível de confiança.



$$7.3.2.2. \quad K_{20} = 15,32 + 28,24 \times \bar{d}_{10}^2$$

. intervalo de confiança para 90% de nível de confiança.

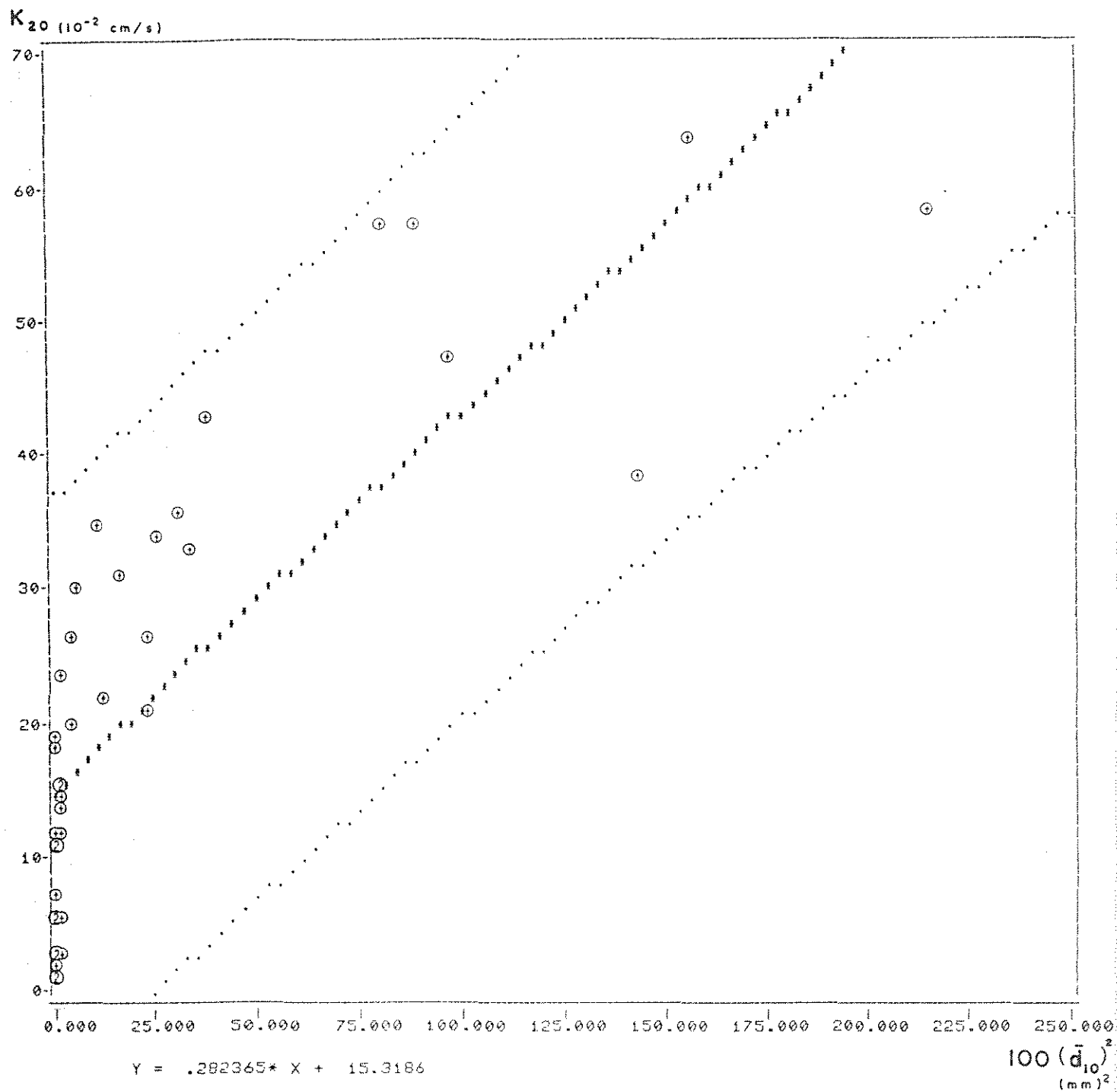


Correlação= .801154 Desvio Padrão= 10.6674

Intervalo de Confiança= +/- 17.99543301 1.02504*(X - 27.0003)**2/ 94636.9) Grau de confiança= 90%

$$7.3.2.3. \quad K_{20} = 15,32 + 28,32 \times \bar{d}_{10}^2$$

. intervalo de confiança para 95% de nível de confiança.



Correlação= .801154 Desvio Padrão= 10.6674

Intervalo de Confiança= +/- 21.61175QR(1.02564+(X - 27.0003)**2/ 94636.9) Grau de confiança= 95%

7.3.3. $K_{20} = a + b \times \log \bar{d}_{10}$

$$a = 45,65$$

$$b = 32,53$$

$$\text{coeficiente de correlação: } R = 0,913$$

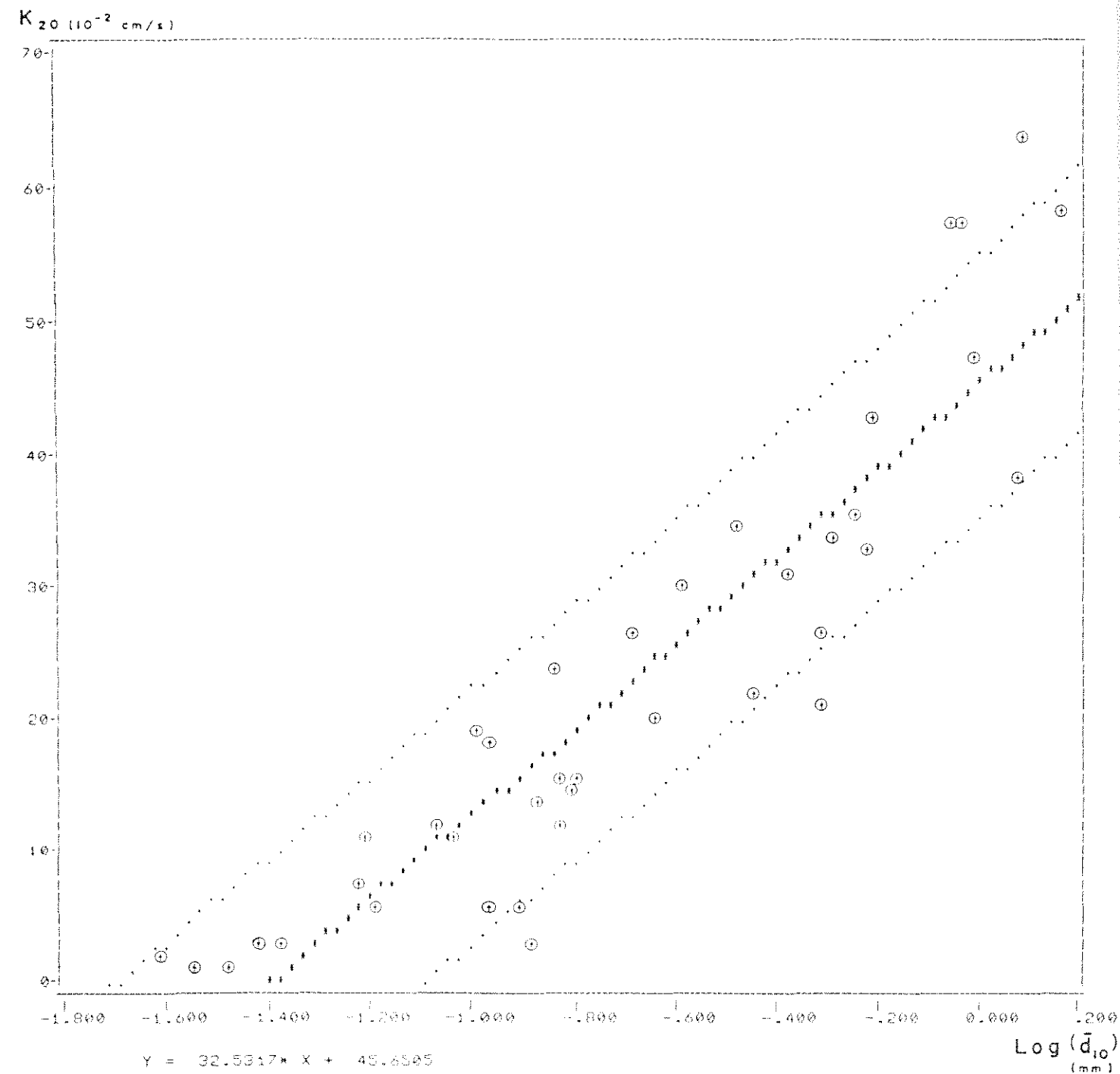
$$\text{desvio padrão} \quad : S = 7,280$$

Equação da Regressão:

$$K_{20} = 45,65 + 32,53 \times \log \bar{d}_{10}$$

$$7.3.3.1. \quad K_{20} = 45,65 + 32,53 \times \log \bar{d}_{10}$$

. intervalo de confiança para 80% de nível de confiança.

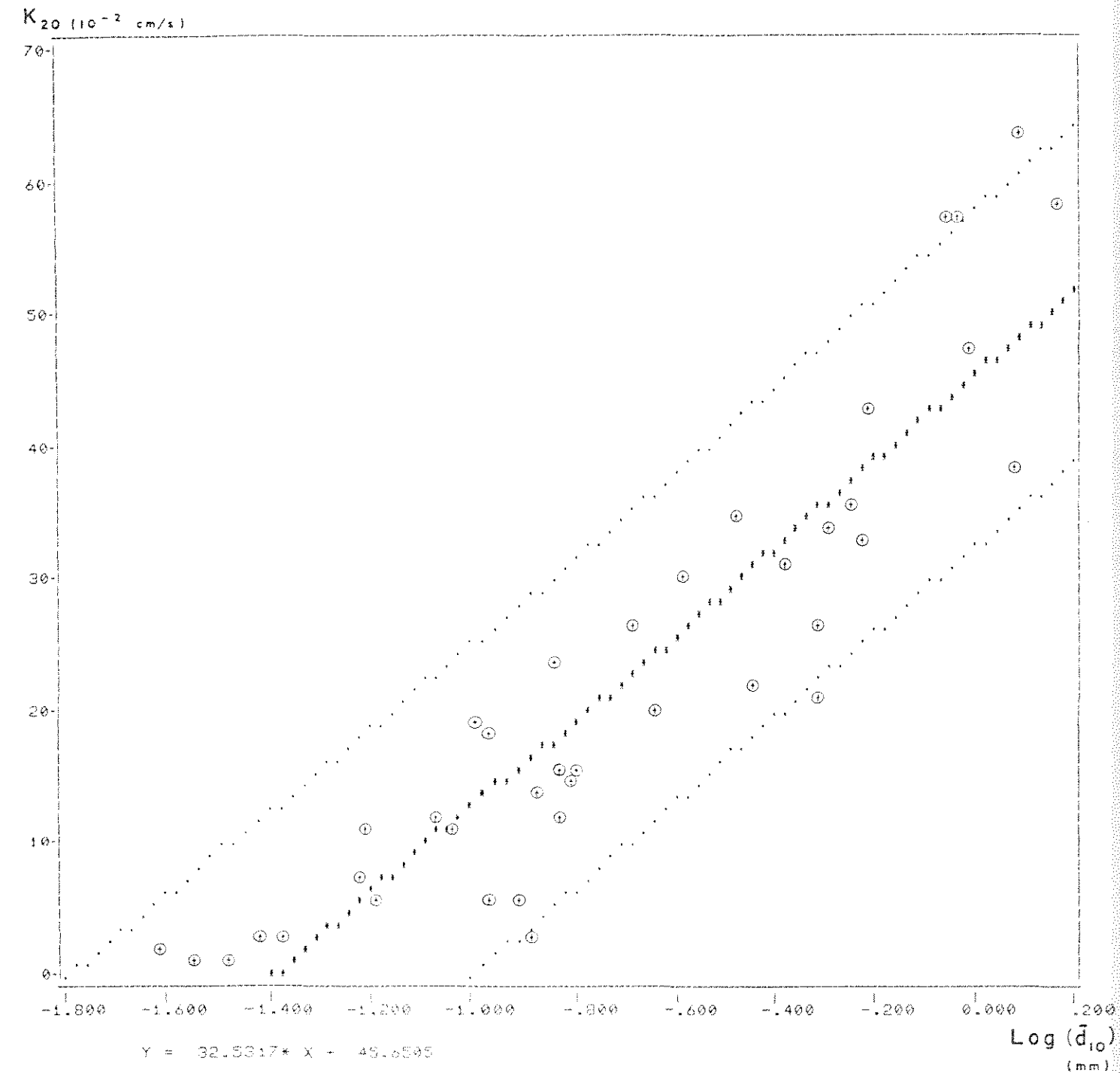


Correlação= .912787 Desvio Padrão= 7.28025

Intervalo de Confiança= +/- 9.49929502 (1.02564+(X - -.696026)**2/ 9.25499) Grau de confiança= 80%

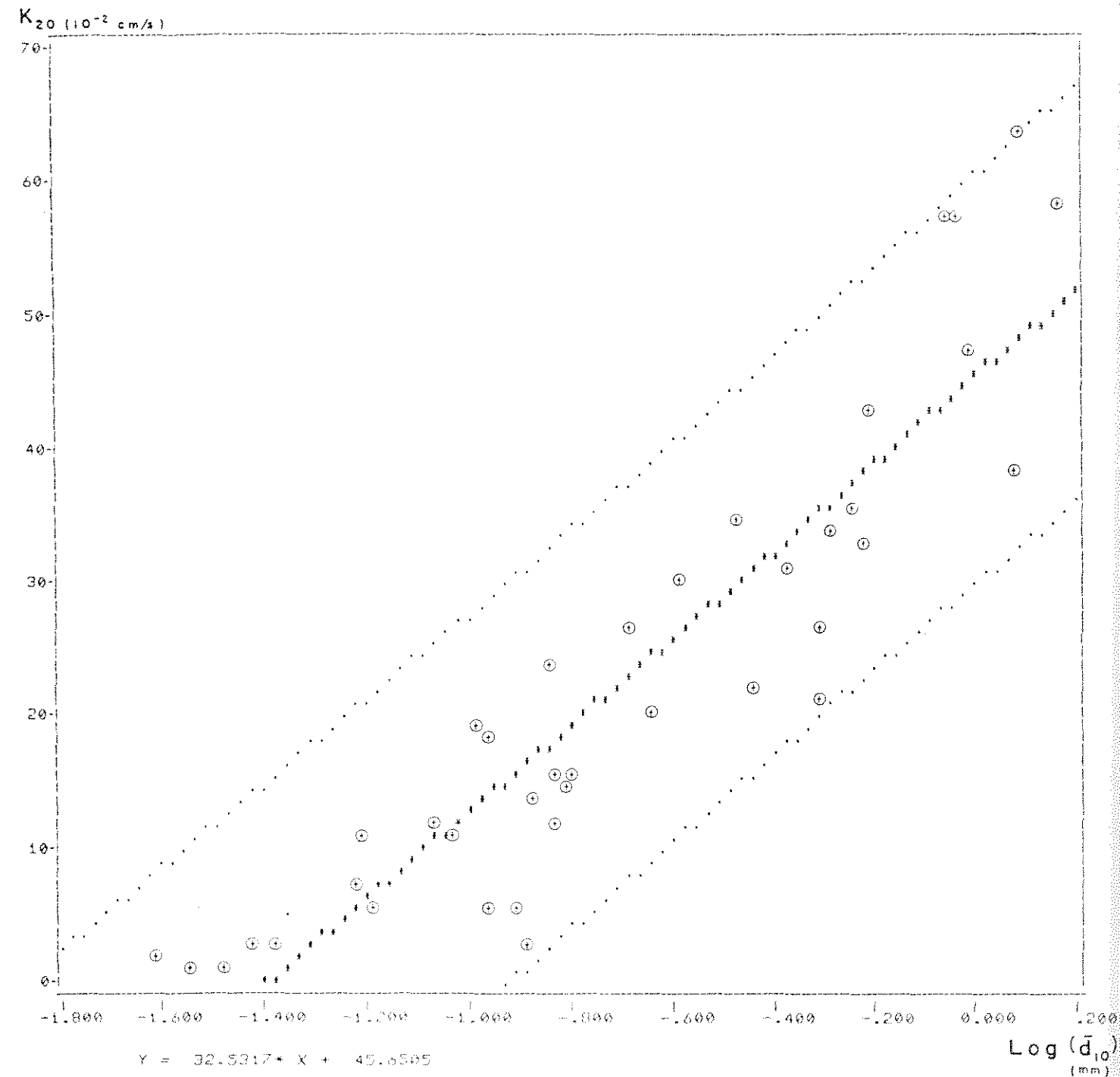
$$7.3.3.2. \quad K_{20} = 45,65 + 32,53 \times \log \bar{d}_{10}$$

. intervalo de confiança para 90% de nível de confiança.



$$7.3.3.3. \quad K_{20} = 45,65 + 32,53 \times \log \bar{d}_{10}$$

. intervalo de confiança para 95% de nível de confiança.



Correlação= .912787 Desvio Padrão= 7.28025

Intervalo de Confiança= $\pm 14.7496008(1.02564 * (X - -.698026))^{**2} / 9.25499$ Grau de confiança= 95%

$$7.3.4. \quad K_{20} = a + b \times \log \bar{d}_{10}^2$$

$$a = 45,65$$

$$b = 16,27$$

$$\text{coeficiente de correlação: } R = 0,913$$

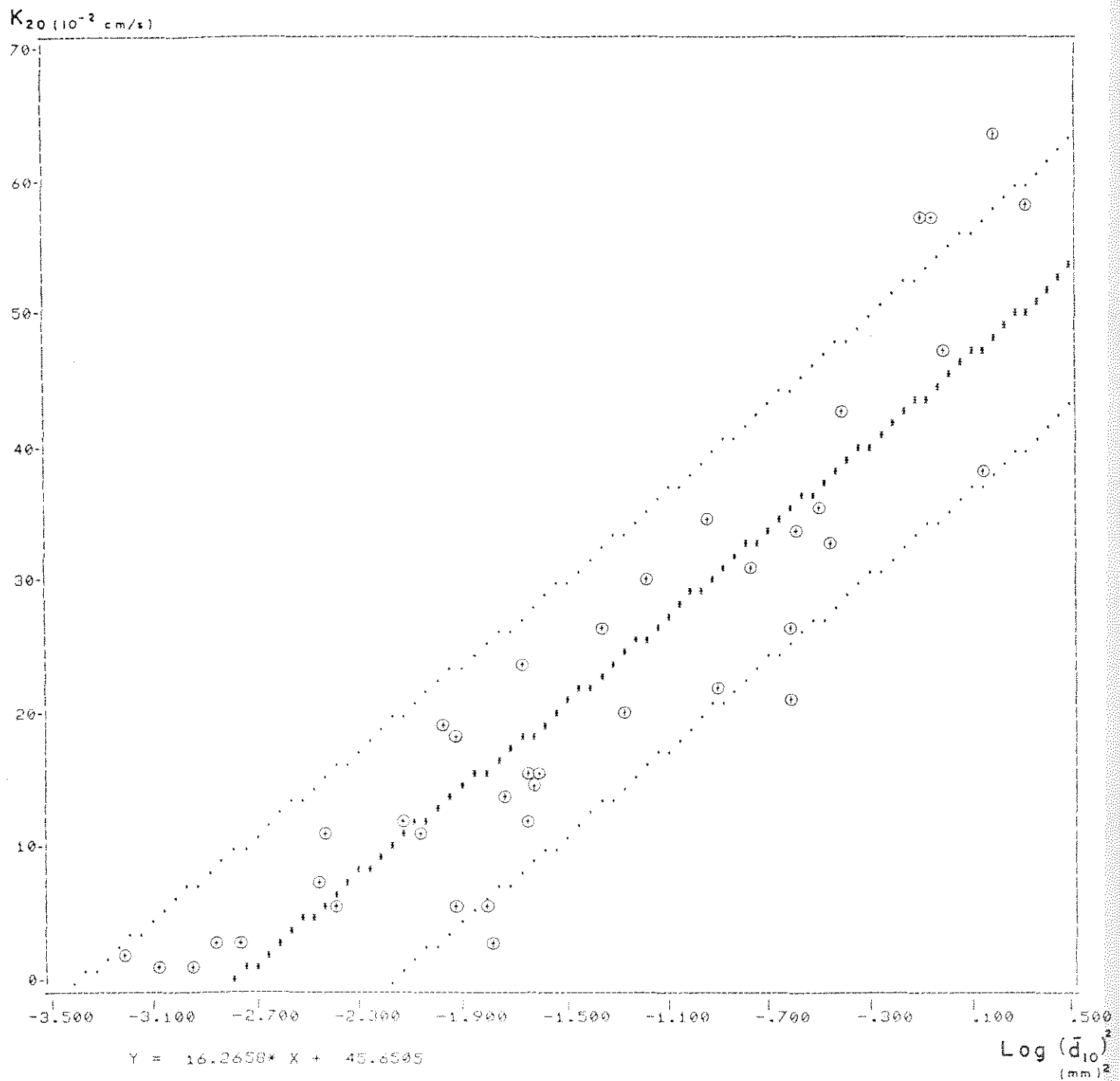
$$\text{desvio padrão} \quad : S = 7,280$$

Equação da Regressão:

$$K_{20} = 45,65 + 16,27 \times \log \bar{d}_{10}^2$$

$$7.3.4.1. \quad K_{20} = 45,65 + 16,27 \times \log \bar{d}_{10}^2$$

. intervalo de confiança para 80% de nível de confiança.

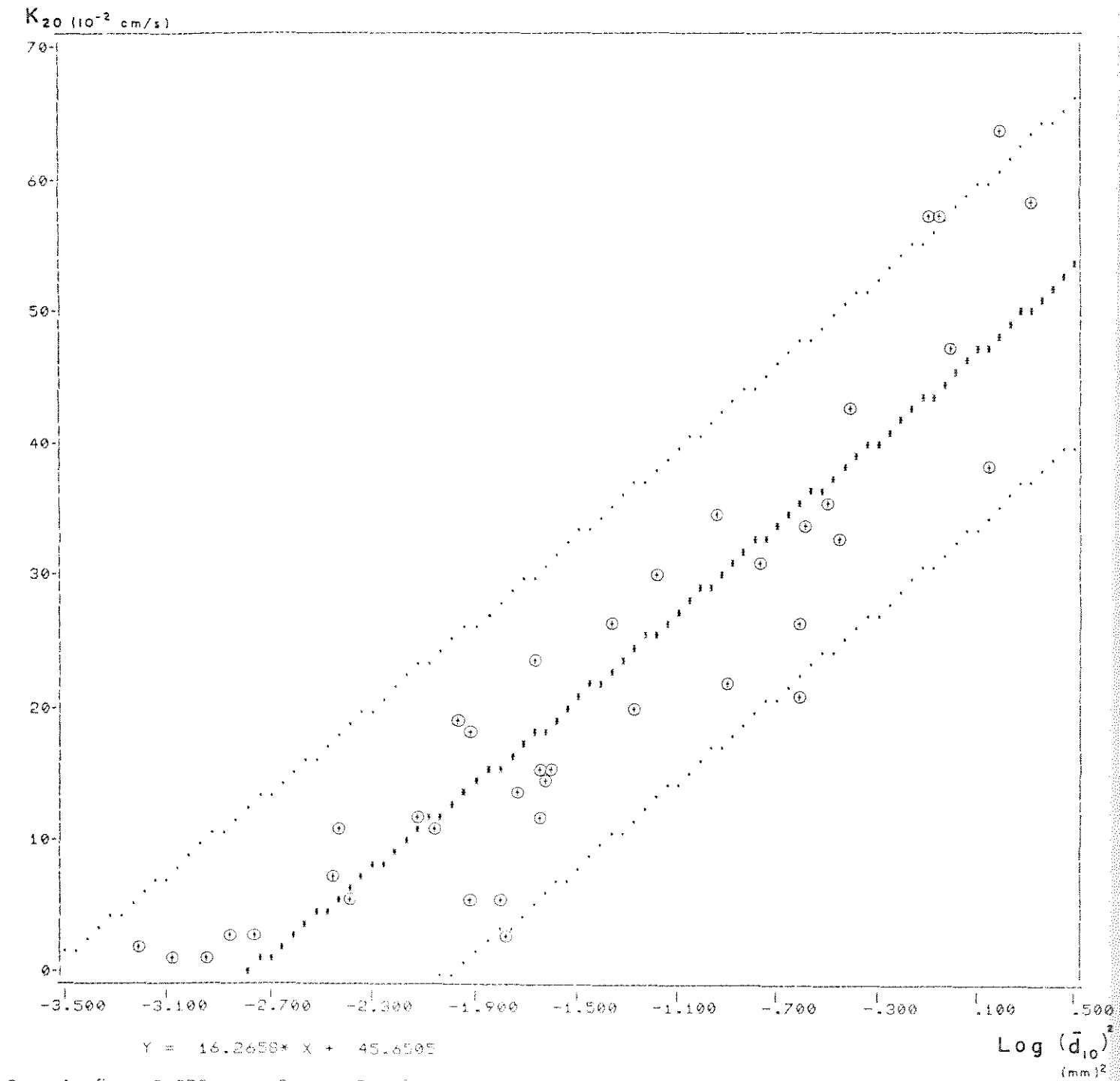


Correlação= .912786 Desvio Padrão= 7.28031

Intervalo de Confiança= $\pm 9.49937509 \sqrt{1.02554 + (X - 1.39605) * 2 / 37.02)}$ Grau de confiança= 80%

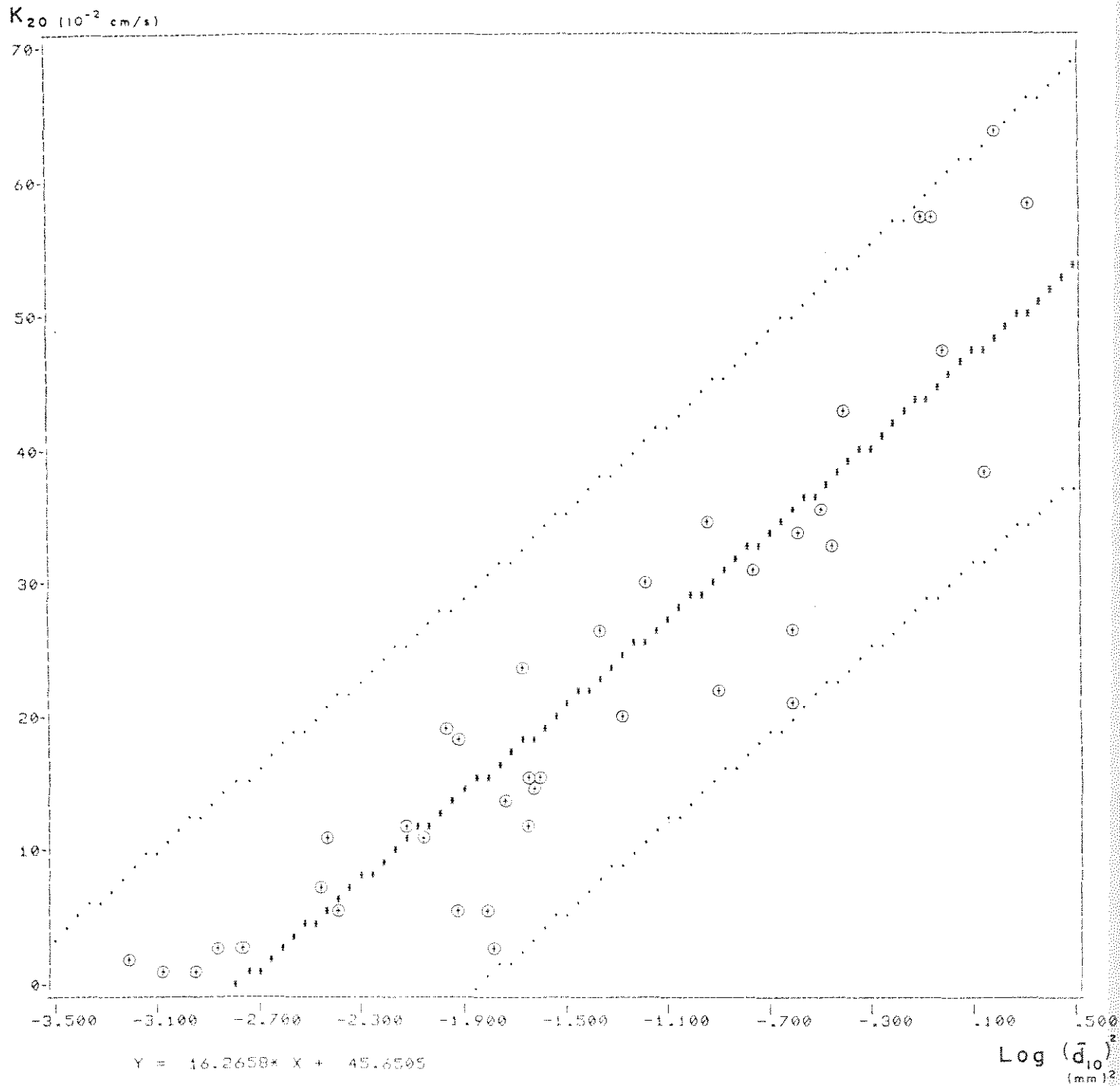
$$7.3.4.2. \quad K_{20} = 45,65 + 16,27 \times \log \bar{d}_{10}^2$$

. intervalo de confiança para 90% de nível de confiança.



$$7.3.4.3. \quad K_{20} = 45,65 + 16,27 \times \log \bar{d}_{10}^2$$

. intervalo de confiança para 95% de nível de confiança.



7.3.5. $\log K_{20} = a + b \times \log \bar{d}_{10}$

$$a = 1,77$$

$$b = 0,85$$

$$\text{coeficiente de correlação: } R = 0,897$$

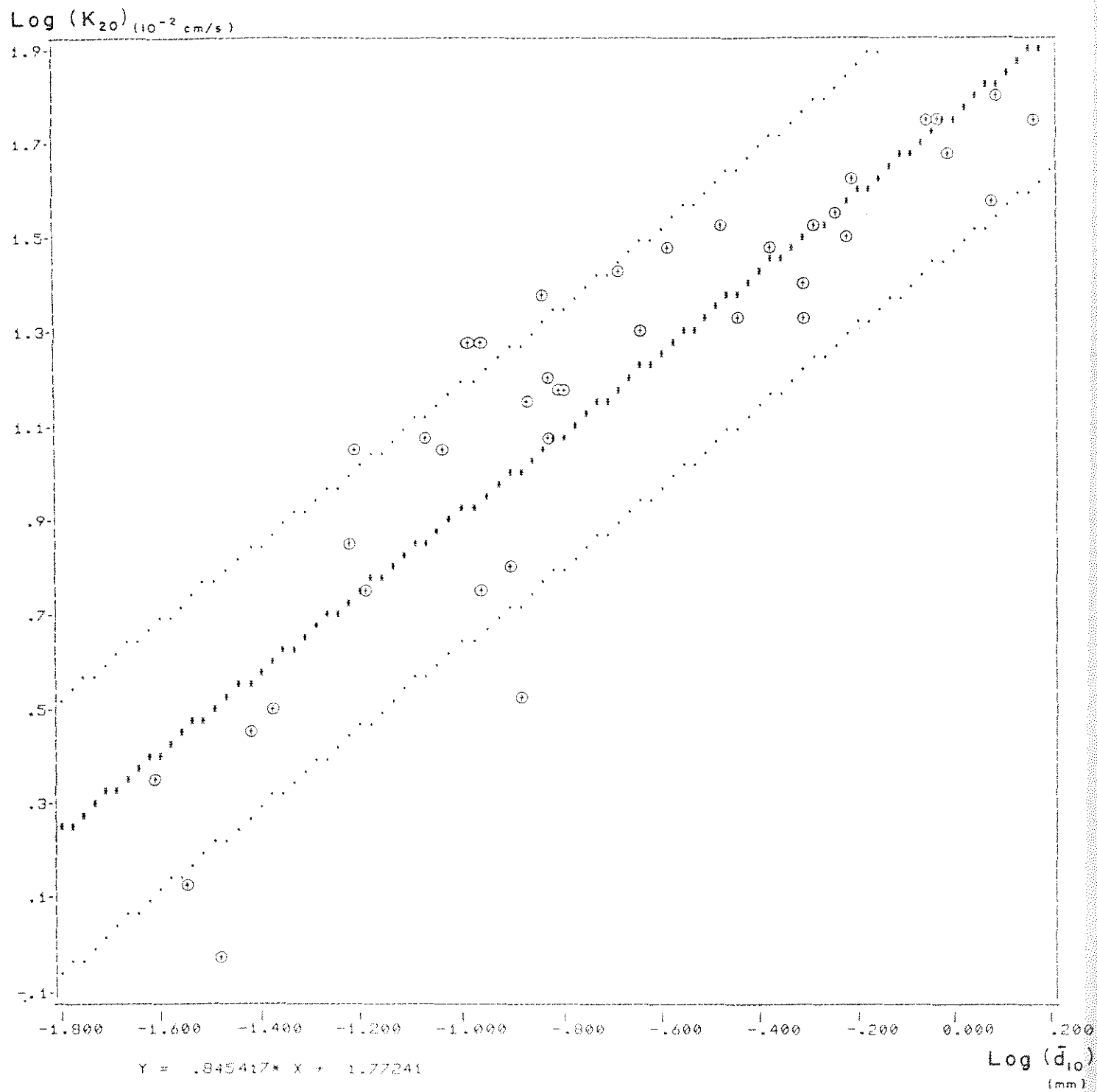
$$\text{desvio padrão} \quad : S = 0,208$$

Equação da Regressão:

$$\log K_{20} = 1,77 + 0,85 \times \log \bar{d}_{10}$$

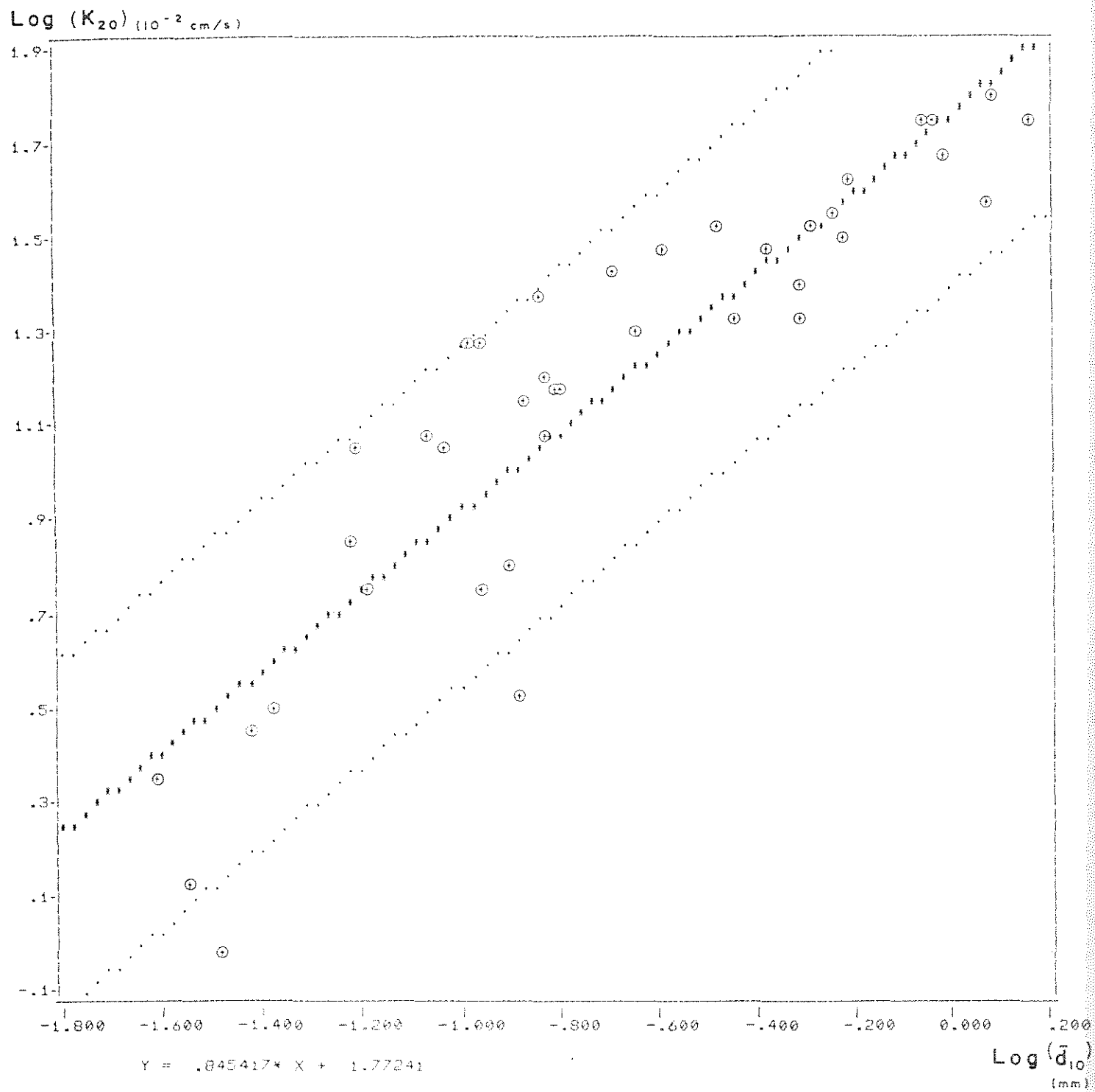
$$7.3.5.1. \quad \log K_{20} = 1,77 + 0,85 \times \log \bar{d}_{10}$$

. intervalo de confiança para 80% de nível de confiança.



$$7.3.5.2. \quad \log K_{20} = 1,77 + 0,85 \times \log \bar{d}_{10}$$

. intervalo de confiança para 90% de nível de confiança.

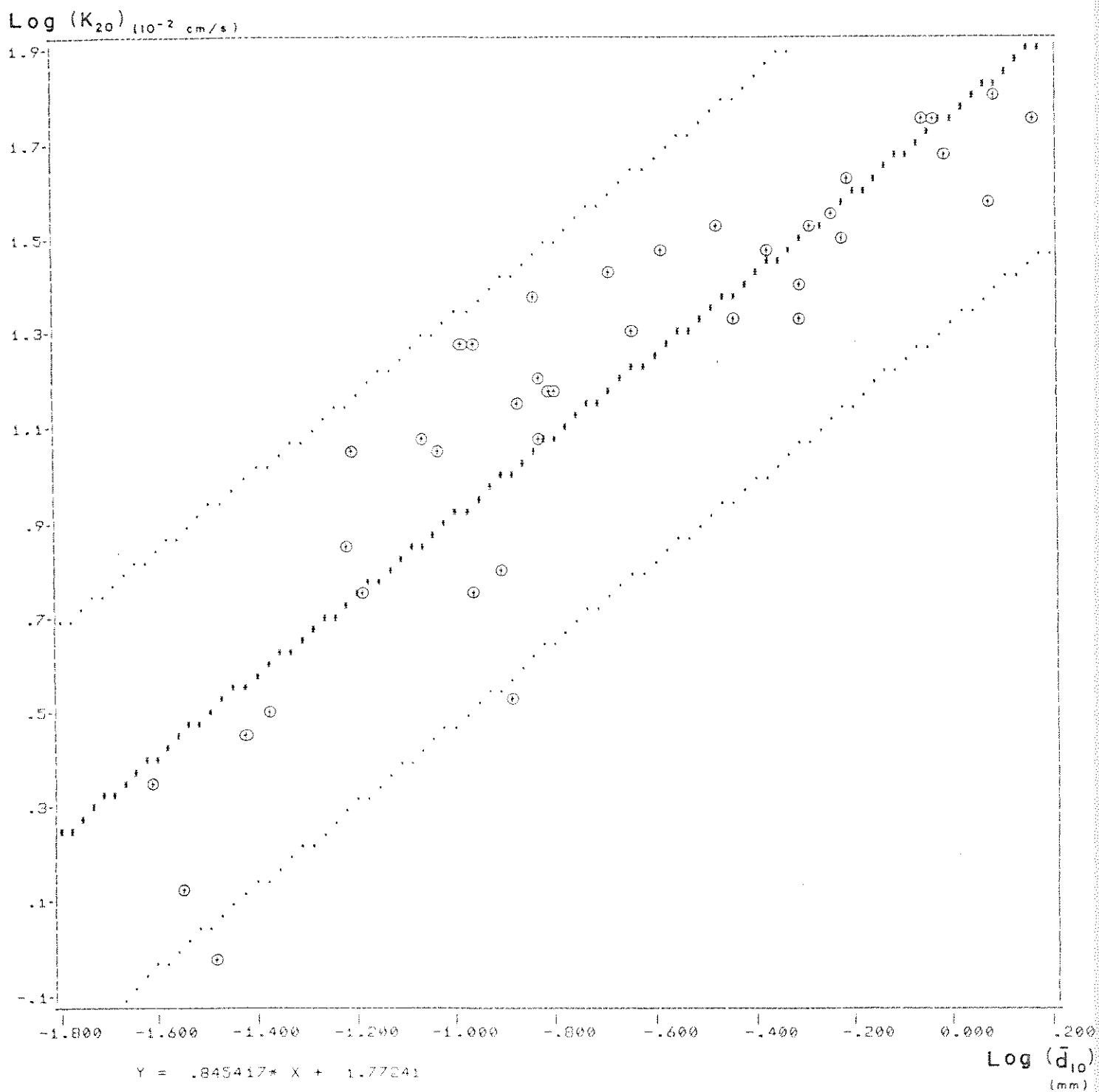


Correlação= .897482 Desvio Padrão= .207788

Intervalo de Confiança= +/- 1.350731902 / 1.06758413 / -1.698926782 / 9.1354991 Grau de Confiança= 90%

$$7.3.5.3. \quad \log K_{20} = 1,77 + 0,85 \times \log \bar{d}_{10}$$

. intervalo de confiança para 95% de nível de confiança.



7.4. Análise Comparativa das Regressões

7.4.1. Resumo dos Resultados

Será apresentado, a seguir, na tabela 7.4.1.1, um quadro resumo dos resultados encontrados, para facilidade de elaboração de um estudo comparativo entre as diversas equações de regressão ajustadas.

EQUAÇÃO	EQUAÇÃO DA REGRESSÃO (10^{-2} cm/s)	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO	DESVIO PADRÃO
E-1	$K_{20} = 8,09 + 41,63 \times \bar{d}_{10}$	0,906	7,549
E-2	$K_{20} = 15,32 + 28,24 \times \bar{d}_{10}^2$	0,801	10,667
E-3	$K_{20} = 45,65 + 32,53 \times \log \bar{d}_{10}$	0,913	7,280
E-4	$K_{20} = 45,65 + 16,27 \times \log \bar{d}_{10}^2$	0,913	7,280
E-5	$\log K_{20} = 1,77 + 0,85 \times \log \bar{d}_{10}$	0,897	0,208

Tabela 7.4.1.1

Quadro resumo dos resultados das regressões ajustadas

Na tabela 7.4.1.1, são apresentadas as equações das regressões encontradas, numeradas de E-1 a E-5, assim como os correspondentes coeficientes de correlação e desvios padrão.

Todas as equações partem de um valor de $\bar{d}_{10}$ tomado em mm, e fornecem valores de K_{20} em 10^{-2} cm/s.

7.4.2. Estudo Comparativo

Na Mecânica dos Fluidos, Poiseuille conclui que $K = f(d^2)$, para os tubos lisos de pequeno diâmetro d , conforme pode ser visto de (3.1.1.3) a (3.1.1.8).

No presente trabalho, contrariando o que diz a Mecânica dos Fluidos, a equação E-2, que fornece K_{20} em função de $\bar{d}_{10}^2$ ($K_{20} = 15,32 + 28,24 \times \bar{d}_{10}^2$), apresenta o menor coeficiente de correlação (0,801) entre as regressões pesquisadas, o maior desvio padrão (10,667), e um erro na origem bastante pronunciado. A equação E-1, que fornece K_{20} como função linear de $\bar{d}_{10}$ ($K_{20} = 8,09 + 41,63 \times \bar{d}_{10}$), apresenta valores significativamente melhores para os mesmos parâmetros, conforme pode ser visto na Tabela 7.4.1.1.

A comparação entre as equações E-1 (função linear de $\bar{d}_{10}$) e E-2 (função de $\bar{d}_{10}^2$), mostra-se francamente favorável a E-1. Por outro lado, as equações que melhor representam a dependência de K_{20} em função de $\bar{d}_{10}$, são as funções logarítmicas de $\bar{d}_{10}$ e $\bar{d}_{10}^2$, representadas respectivamente por $K = 45,65 + 32,53 \times \log \bar{d}_{10}$ e $K_{20} = 45,65 + 16,26 \times \log \bar{d}_{10}^2$, cujos coeficientes de correlação são de 0,913, desvios padrões de 7,280, e erros na origem muito pequenos.

Sendo assim, de acordo com os resultados dos experimentos executados para a elaboração deste trabalho, e contrariando o que diz a Mecânica dos Fluidos, a função $K_{20} = f(\bar{d}_{10}^2)$ não é a que melhor representa a dependência de K_{20} em função de $\bar{d}_{10}$.

Do ponto de vista puramente matemático ou estatístico, a permeabilidade de um material arenoso, seria melhor representada por uma função logarítmica do diâmetro de vazão $\bar{d}_{10}$.

No entanto, para a escolha da equação que possa melhor representar a dependência de K_{20} em função de $\bar{d}_{10}$, algumas considerações adicionais devem ser feitas.

Da comparação entre as cinco equações apresentadas na tabela 7.4.1.1, podem ser tiradas várias conclusões:

- a. A equação que apresenta o menor erro na origem é a E-5.
- b. A equação que apresenta o maior erro na origem é a E-2.
- c. As equações que apresentam o maior coeficiente de correlação são a E-3 e a E-4.
- d. A equação que apresenta o menor coeficiente de correlação é a E-2.
- e. A equação que apresenta o menor desvio padrão é a E-5.
- f. A equação que apresenta o maior desvio padrão é a E-2.
- g. A equação que apresenta a maior facilidade de manuseio e maior praticidade de uso é a E-1.

Além dos itens anteriormente expostos, pode ser ressaltado que a equação E-1, embora não seja a que apresenta o

maior coeficiente de correlação, praticamente apresenta o mesmo coeficiente da correspondente ao maior (0,906 versus 0,913).

Quanto ao erro na origem, a equação E-1, apresenta o segundo menor valor entre os encontrados.

O desvio padrão da equação E-1 (7,549), apesar de não ser o mais baixo, apresenta um valor razoavelmente bom, estando na faixa de valores apresentados pelas outras equações.

Soma-se a isso o fato de que a equação E-1 é a de mais rápida e fácil aplicação e memorização, por estar na forma linear, como função direta de $\bar{d}_{10}$.

No trabalho de Peixoto (20), uma equação da mesma forma que a E-1 foi escolhida para representar o fenômeno da percolação de água num solo arenoso, por motivos análogos.

Sendo assim, neste trabalho a equação E-1 será escolhida para representar a dependência de K_{20} em função do diâmetro de vazios $\bar{d}_{10}$.

Portanto, a permeabilidade de um material arenoso será representada, em função dos seus diâmetros de vazios, por:

$$K_{20} = 8,09 + 41,63 \times \bar{d}_{10} \quad (7.4.2.1)$$

sendo:

$\bar{d}_{10}$ em mm,

K_{20} em 10^{-2} cm/s e

$K_{20} \leq 64 \times 10^{-2}$ cm/s

CAPÍTULO VIII

COMPARAÇÃO COM ESTUDOS JÁ EXISTENTES

8. COMPARAÇÃO COM ESTUDOS JÁ EXISTENTES

8.1. Introdução

Neste capítulo, será feito um estudo comparativo com as equações de regressão a que chegaram Peixoto (20) e Felex (09), em trabalhos anteriores a este.

Peixoto trabalhou numa faixa granulométrica mais fina do que a utilizada neste trabalho, com curvas granulométricas que caracterizaram o material como situado entre areia fina e média.

Já Felex ensaiou areias contidas numa faixa granulométrica mais grossa que a ensaiada neste trabalho, com curvas granulométricas que permitem classificar os materiais investigados como variando de areias médias a pedregulhos.

No presente trabalho, os materiais utilizados para os ensaios situam-se entre as areias médias e grossas, havendo ainda umas poucas amostras que se situaram no início da faixa granulométrica correspondente aos pedregulhos.

8.2. As Regressões Existentes

Peixoto (20), submetendo areias finas e médias aos ensaios de permeabilidade, e utilizando um equipamento com permeabilidade característica de aproximadamente $6,0 \times 10^{-2}$ cm/s, chegou à seguinte expressão para a permeabilidade em função do diâmetro $\bar{d}_{10}$ do vazão.

$$K_{20} = 0,14 + 38,10 \times \bar{d}_{10} \quad (8.2.1.1)$$

sendo

$$\bar{d}_{10} \text{ em mm,}$$

$$K_{20} \text{ em } 10^{-2} \text{ cm/s e}$$

$$K_{20} \leq 6,0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$$

Jã Felex (09), ensaiando materiais variando de areias médias a pedregulhos, chegou a

$$K_{20} = 2,47 + 14,95 \times \bar{d}_{10} \quad (8.2.1.2)$$

sendo

$$\bar{d}_{10} \text{ em mm,}$$

$$K_{20} \text{ em } 10^{-2} \text{ cm/s e}$$

$$K_{20} \leq 115,0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$$

No seu trabalho, desenvolvido a partir de materiais grossos, para os quais as velocidades são relativamente altas, Felex (09) controlou a permanência dos ensaios no regime laminar,

através dos processos tradicionais, por medida do Número de Reynolds.

A permeabilidade característica do equipamento utilizado por Felex foi de aproximadamente $115,0 \times 10^{-2}$ cm/s.

8.3. Análise Comparativa

As equações de regressão já existentes anteriormente, assim como a equação ajustada neste trabalho, podem ser resumidas por:

$$\text{. Peixoto} \quad K_{20} = 0,14 + 38,10 \times \bar{d}_{10}$$

$$\text{. Felex} \quad K_{20} = 2,47 + 14,95 \times \bar{d}_{10}$$

$$\text{. Este trabalho} \quad K_{20} = 8,09 + 41,63 \times \bar{d}_{10}$$

sendo:

$$K_{20} \quad - \quad \text{em } 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$\bar{d}_{10} \quad - \quad \text{em mm}$$

Para maior facilidade de comparação, os dados podem ser apresentados num quadro-resumo.

REGRESSÃO	a	b
Peixoto	0,14	38,10
Felex	2,47	14,95
Este trabalho	8,09	41,63

Os valores do coeficiente "a" têm um peso maior nas baixas permeabilidades, ou seja, para os pequenos valores de $\bar{d}_{10}$. Sua determinação é mais significativa quando são ensaiados materiais mais finos, situados mais perto da origem.

Já os valores do coeficiente "b" governam a permeabilidade independentemente dos diâmetros dos vazios, valendo para uma larga faixa granulométrica.

Deve ser lembrado que os trabalhos ora comparados só tem validade para os materiais granulares, isto é, com granulometria partindo das areias finas e evoluindo até pedregulhos. Os materiais argilosos, que apresentam estruturação completamente diferente dos arenosos, e que se situam vizinhos à origem no que diz respeito aos diâmetros dos grãos, tem baixos valores de permeabilidade e devem ser objeto de outras pesquisas.

Sendo assim, serão tecidos alguns comentários a respeito das equações de regressão, tomando como base o seu coeficiente "b".

Sob este ponto de vista, os ensaios executados nos experimentos conduzidos por Peixoto, e os realizados para o presente trabalho, conduzem praticamente ao mesmo coeficiente "b" (38,10 e 41,63 respectivamente), com uma diferença relativa de aproximadamente 9%.

Já os resultados alcançados pelas pesquisas conduzidas por Felex diferem substancialmente dos outros dois (14,95).

Seria muito difícil e até arriscado uma tentativa de análise dos motivos que levaram diferentes pesquisas, feitas com diferentes equipamentos e sob diferentes condições, aos resultados já mencionados.

Um dos possíveis motivos poderia ser o exposto a seguir.

Peixoto (20), trabalhando com material mais fino, teve em seus experimentos uma velocidade de percolação relativamente baixa, aliada a uma velocidade crítica, necessária à permanência dos ensaios no regime laminar, relativamente alta, pois os diâmetros dos vazios formados foram relativamente muito pequenos. Daí, os seus experimentos terem se desenvolvido, provavelmente, no regime laminar.

Felex (09), trabalhando com materiais mais grossos, teve nos seus experimentos uma velocidade de percolação relativamente alta, aliada a uma velocidade crítica para regime laminar relativamente baixa, pois os diâmetros dos vazios formados foram relativamente grandes. O controle da permanência dos ensaios no regime laminar, foi feito através do Número de Reynolds, o que não conduziu a resultados satisfatórios. As permeabilidades encontradas foram mais baixas.

É necessário lembrar ainda que, no caso dos dois trabalhos já existentes, anteriores a este, e aqui comentados, foram utilizados os conceitos em uso corrente na Mecânica dos Solos, na época de sua elaboração, para o controle da turbulência nos ensaios de permeabilidade.

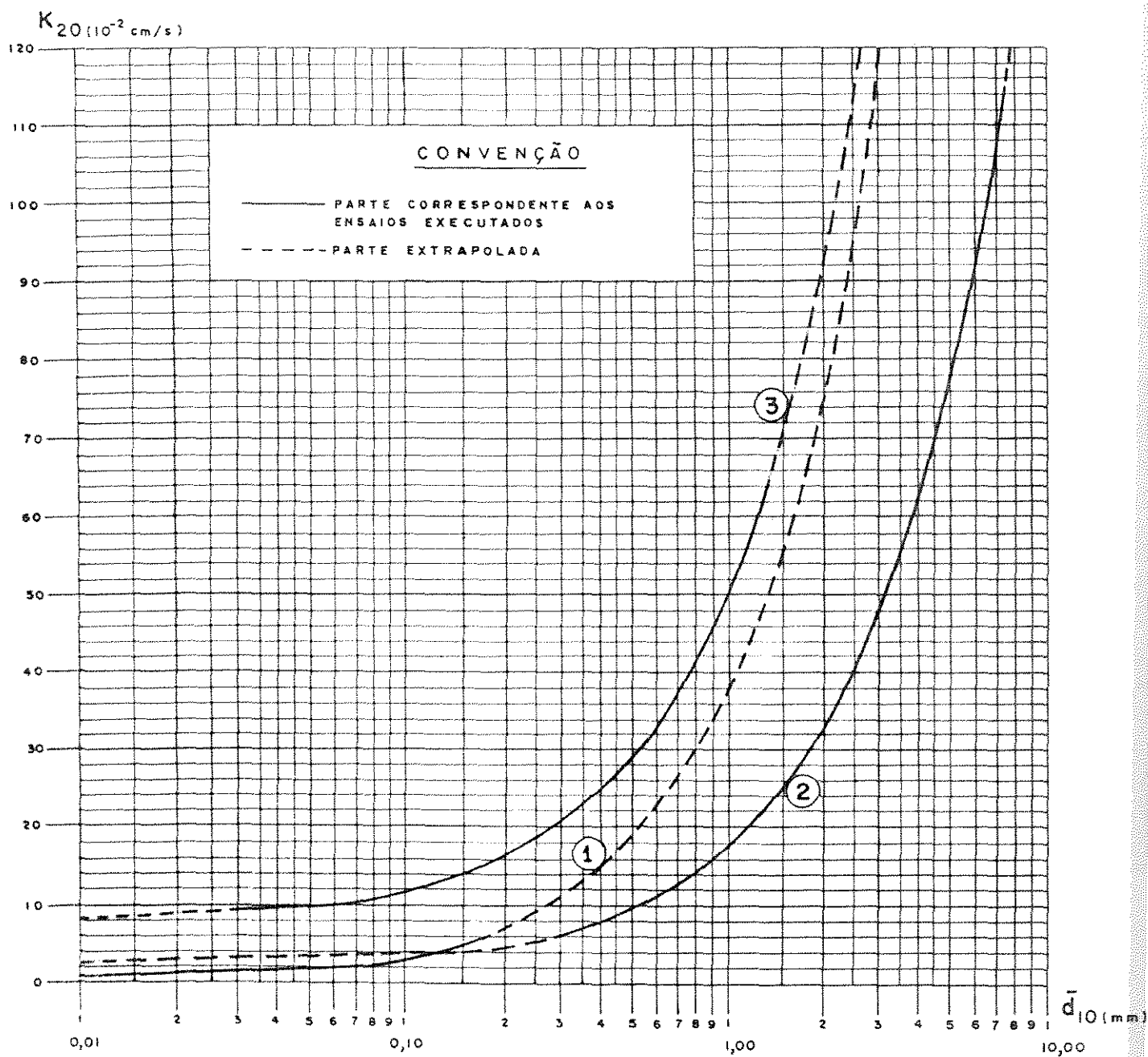
Como a turbulência tem grande influência nos valores da permeabilidade obtida nos ensaios, se ela for controlada por métodos diferentes, podem aparecer discrepâncias nos resultados finais.

No que diz respeito à carga hidráulica considerada nos ensaios, Peixoto (20) utilizou valores da carga hidráulica bruta nos seus cálculos de permeabilidade. Quanto ao trabalho de Felex (09), não são apresentados detalhes que permitam ajuizar sobre a carga hidráulica utilizada nos cálculos de permeabilidade.

Como os valores da permeabilidade medida nos ensaios

dependem da carga hidráulica, devem aparecer diferenças nos resultados finais, devidas a diferentes maneiras de medição da carga hidráulica.

A análise comparativa entre as equações de regressão que fornecem K_{20} como função linear de $\bar{d}_{10}$, propostas pelos três trabalhos analisados, pode ser feita graficamente na Figura 8.3.1.1.



Curva 1 - Peixoto $K_{20} = 0,14 + 38,10 \times \bar{d}_{10}$

Curva 2 - Felex $K_{20} = 2,47 + 14,95 \times \bar{d}_{10}$

Curva 3 - Este trabalho $K_{20} = 8,09 + 41,63 \times \bar{d}_{10}$

FIGURA 8.3.1.1.

Comparação gráfica entre este trabalho e os já existentes

8.4. Conclusão

Os ensaios executados para a elaboração dos dois trabalhos já existentes, assim como os executados para o presente trabalho, conduzem a uma dependência linear entre K_{20} e $\bar{d}_{10}$.

Essa relação linear entre K_{20} e $\bar{d}_{10}$ precisa ser cuidadosamente pesquisada, sob pena de serem alcançados resultados discrepantes, principalmente se a turbulência não for muito bem controlada.

Além disso, ficou claro que, no caso de percolação nos materiais arenosos, não pode ser utilizado qualquer método para o controle da turbulência. Os ensaios de permeabilidade nos materiais arenosos, necessitam de uma padronização no método de controle de permanência no regime laminar. Sem isso, os valores encontrados para a permeabilidade, em diferentes pesquisas elaboradas com equipamentos diferentes, dificilmente poderão ser comparados.

A medição da carga hidráulica atuante no corpo de prova também precisa ser padronizada. A comparação de resultados obtidos em diferentes trabalhos, nos quais a carga hidráulica foi medida de diferentes maneiras, apresenta muitas dificuldades para ser feita.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

9. CONCLUSÕES

As investigações até aqui elaboradas, e explicitadas nos capítulos anteriores, bem como a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e nos dois já existentes, permitem tirar uma série de conclusões.

9.1. As curvas 1, 2 e 3, da Figura 8.3.1.1., são muito próximas entre si na parte mais fina dos materiais estudados.

Na parte mais grossa, nota-se um afastamento substancial, por parte da curva 2, em relação às outras duas. Esse afastamento pode ser explicado pelo fato de que, para os materiais mais finos, a probabilidade de ocorrer a turbulência é relativamente pequena. Já para os materiais mais grossos, essa probabilidade é maior.

Se a turbulência ocorrer, haverá uma maior dispersão dos resultados.

9.2. Os ensaios de permeabilidade, de uma maneira geral, devem ter a sua permanência no regime laminar submetida a rigoroso controle, pois os valores da permeabilidade são diversos em diferentes regimes de fluxo.

9.3. O controle da turbulência pelo Número de Reynolds, para o caso da percolação de água nos solos, não leva a resultados satisfatórios, pela dificuldade na escolha dos valores numéricos dos parâmetros que entram nos cálculos ($N_R = \frac{v_c \times d}{\nu} \ll 2.000$), ou ainda pelo fato de que, para os solos, as considerações feitas para tubos lisos de pequeno diâmetro, são hipóteses discutíveis.

9.4. O controle da turbulência pode ser feito através de um gráfico ($v \times i$); para a certeza de permanência no regime laminar, pelo menos 3 pares de pontos ($v_i \times i_i$) devem estar alinhados, passando pela origem e resultando 3 valores de permeabilidade iguais.

9.5. Na Figura 8.3.1.1, constata-se que há uma pequena diferença entre as curvas 1 (Peixoto (20)) e 3 (este trabalho).

Provavelmente, pelo menos parte desta pequena diferença, pode ser explicada pela adoção de diferentes processos para a medição da carga hidráulica atuante nos corpos de prova, nos ensaios executados para os dois trabalhos.

Para a curva 1, foi considerada a carga hidráulica bruta; para a curva 3, considerou-se a carga hidráulica líquida.

9.6. Os ensaios de permeabilidade, de maneira geral, devem ter padronizado o processo de medição da carga hidráulica, pois os valores da permeabilidade medida durante os testes são diferentes, se consideradas diferentes cargas hidráulicas atuantes (brutas ou líquidas). Este fato pode dificultar substancialmente a comparação de resultados, dependendo dos equipamentos utilizados.

9.7. A situação do corpo de prova, numa cota inferior à dos reservatórios que fornecem carga para o ensaio, é essencial para que $K = f(t) = \text{constante}$, quando os ensaios são executados com água não deairada, confirmando as verificações de Peixoto (20).

9.8. Os ensaios de permeabilidade, de uma maneira geral, devem ser executados em equipamentos com a sua "permeabilidade característica" devidamente determinada, que deve ser maior que a permeabilidade do material a ser ensaiado, a menos que a diferença de carga hidráulica seja medida no corpo de prova, sem a influência das tubulações e conexões do permeâmetro.

9.9. Existe uma forte dependência entre a permeabilidade e a curva de distribuição de vazios de um material granular, representada por um de seus diâmetros, conforme pode ser verificado pelas curvas de regressão ajustadas, confirmando os resultados dos trabalhos de Peixoto (20) e Felex (09).

9.10. Apesar de existir uma forte correlação do tipo $K = f(\bar{d}^2)$, a análise dos resultados obtidos mostrou que a função $K = f(\bar{d})$, expressa melhor a dependência da permeabilidade em função da dimensão de um vazio do solo, do que $K = f(\bar{d}^2)$, da Mecânica dos Fluidos.

Este fato sugere que o modelo em uso corrente na Mecânica dos Solos, representando um solo granular como um conjunto de canais de pequeno diâmetro, deve ser revisado, e, se possível, substituído por outro que represente melhor os meios porosos.

9.11. A permeabilidade pode ser representada como uma função linear do diâmetro $\bar{d}_{10}$ da curva de vazios, confirmando também as conclusões de Peixoto (20) e Felex (09).

9.12. A função linear que fornece a permeabilidade, em função de $\bar{d}_{10}$ pode ser melhor e mais simplesmente explicitada por

$$K_{20} = 8,09 + 41,63 \times \bar{d}_{10}$$

$$\bar{d}_{10} \text{ em mm,}$$

$$K_{20} \text{ em } 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$K_{20} \leq 64 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$$

9.13. A função linear que fornece a permeabilidade em função de $\bar{d}_{10}$ pode assumir uma forma resumida do tipo

$$K_{20} = 41,63 \times \bar{d}_{10} ,$$

sem perder as suas características de aproximação.

9.14. Para uma maior facilidade de memorização e utilização prática, a forma resumida da dependência linear de K_{20} em função de $\bar{d}_{10}$, pode ser expressa por

$$K_{20} = 42 \times \bar{d}_{10} ,$$

$$\bar{d}_{10} \text{ em mm}$$

$$K_{20} \text{ em } 10^{-2} \text{ cm/s,}$$

com uma dispersão ligeiramente maior que a anterior.

CAPÍTULO X

SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DAS PESQUISAS

10. SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DAS PESQUISAS

Como sugestão para continuação das pesquisas, dentro das linhas gerais dos estudos presentes, vários assuntos podem ser citados.

10.1. Estimativas dos máximos gradientes admissíveis nos ensaios de permeabilidade, em função das características das curvas granulométricas ou das curvas de distribuição de vazios das amostras, através de um controle de turbulência $v \times i$.

10.2. Estudos da dependência entre os valores da permeabilidade a ser ensaiada, e os valores de "permeabilidade característica" do equipamento.

10.3. Estudos críticos comparativos entre as funções $K = f(d^2)$, da Mecânica dos Fluidos, e $K = f(\bar{d})$, deste trabalho e dos dois anteriores aqui analisados.

10.4. Estudos visando a obtenção do "diâmetro de vazio representativo" do material granular, para ser aplicado na equação de Reynolds, com a finalidade de determinar a velocidade crítica para permanência no regime laminar.

Esses estudos poderão ser feitos em concordância com os resultados obtidos na sugestão 10.1.

10.5. Estudos sobre a influência da esfericidade e arredondamento dos grãos, na determinação indireta da permeabilidade de materiais granulares grossos (acima de areia grossa, na faixa de pedregulhos).

BIBLIOGRAFIA

01. AZEVEDO NETTO, J.M. de & VILLELA, S.M. "Manual de Hidráulica"
Vol. 1. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1970. 381 p.
02. BADILLO, E.J. & RODRIGUEZ, A.R. "Mecânica de Suelos" - Tomo
I. México, 1969. 499 p.
03. BERTRAM, G.E. "An Experimental Investigation of Protective
Filters". Harvard Graduate School of Engineering, Publication Nº 267. 1940. 22 p.
04. BROOKS, R.H & COREY, A.T. "Hydraulic Properties of Porous
Media". USA, Colorado State University, Hydrology Papers,
Nº 3, 1964. 27 p.
05. CAPUTO, H.P. "Mecânica dos Solos e Suas Aplicações" - Vol.
1 e 2. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico S.A., 1969. 215
p. e 382 p.

06. CEDERGREN, H.R. "Seepage, Drainage and Flow Nets". New York, John Wiley and Sons, Inc, 1968. 489 p.
07. CEDERGREN, H.R. "Seepage Requirements of Filter and Pervious Bases". USA, Proc. of American Society of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 86, Nº S.M.5, pag. 35. 1960.
08. DRAPER, N.R. & SMITH, H. "Applied Regression Analysis". USA, John Wiley and Sons, Inc, 1981, 709 p.
09. FELEX, J.B. "Permeabilidade em Materiais Granulares Grossos" Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da USP. 1973. 75 p.
10. GARCEZ, L.N. "Elementos de Mecânica dos Fluidos". Hidráulica Geral. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1960. 449 p.
11. HARR, M.E. "Groundwater and Seepage". USA, Mc Graw-Hill Book Company, 1962. 315 p.
12. HATCH, L.P. "Flow Through Granular Media". USA, Journal of Applied Mechanics, 1940. p. A-110.
13. HATCH, L.P. "Discussion of the paper Flow Through Granular Media". USA, Journal of Applied Mechanics, Trans. A.S. M.E., vol. 60, 1938. p. A-86.
14. KHAZANIE, R. "Elementary Statistics in a World of Applications" USA, Goodyear Publishing Company, Inc, 1979. 488 p.

15. LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. "Soil Mechanics". USA, John Wiley and Sons, Inc. 1969. 553 p.
16. MELLO, V.F.B. & TEIXEIRA, A.H. "Mecânica dos Solos" - Vol. I. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1967. 188 p.
17. MELLO, V.F.B. & TEIXEIRA, A.H. "Fundações e Obras de Terra". Vol. II. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1971. 221 p.
18. MUSKAT, M. "The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media". USA, J.W. Edwards Inc, 1946. 763 p.
19. NOGUEIRA, J.B. "Estudo Experimental do Carreamento em Filtros de Proteção". Tese de Doutorado. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1972. 113 p.
20. PEIXOTO Jr., T. de L. "Análise da Permeabilidade de Materiais Granulares em Função da sua Distribuição de Vazios". Tese de Doutorado. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1972. 264 p.
21. SCHEIDEGGER, A.E. "The Physics of Flow Through Porous Media" USA, The Mac Millan Company, 1960. 313 p.
22. SILVA LEME, R.A. da. "Curso de Estatística - Elementos". Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. , 1974. 292 p.

23. SILVEIRA, A. "Algumas Considerações sobre Filtros de Proteção - Uma Análise do Carreamento". Tese de Doutorado. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, Publicação Nº 97, 1964. 49 p.
24. SILVEIRA, A. "Aplicações de Teorias Recentes ao Dimensionamento de Trincheiras de Drenagem para Estradas". Tese para Concurso de Livre Docência. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1964. 45 p.
25. SILVEIRA, A. "An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters". Canada, Proceedings of the VI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1965. 5 p.
26. SILVEIRA, A. "Novas Considerações sobre Filtros de Proteção". São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1966. 20 p.
27. SILVEIRA, A. "Considerações sobre a Distribuição de Vazios em Solos Granulares". São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos da USP. 13 p.
28. SPIEGEL, M.R. "Estatística". São Paulo, McGraw-Hill do Brasil Ltda., Coleção Schaum, 1972. 580 p.
29. SWANSON, W.M. "Fluid Mechanics". USA, Holt, Rinehart and Winston, 1970. 749 p.

30. TAYLOR, D.W. "Fundamentals of Soil Mechanics". USA, John Wiley and Sons, Inc, 1966. 700 p.
31. TERZAGHI, K. "Theoretical Soil Mechanics". USA, John Wiley and Sons, Inc, 1943. 510 p.
32. TERZAGHI, K. & PECK, R.B. "Soil Mechanics in Engineering Practice". USA, John Wiley and Sons, Inc, 1962. 566 p.
33. TODD, D.K. "Hidrologia de Águas Subterrâneas". (Ground Water Hydrology). São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1959. 319 p.
34. VARGAS, M. "Introdução à Mecânica dos Solos". São Paulo, McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1977. 509 p.