

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS
HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO LAMINAR NA
SEDIMENTAÇÃO DE PARTICULAS DISCRETAS EM
DUTOS QUADRADOS E RETANGULARES**

Ninoska Eliana Alcócer Carrasco



Tese apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo

São Carlos
1999

DEDALUS - Acervo - EESC



31100213743

Class.	TESE
Cutt.	0215
Tombo	0094/99

31100213743

S/S 1032342

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A354i

Alcócer Carrasco, Ninoska Eliana
Influência das características hidráulicas do escoamento laminar na sedimentação de partículas discretas em dutos quadrados e retangulares / Ninoska Eliana Alcócer Carrasco. -- São Carlos, 1999.

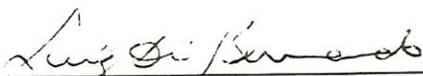
Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo.

1. Decantação de alta taxa. 2. Sedimentação.
3. Dutos quadrados e retangulares. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **NINOSKA ELIANA ALCÓCER CARRASCO**

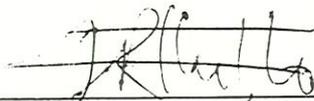
Tese defendida e aprovada em 19-03-1999
pela Comissão Julgadora:



Prof. Titular **LUIZ DI BERNARDO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



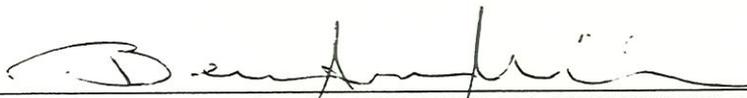
Prof. Titular **WOODROW NELSON LOPES ROMA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



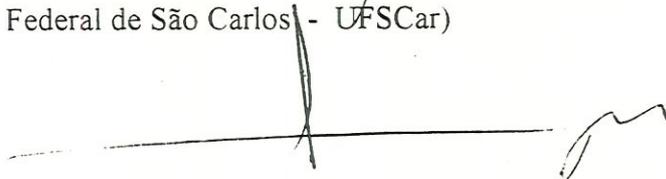
Prof. Associado **ANTONIO MAROZZI RIGHETTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **PODALYRO AMARAL DE SOUZA**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **BERNARDO ARANTES DO NASCIMENTO TEIXEIRA**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

FOI DE VIBROZ

La presente es una copia de los documentos que se encuentran en el expediente de la causa de...

Los documentos se entregaron en el mes de...

Por tanto, se declara que los documentos que se encuentran en el expediente de la causa de...

Por tanto, se declara que los documentos que se encuentran en el expediente de la causa de...

[Firma]

Por tanto, se declara que los documentos que se encuentran en el expediente de la causa de...

[Firma]

Por tanto, se declara que los documentos que se encuentran en el expediente de la causa de...

Por tanto, se declara que los documentos que se encuentran en el expediente de la causa de...

Por tanto, se declara que los documentos que se encuentran en el expediente de la causa de...

Por tanto, se declara que los documentos que se encuentran en el expediente de la causa de...

En fe de lo cual, se ha expedido el presente...

En el lugar de... a los... de... de...

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Wladimiro e Yolanda, que ensinaram a lutar pelos meus objetivos, sempre incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos, Wladimir e Yolandita, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus professores, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus colegas de trabalho, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos de infância, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos de escola, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos de faculdade, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos de trabalho, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos de vida, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais Wladimiro e Yolanda que ensinaram a lutar pelos meus objetivos, sempre incentivando e apoiando-me em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao Professor Dr. Luiz Di Bernardo, pela dedicação, incentivo e confiança demonstrada durante toda a fase de estudos.

Ao Professor Dr. Harry E. Schulz pela inestimável ajuda no desenvolvimento da modelação matemática.

Ao Professor Dr. Woodrow N.L. Roma pela ajuda na fase experimental.

Ao CNPQ e FIPAI, pela bolsa concedida.

Aos professores e funcionários do departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP pela colaboração.

Aos funcionários dos laboratórios de hidráulica e Fenômenos de transporte da Escola de Engenharia de São Carlos, Edson, Wagner e Roberto.

Ao Luís Mussetti pela colaboração durante o desenvolvimento da pesquisa experimental.

Aos colegas e amigos pela colaboração e incentivo, em particular à família França Rocha, Aydil, Cida, Silvana e Válter.

A todos que tiveram participação direta ou indireta neste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE SIMBOLOS	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	03
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1 Sedimentação de partículas discretas.....	04
3.1.1 velocidade de sedimentação das partículas discretas.....	04
3.2 Sedimentação em dutos usados na decantação de alta taxa.....	07
3.2.1 Considerações iniciais.....	07
3.2.2 escoamento no duto de sedimentação.....	10
3.2.2.1 escoamento no trecho de transição.....	12
3.2.2.1.1 Modelo teórico do escoamento para o trecho de transição.....	18
3.2.2.2 escoamento com perfil de velocidades inteiramente desenvolvido.....	24
3.3 Modelos matemáticos para sedimentação no trecho com perfil totalmente desenvolvido.....	27
3.4 Sedimentação no regime de escoamento de transição.....	35
3.4.1 dutos circulares.....	35
3.4.2 Dutos retangulares.....	38
3.5 Sedimentação no trecho de transição e no perfil desenvolvido para dutos retangulares.....	40
3.6 Considerações sobre os modelos.....	41
4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA	43
4.1 Condições iniciais.....	43
4.2 Desenvolvimento do modelo.....	44

4.2.1	Sedimentação de partículas discretas no escoamento laminar, no trecho de transição.....	46
4.2.2	sedimentação de partículas discretas no escoamento laminar, no trecho com perfil totalmente desenvolvido.....	48
4.2.3	Trajетórias de partículas discretas.....	51
5.	MATERIAL E MÉTODOS.....	52
5.1	Instalação piloto.....	52
5.2	Sistema de aquisição de dados e tratamento de imagens.....	58
5.3	Métodos.....	59
5.3.1	Procedimento para a determinação de partículas discretas.....	59
5.3.2	Procedimento de execução de ensaios.....	61
5.4	Variáveis analisadas.....	66
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
6.1	Partículas discretas.....	67
6.2	Validação da modelação matemática proposta.....	68
6.3	Comparação do modelo proposto com o de Yao transição.....	79
6.4	Influência das variáveis.....	83
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	88
ANEXO A.....	90
ANEXO B.....	106
ANEXO C.....	149
ANEXO D.....	205
ANEXO E.....	275
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	318
APÊNDICE		

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Sedimentação de uma partícula.....	05
FIGURA 3.2 - Introdução de laje intermediária nos decantadores convencionais.....	08
FIGURA 3.3 - Estabilidade do escoamento.....	10
FIGURA 3.4 - Representação esquemática do perfil de velocidades em um duto qualquer	11
FIGURA 3.5 - Perfil de velocidade inteiramente desenvolvido no regime de escoamento laminar.....	12
FIGURA 3.6 - Perfis de velocidade no regime de escoamento laminar para dutos retangulares e quadrados	14
FIGURA 3.7 - Perfis de velocidade no regime de transição em um duto circular.....	14
FIGURA 3.8 - Desenvolvimento do perfil de velocidade em duto de seção quadrada - plano central.....	16
FIGURA 3.9 - Desenvolvimento do perfil de velocidade em duto de seção quadrada - plano diagonal.....	16
FIGURA 3.10 - Variação da velocidade no centro do duto quadrado.....	17
FIGURA 3.11 - Variação da velocidade no centro dos dutos retangulares.....	17
FIGURA 3.12 - Perfil de velocidade em duto retangular $b/a = 2$	18
FIGURA 3.13 - Sistema de coordenadas para o duto retangular, no trecho de transição.....	19
FIGURA 3.14 - Sistema de coordenadas para o duto retangular, no perfil inteiramente desenvolvido.....	26
FIGURA 3.15 - Sistema de coordenadas adotadas por Yao (1970).....	29
FIGURA 3.16 - Esquema do sedimentador idealizado por Yao (1970).....	30
FIGURA 3.17 - Variação da eficiência dos sedimentadores circulares e de placas paralelas em função do comprimento relativo.....	31
FIGURA 3.18 - variação da eficiência do sedimentador de placas planas paralelas em função do comprimento relativo.....	32
FIGURA 3.19 - Variação da relação $V_s(\theta = \theta)/V_s(\theta = 0)$ com o ângulo θ	33
FIGURA 3.20 - Variação de Sc com relação a b/a para um duto de seção retangular	34

FIGURA 3.21 - Esquema da passagem da partícula dentro do duto.....	35
FIGURA 3.22 - Comprimento relativo remanescente.....	37
FIGURA 3.23 - Trajetória de uma partícula discreta em duto circular sedimentado no trecho de transição.....	37
FIGURA 3.24 - Trajetória de uma partícula discreta em duto quadrado.....	38
FIGURA 3.25 - Trajetória de uma partícula discreta em duto retangular.....	39
FIGURA 3.26 - Representação tridimensional da sedimentação em duto quadrado.....	39
FIGURA 3.27 - Sedimentador A	40
FIGURA 3.28 - Sedimentador B	41
FIGURA 3.29 - Remoção de partículas em sedimentadores: suspensão uniforme.....	42
FIGURA 3.30 - Remoção de partículas em sedimentadores: suspensão não-uniforme.....	42
FIGURA 4.1 - Esquema da trajetória da partícula no interior do duto	44
FIGURA 4.2 - Fluxograma do modelo para sedimentação de partículas discretas em dutos quadrados e retangulares.....	45
FIGURA 4.3 - Sedimentador com trajetória da partícula discreta no trecho de transição para diversas velocidades de sedimentação.	46
FIGURA 4.4 - Sedimentador com trajetória da partícula discreta no perfil de velocidades totalmente desenvolvido para diversas velocidades de sedimentação.....	48
FIGURA 4.5 - Sedimentador com trajetória da partícula discreta no trecho de transição e no perfil inteiramente desenvolvido para diversas velocidades de sedimentação.....	51
FIGURA 5.1 - Vista da instalação piloto.....	52
FIGURA 5.2 - Esquema da instalação piloto.....	53
FIGURA 5.3 - Vista da superfície da água e da ação do vertedor na caixa de recepção.....	55
FIGURA 5.4 - Vista geral do duto.....	55
FIGURA 5.5 - Dispositivo de alimentação da partícula.....	56
FIGURA 5.6 - Dispositivo para utilização do traçador.....	57
FIGURA 5.7 - Coluna de sedimentação.....	57
FIGURA 5.8 - Partícula sedimentando na coluna de sedimentação.....	58
FIGURA 5.9 - Representação esquemática do funcionamento da instalação piloto.....	61
FIGURA 5.10 - Posição das partículas nos dutos.....	63
FIGURA 5.11 - Injeção do traçador - duto quadrado $a = b = 5$ cm	64
FIGURA 5.12 - Injeção do traçador - duto retangular $a = 5$ cm e $b = 50$ cm.....	64
FIGURA 5.13a - Sequência da partícula sedimentando.....	65
FIGURA 5.13b - Sequência da partícula sedimentando.....	66

FIGURA 6.1 - Influência da relação a/b no comprimento necessário para a sedimentação de partículas no centro.....	84
FIGURA 6.2 - Influência da velocidade de sedimentação no comprimento necessário para a sedimentação de partículas no centro do duto.....	85
FIGURA 6.3 - Influência da posição da partícula na entrada do duto em função do comprimento total.....	86
FIGURA 6.4 - Influência da velocidade média de escoamento no comprimento necessário para a sedimentação de partículas no centro do duto.....	87
FIGURA B.1 a FIGURA B.81 - Trajetórias teóricas e experimentais das partículas discretas para dutos $a/b = 1$	108
FIGURA C.1 a FIGURA B.108 - Trajetórias teóricas e experimentais das partículas discretas para dutos $a/b = 0,5$	151
FIGURA D.1 a FIGURA D.135 - Trajetórias teóricas e experimentais das partículas discretas para dutos $a/b = 0,25$	207
FIGURA E.1 a FIGURA E.81 - Trajetórias teóricas e experimentais das partículas discretas para dutos $a/b = 0,1$	277

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Resumo das principais expressões para C_d	07
TABELA 3.2 - Coeficientes C_t para diferentes seções.....	15
TABELA 3.3 - Valores de u/V_{em} e de S_c	31
TABELA 5.1 - Dimensões físicas dos sedimentadores testados.....	62
TABELA 6.1 - características das partículas discretas.....	68
TABELA 6.2 - Comprimento necessário para a sedimentação de partículas discretas no duto $a/b = 1$	69
TABELA 6.3 - Comprimento necessário para a sedimentação de partículas discretas no duto $a/b = 0,5$	70
TABELA 6.4 - Comprimento necessário para a sedimentação de partículas discretas no duto $a/b = 0,25$	72
TABELA 6.5 - Comprimento necessário para a sedimentação de partículas discretas no duto $a/b = 0,1$	74
TABELA 6.6 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental Duto $a/b = 1,0$	75
TABELA 6.7 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental Duto $a/b = 0,5$	76
TABELA 6.8 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental Duto $a/b = 0,25$	76
TABELA 6.9 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental Duto $a/b = 0,1$	77
TABELA 6.10 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental Duto $a/b = 1,0$	77
TABELA 6.11 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental Duto $a/b = 0,1$	78
TABELA 6.12 - Comprimento de transição dos dutos.....	80

TABELA 6.13 - Comparação dos modelos para determinação do comprimento necessário para a sedimentação em dutos quadrados.....	81
TABELA 6.14 - Comparação dos modelos para a determinação do comprimento necessário para a sedimentação em placas planas paralelas. Variação de Sc com relação a b/a para um duto de seção retangular	82
TABELA B.1 - Descrição das figuras do duto $a/b = 1$	107
TABELA C.1 - Descrição das figuras do duto $a/b = 0,5$	150
TABELA D.1 - Descrição das figuras do duto $a/b = 0,25$	206
TABELA E.1 - Descrição das figuras do duto $a/b = 0,10$	276

LISTA DE SIMBOLOS

a	- altura do sedimentador (m)
A_s	- área projetada da partícula na direção do movimento (m^2)
b	- largura do sedimentador (m)
C_d	- coeficiente de arrasto
C_t	- coeficiente que depende da geometria do duto (adimensional)
D_p	- diâmetro da partícula (m)
D	- diâmetro do duto circular (m)
D_c	- diâmetro equivalente (m)
F_G	- peso da partícula (N)
F_E	- empuxo (N)
F_D	- força de arrasto (N)
g	- aceleração da gravidade (m/s^2)
l_{obs}	- comprimento observado (m)
l_r	- comprimento no trecho de perfil de velocidades totalmente desenvolvido (m)
L_r	- comprimento relativo remanescente (adimensional)
l_s	- comprimento total do sedimentador (m)
L_s	- comprimento relativo do sedimentador (adimensional)
l_t	- comprimento no trecho de transição (m)
m	- massa da partícula
Re	- número de Reynolds (adimensional)
t	- tempo (s)
X_s	- distância sedimentada pela partícula até o final da região de transição (m)
x,y,z	- coordenadas cartesianas
u	- componente da velocidade na direção x
v	- componente da velocidade na direção y
V_{em}	- velocidade média do escoamento (m/s)

Vol	- volume da partícula (m^3)
\bar{V}_p	- velocidade da partícula (m/s)
\bar{V}_s	- velocidade de sedimentação da partícula (m/s)
\bar{V}_e	- velocidade local do fluido (m/s)
w	- componente da velocidade na direção z
β	- valor paramétrico que define o comprimento de transição
γ	- relação a/b
μ	- viscosidade absoluta da água (Ns/m ²)
ν	- viscosidade cinemática da água (m ² /s)
θ	- angulo do sedimentador
ρ_a	- massa específica da água (Kg/m ³)
ρ_s	- massa específica da partícula (Kg/m ³)

$$b_s = 2d$$

RESUMO

Foi desenvolvido um modelo matemático para prever a trajetória de partículas discretas sedimentando em dutos quadrados e retangulares, visando o estabelecimento futuro de parâmetros de projeto de decantadores de alta taxa. Foi assumido que a velocidade de escoamento é uniforme na entrada dos dutos e, ao longo dos mesmos, a distribuição de velocidade do escoamento passa do perfil uniforme para o totalmente desenvolvido.

O modelo matemático proposto fornece a trajetória de partículas discretas sedimentando no trecho de transição e no trecho com perfil de velocidade totalmente desenvolvido, com comprovação em uma instalação piloto. Foram estudados quatro dutos com seções distintas ($5 \times 5 \text{ cm}^2$; $5 \times 10 \text{ cm}^2$; $5 \times 20 \text{ cm}^2$; $5 \times 50 \text{ cm}^2$), utilizadas nove partículas discretas com velocidades de sedimentação compreendidas entre 2,2 e 5,2 cm/min, empregadas três velocidades médias de escoamento de água nos dutos (20; 25 e 30 cm/min) e a entrada das partículas tangenciando a face superior do duto em diferentes pontos a partir do centro.

Para todas as condições estudadas, o comprimento do duto da instalação piloto foi de 1,0 m e sua altura 5 cm, ou seja, a relação comprimento/altura do duto permaneceu constante e igual a 20. O ângulo de inclinação dos dutos também permaneceu inalterado, igual a 60° .

Com base no trabalho experimental conclui-se principalmente que a modelação matemática é válida para prever o comprimento necessário para a sedimentação de partículas discretas em dutos quadrados e retangulares, nos trechos de transição e de perfil de velocidade totalmente desenvolvido.

Palavras-chave: decantação de alta taxa, dutos quadrados e retangulares, modelação matemática, sedimentação.

ABSTRACT

ALCOCER, N.E.C. (1998). *Influence of the hydraulic characteristic of laminar flow in the settling of discrete particles in the square and rectangular ducts. Doctoral Thesis - São Carlos School of engineering, University of São Paulo.*

A mathematical model for predicting the trajectory of settling discrete particles in square and rectangular ducts is developed in order to establish the design parameters of high rate settling tanks. An uniform velocity distribution was assumed at the entrance to the tank which transforms to a fully established flow.

The mathematical model proposed produces trajectory of the settling particles in transition region and in the fully established region which was confirmed in pilot installations. For duct cross-section (5X5 cm, 5X10 cm, 5X20 cm, 5X50 cm) and nine discrete particles with settling velocities between 2,2 and 5,2 cm/min studied at the average flow velocity of water (20, 25 e 30 cm/min). At all these flow conditions, the particles were admitted in the upper part of the entrance at various points.

For all the conditions studied, the length of the duct in the pilot installation was kept at 1 m and height at 5 cm, that is, ratio of length to height was unaltered at 20. Also the slope of the duct was constant through all the experiments.

On the basis of the experimental data, the main conclusion is that the mathematical model is valid for calculating the length of a settling ducts of varied cross-sections (square and rectangular) for discrete suspension, in reaches with different velocity profiles.

Keywords: High rate settlers, square and rectangular ducts, mathematical model.

1. INTRODUÇÃO

A sedimentação consiste na operação em que, por ação da gravidade, as partículas suspensas apresentam movimento descendente em um meio líquido de menor massa específica. É muito utilizada no tratamento de água para abastecimento público e no tratamento de águas residuárias domésticas e industriais.

A utilização prática e vantajosa da sedimentação na clarificação de águas exigiu que se fizessem várias tentativas com o objetivo de determinar as leis complexas que regulam seu comportamento. Apesar dos progressos conseguidos, desde a década de 1940 até a atualidade, sobre a simplificação das leis da sedimentação, na solução das equações resultantes e no isolamento e avaliação dos efeitos das variáveis envolvidas, não foi possível chegar-se a um procedimento satisfatório, capaz de permitir a transposição da teoria para o campo prático.

A operação de sedimentação é realizada em regime de escoamento contínuo, observada em decantadores convencionais e nos de alta taxa. No primeiro caso, as unidades são grandes tanques, cujo escoamento é normalmente turbulento, nos quais desenvolvem-se correntes secundárias, curtos-circuitos e efeitos adversos à sedimentação das partículas e, no segundo, tem-se unidades constituídas de grande quantidade de dutos, dispostos paralelamente e inclinados, características que permitem o estabelecimento de regime de escoamento mais estável que os primeiros.

Nos decantadores de alta taxa são utilizadas taxas de escoamento superficial na faixa de 80 a 240 m^3 / m^2 dia, enquanto nos decantadores convencionais as taxas usais são de 15 a 60 m^3 / m^2 dia. Desta maneira, a área superficial de um decantador de alta taxa, será até 16 vezes menor que a de um decantador convencional, para tratar a mesma vazão (DI BERNARDO, 1993).

Os estudos realizados por HANSEN E CULP (1967, 1968, 1969) e YAO (1970, 1973, 1975) deram impulso à implantação dos decantadores de alta taxa nos sistemas de

tratamento. No entanto, como mostrado por FADEL & BAUMANN (1990), são desconhecidos alguns aspectos importantes para a adoção de parâmetros de projeto, sendo necessários resultados experimentais, em conjunto com estudos teóricos.

YAO (1970,1973) apresentou os fundamentos teóricos sobre a sedimentação de partículas discretas que ocorre no interior de dutos, em regime laminar. O cálculo foi efetuado para o perfil de velocidade totalmente desenvolvido, permitindo determinar, em função das características do escoamento e da geometria do duto, o comprimento necessário para que uma partícula discreta qualquer sedimentasse. O autor concentrou seus estudos em dutos circulares, canais rasos e placas planas paralelas. Sugeriu o uso da equação de LANGHAAR (1942), para a determinação do comprimento do trecho de transição, o qual deveria ser somado ao comprimento necessário para a sedimentação da partícula, desprezando, dessa forma, a eventual sedimentação da partícula no trecho de transição. Com os trabalhos de CUNHA (1989), FADEL & BAUMANN (1990), SOARES (1992) e COSTA NETO (1996), foi observado que as partículas podem ser removidas no trecho de transição, contrariando os critérios do projeto estabelecidos por YAO (1970, 1973), utilizados para o dimensionamento de decantadores de alta taxa na atualidade.

SOARES (1992) realizou um estudo teórico acerca das características do escoamento e da sedimentação de partículas no trecho de transição em dutos de seção quadrada e retangular.

O estudo teórico de sedimentação de partículas discretas desenvolvido por COSTA NETO (1996) para dutos quadrados e retangulares, no trecho de transição e no trecho com perfil totalmente desenvolvido, não permitiu observar a influência dos perfis de velocidade na sedimentação das partículas discretas que entram em uma posição qualquer do topo da seção transversal do duto, já que o autor só considerou o centro da seção transversal do duto.

O presente trabalho visa complementar os estudos teóricos desenvolvidos até o momento, propondo um modelo matemático mais completo para dutos quadrados e retangulares, que na prática são os mais utilizados, e sua validação com o desenvolvimento de uma investigação experimental.

2.OBJETIVOS

Os principais objetivos do presente trabalho são:

1) Desenvolver um modelo teórico com a finalidade de contribuir para o esclarecimento do desempenho e dimensionamento dos dutos de seção quadrada e retangular, utilizados nos sedimentadores de alta taxa.

2) Conduzir um estudo experimental para demonstrar a validade do modelo.

O estudo levou em conta a análise das seguintes variáveis:

- a) configuração dos dutos (relação a/b);
- b) posição de entrada das partículas discretas na seção transversal do duto;.
- c) velocidade média de escoamento;.
- d) velocidade de sedimentação das partículas discretas;.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A extensão dos assuntos referentes à sedimentação impõe alguns limites a uma obra, não sendo possível atingir todas as questões importantes que se encontram. Assim, neste capítulo, apresentam-se os aspectos mais relevantes para o estudo realizado. Inicia-se com uma descrição do fenômeno da sedimentação de partículas discretas e da sedimentação em dutos usados na decantação de alta taxa. Segue-se com a revisão de alguns modelos matemáticos aplicáveis ao estudo em pauta.

3.1 Sedimentação de partículas discretas

O processo de sedimentação é o fenômeno físico, em que partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, devido à ação da gravidade. As partículas em suspensão, geralmente presentes nas águas de mananciais superficiais e nas águas residuárias, são classificadas como partículas discretas, quando não mudam de tamanho, forma e densidade durante a sedimentação, e como partículas floculentas, quando podem se aglomerar durante a sedimentação. No presente trabalho, serão consideradas somente as partículas discretas.

3.1.1 Velocidade de sedimentação de partículas discretas

Uma partícula discreta, suspensa em um meio líquido em repouso e de menor massa específica, será acelerada pela ação da gravidade até que as forças de resistência viscosa e de deformação do líquido sejam iguais ao peso efetivo da partícula, de tal maneira que sua velocidade descendente torna-se constante, conhecida como velocidade de sedimentação. Esquemáticamente, tem-se o diagrama de forças indicado na Figura 3.1.

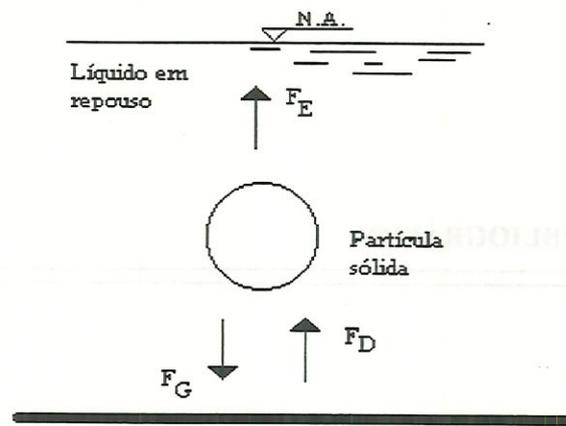


FIGURA 3.1 - Sedimentação de uma partícula

Na condição de equilíbrio, tem-se:

$$F_D = F_G - F_E \quad (3.1)$$

$$F_G = \rho_s g vol \quad (3.2)$$

$$F_E = \rho_a g vol \quad (3.3)$$

em que:

F_D : força de arrasto (N);

F_G : peso da partícula (N);

F_E : empuxo (N);

ρ_a : massa específica da água (Kg/m^3);

ρ_s : massa específica da partícula (Kg/m^3);

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

Segundo Newton, a força de arrasto é definida pela equação :

$$F_D = C_d A_s \rho_a \frac{V_s^2}{2} \quad (3.4)$$

em que:

C_d : coeficiente de arrasto;

A_s : área projetada da partícula na direção do movimento (m^2);

V_s : velocidade de sedimentação da partícula (m/s);

Para partículas esféricas :

$$V_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho_a)D_p}{3C_d\rho_a}} \quad (3.5)$$

em que:

D_p : diâmetro da partícula (m)

As equações anteriores são válidas somente para *partículas discretas*, em condições ideais, para valores de número de Reynolds elevados (2×10^3 a $2,5 \times 10^6$), conforme citado por CAMP (1946), já que com ($Re \leq 1$), o coeficiente C_d deixa de ser constante, e as forças de inércia tornam-se desprezíveis, passando a predominar a ação da viscosidade durante a sedimentação da partícula.

O número de Reynolds é dado pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{\rho_a V_s D_p}{\mu} \quad (3.6)$$

em que:

μ : viscosidade absoluta da água (Ns/m^2)

Re: numero de Reynolds

Stokes desenvolveu uma expressão para o arraste de partículas esféricas pequenas mergulhadas num fluido incompressível de extensão infinita, sob condições de escoamento laminar, desprezando as forças de inércia, indicada por:

$$F_D = 3\pi\mu D_p V_s \quad (3.7)$$

$$V_s = \frac{g(\rho_s - \rho_a)D_p^2}{18\mu} \quad (3.8)$$

As leis de Newton e Stokes são amplamente aceitas e apresentam excelente conformidade com os resultados experimentais nas faixas limites de Re. No entanto, para a faixa de transição existem diversas expressões propostas, cada uma com suas restrições parciais quanto a exatidão ou aplicabilidade. McGAUMEY (1956) apresentou as mais importantes destas formulações e suas respectivas faixas de aplicação, transcritas na tabela a seguir.

TABELA 3.1 - Resumo das principais expressões para C_d .

Autor	Expressão de C_d	Intervalo de Re
Stokes	$24/Re$	$10^{-4} - 1,0$
Allen	$12,65/Re^{0,5}$	$10 - 10^3$
Allen (Modificada)	$30/Re^{0,625}$	$1 - 10^3$
Fair	$24/Re + 3/Re^{0,5} + 34$	$0,5 - 10^4$
Newton	$cte = 0,4$	$10^3 - 2,5 \times 10^5$

FONTE: McGAUMEY (1956)

Conforme Mc GAUMEY (1956), a maioria das partículas (flocos) sedimentam nas condições em que é aplicável a lei de Stokes, com baixos valores de Reynolds.

3.2 Sedimentação em dutos usados na decantação de alta taxa

3.2.1 Considerações iniciais

Os decantadores de alta taxa são constituídos por grande quantidade de dutos paralelos, que podem ser de forma retangular, circular ou outra forma conveniente, sendo suas principais características a pequena altura dos dutos, que geralmente é de poucos centímetros, e a área efetiva de sedimentação, muitas vezes maior que a dos decantadores convencionais, apesar de a área total em planta pode ser igualada.

HAZEN (1904) mostrou que a eficiência da remoção das partículas discretas é função da área horizontal do tanque ideal, isto é, daquele no qual a sedimentação ocorre sem qualquer interferência externa ao fenômeno e independe de sua profundidade e do tempo de retenção hidráulica. Dessa maneira, previu a possibilidade de subdividir os tanques, por meio de lajes horizontais intermediárias, aumentando a eficiência da sedimentação, embora admitisse a dificuldade de limpeza inerente a essa configuração. Também reconheceu a necessidade de se limitar a velocidade do escoamento em sedimentadores rasos para evitar o arraste de partículas já depositadas no fundo. O desenvolvimento teórico do problema se baseia no conceito emitido por CAMP (1946) para o escoamento ideal, que se desenvolveria num tanque retangular com movimento uniforme através da sua seção transversal, onde todas as partículas seguiriam uma trajetória retilínea. A taxa de escoamento superficial, expressa pela vazão dividida pela área do decantador, representa a velocidade crítica de queda de partículas em suspensão e, teoricamente, as partículas com velocidades de queda superiores ou iguais a este valor crítico são totalmente removidas.

Na tentativa de aumentar a taxa de escoamento superficial, considerou-se a modificação dos decantadores convencionais, introduzindo-se lajes intermediárias paralelas ao escoamento e ao fundo, de modo que subdividisse a altura do decantador, conhecidos atualmente como decantadores de fundos múltiplos. Se uma laje intermediária fosse introduzida a uma altura h , a partir do nível de água, uma partícula com velocidade de sedimentação $V_{sb} < V_{sc}$ pode ser removida o que antes não poderia ocorrer. (Figura 3.2)

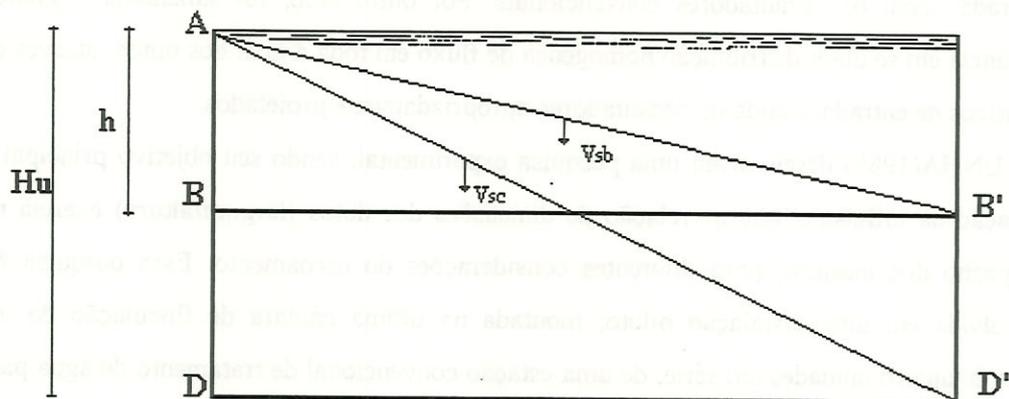


FIGURA 3.2 - Esquema de introdução de lajes intermediárias nos decantadores convencionais

FONTE: DI BERNARDO (1993).

O sucesso desta aplicação foi limitado, pois a altura entre as lajes intermediárias deveria ser tal que permitisse a limpeza e, também porque o escoamento poderia resultar instável. Segundo FISCHERSTROM (1955), os problemas apresentados pelos decantadores de fundos múltiplos seriam provenientes principalmente das deficiências hidráulicas inerentes à configuração física dessas unidades, e sugeriu manter o número de Reynolds abaixo de 500 para que fossem reduzidos esses efeitos adversos.

CULP et al. (1968, 1969) inovaram a tecnologia das unidades de sedimentação através do emprego pioneiro dos chamados decantadores de alta taxa, constituídos por grande quantidade de dutos de forma regular (retangulares, circulares, hexagonais, etc) dispostos paralelamente e introduzidos de maneira adequada no tanque de sedimentação. Inicialmente, os dutos eram colocados com inclinação de 5° no sentido do escoamento, apresentando problemas de ordem hidráulica na operação de limpeza. Estudos posteriores dos mesmos autores mostraram que, para ângulos superiores a 45° , as partículas depositadas no fundo deslizam continuamente para baixo, em sentido contrário ao do escoamento, promovendo desta maneira a autolimpeza dos dutos. Esses resultados permitiram fazer a indicação de que dutos com ângulo de inclinação de 60° são mais convenientes para o uso em decantadores de alta taxa.

CULP et al. (1967, 1968, 1969) apresentaram uma ampla referência de dados experimentais observados em plantas de tratamento de água e esgoto, enfatizando o curto tempo de retenção hidráulica e a eficiência da sedimentação muitas vezes melhor quando comparada com os decantadores convencionais. Por outro lado, foi salientada a grande importância em se obter distribuição homogênea de fluxo em toda a área dos dutos, através de dispositivos de entrada e saída de decantadores apropriadamente projetados.

CUNHA (1989) desenvolveu uma pesquisa experimental, sendo seu objetivo principal a verificação da influência que a relação de dimensões dos dutos (largura/altura) exercia no desempenho dos mesmos, para diferentes considerações do escoamento. Essa pesquisa foi desenvolvida em uma instalação piloto, montada na última câmara de floculação de um sistema de quatro unidades em série, de uma estação convencional de tratamento de água para abastecimento público. Foi variada a altura dos dutos entre 4 e 10 cm, para larguras compreendidas entre 5 e 180 cm, e estudadas velocidades médias de escoamento entre 5 e 35 cm/min. Os resultados permitiram concluir que as dimensões físicas não influenciaram significativamente no desempenho dos dutos, e indicaram que a escolha entre formas mais tubulares ou mais largas deveria ser decidida com base em custos e considerações de ordem

prática. Em algumas situações, o comportamento real do duto era inferior ao comportamento teórico do trecho de transição e, no entanto ocorria remoção considerável de partículas. Embora o trabalho de CUNHA (1989) representasse uma contribuição significativa para um melhor entendimento do fenômeno de sedimentação em dutos, deve-se ressaltar que o mesmo foi desenvolvido com partículas floculentas, fato que impede o uso da modelação matemática para verificar a trajetória das partículas.

3.2.2 Escoamento no duto de sedimentação

Admite-se que o escoamento no duto seja laminar, e sua estrutura é caracterizada pelo movimento suave em camadas. No escoamento laminar não há mistura macroscópica das camadas adjacentes do fluido. Um filamento delgado de corante, injetado num escoamento laminar, aparece como uma linha única, e não há dispersão do corante pelo escoamento. Por outro lado, um filamento de corante injetado num escoamento turbulento dispersa-se rapidamente em todo o campo de escoamento, como é ilustrado na Figura 3.3 a seguir.

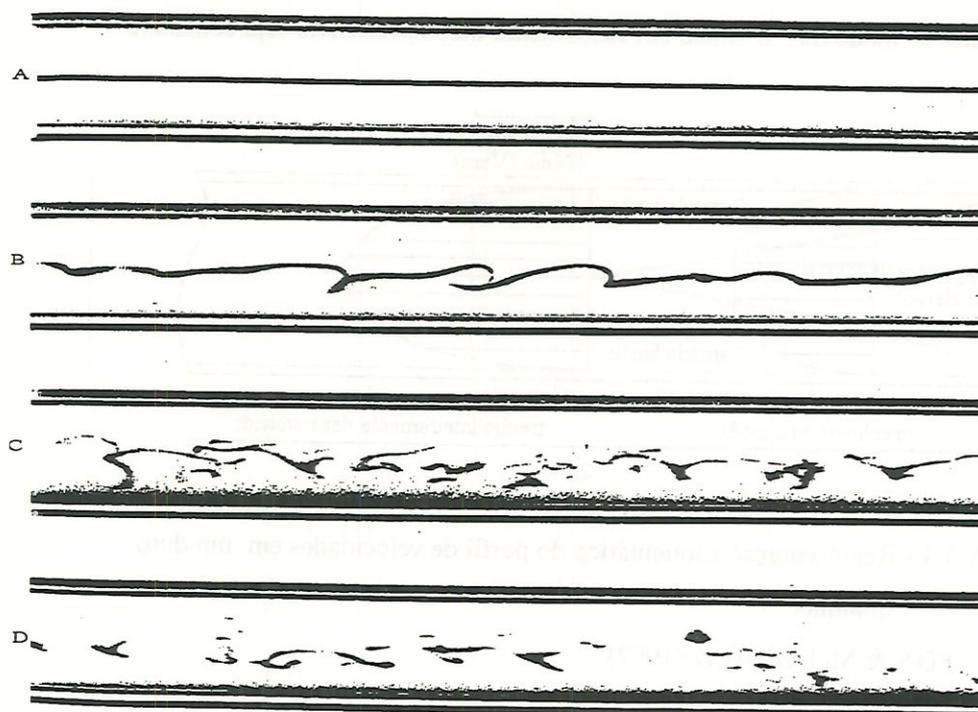


FIGURA 3.3 - Estabilidade do escoamento . A- escoamento laminar ,B escoamento de transição, C - D - escoamento turbulento.

FONTE: VAN DIJKE (1982)

Sendo permanente o escoamento de um fluido na direção longitudinal no interior de um duto, consideram-se duas regiões:

a) O trecho imediatamente a jusante da seção de entrada, chamado de trecho de entrada, trecho de transição ou trecho de estabelecimento do escoamento. Nele a forma do perfil de velocidades varia de seção para seção, tendendo assintoticamente para uma forma definida que caracteriza a região seguinte.

b) O segundo trecho, que se inicia no fim do trecho de transição, é chamado de escoamento estabelecido e caracteriza-se por ser um trecho com perfil de velocidade totalmente desenvolvido. Nele a forma do perfil de velocidades não muda de seção para seção.

Na Figura 3.4, são ilustrados os dois trechos, para um escoamento no interior de um duto de forma genérica. No trecho de transição, podem ser definidas ainda duas sub-regiões: uma camada limite, cuja espessura cresce até ocupar toda a seção do tubo, e uma zona onde a velocidade é uniforme em cada seção, chamado de núcleo potencial. Na camada limite ocorre atrito com a parede do duto, enquanto que no núcleo potencial há uma aceleração do escoamento, de modo que a vazão em escoamento incompressível seja constante.

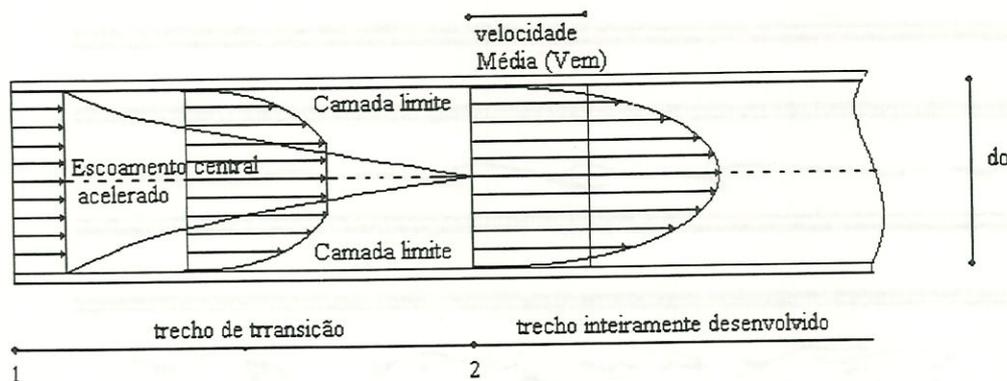
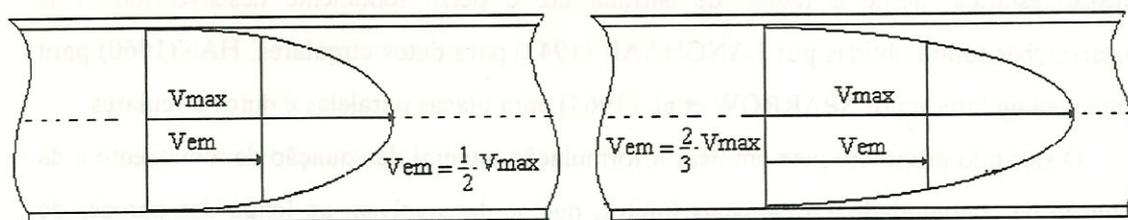


FIGURA 3.4 - Representação esquemática do perfil de velocidades em um duto qualquer.

FONTE : FOX & McDONALD (1992)

Quando o escoamento é laminar, após total desenvolvimento do perfil de velocidade, este se torna parabólico em dutos de seção circular (Figura 3.5a) e entre placas paralelas (Figura 3.5b). Porém, para outras formas, como a quadrada e a retangular (Figura 3.6), as equações dos perfis de velocidade são mais complexas.



a) Duto circular

b) Placas planas paralelas

FIGURA 3.5 - Perfil de velocidade inteiramente desenvolvido no regime de escoamento laminar.

FONTE : DI BERNARDO (1993)

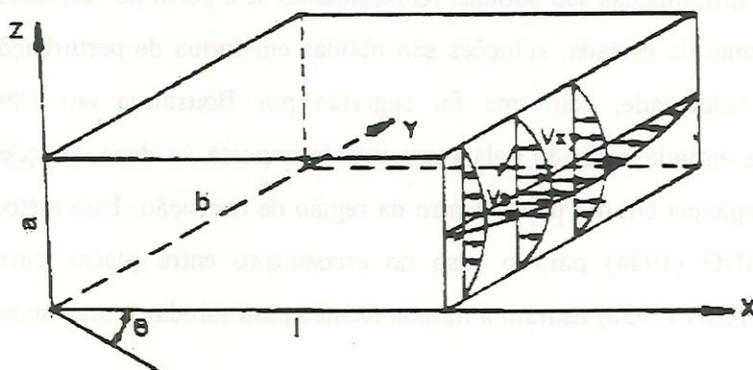


FIGURA 3.6 - Perfis de velocidade no regime de escoamento laminar para dutos retangulares e quadrados.

FONTE : DI BERNARDO (1993)

3.2.2.1 Escoamento no trecho de transição

O desenvolvimento do escoamento na região de entrada de qualquer seção do duto, de forma genérica, para condições de regime laminar, não tem uma solução exata. A dificuldade na análise é devida à natureza não linear dos termos de inércia, os quais estão presentes na equação do movimento. Diversos métodos foram propostos, e podem se distinguir quatro grupos de solução para o problema .

No primeiro grupo, encontram-se os métodos nos quais é linearizado o termo de inércia, adequados para se conhecer soluções contínuas para a distribuição de velocidades e da

pressão estática, desde a região de entrada até o perfil totalmente desenvolvido. Tais linearizações foram obtidas por LANGHAAR (1942) para dutos circulares, HAN(1960) para dutos retangulares e por SPARROW et al. (1964) para placas paralelas e dutos circulares.

O segundo grupo consiste em usar a formulação integral da equação de movimento e da equação da continuidade em camadas limites, que se desenvolvem ao longo das paredes do duto a partir da entrada. O perfil de velocidade é aproximado por um polinômio, como na aplicação do método de Karman-Pohlhausen para camadas limites de escoamentos externos. A utilização deste método para dutos circulares e para escoamento entre placas planas paralelas foi feita por SCHILLER (1922). Posteriormente, algumas modificações foram realizadas por SIEGEL (1953) e CAMPBELL & SLATTERY(1963).

O terceiro grupo consiste em subdividir a região de entrada em duas zonas. Na zona anexa à entrada, utiliza-se uma formulação diferencial com as hipóteses do modelo de camada limite. Soluções aproximadas são obtidas, representando-se o perfil de velocidade por uma série. Na zona distante da entrada, soluções são obtidas em forma de perturbações de perfil desenvolvido de velocidade, conforme foi sugerido por Bousinesq em 1891. O escoamento na região de entrada é obtido pela continuidade imposta às duas soluções que devem se unir sem discrepância em um plano dentro da região de transição. Este método foi usado por SCHLICHTING (1934) para o caso do escoamento entre placas paralelas. ATKINSON & GOLDSTEIN (1938) usaram a mesma técnica para estudar o escoamento em dutos circulares.

Finalmente, no quarto grupo, figuram as soluções numéricas das equações diferenciais do movimento e da continuidade, reduzidas às equações de diferenças finitas. Esta técnica foi usada por BODOIA & OSTERLE (1961), para a obtenção de soluções em placas paralelas.

LANGHAAR (1942) propôs a eq. (3.9) para a determinação do perfil de velocidade ao longo do trecho de transição de um duto circular:

$$L_t = \frac{l_t}{D} = 0,06 \frac{V_{em} D}{\nu} \quad (3.9)$$

em que:

V_{em} : velocidade média do escoamento (m/s);

D : diâmetro do duto circular (m);

ν : viscosidade cinemática da água (m²/s);

l_t : comprimento do trecho de transição (m);

L_t : comprimento relativo de transição (l_t/D).

Essa equação fornece resultados semelhantes aos mostrados na Figura 3.7, em que r é a coordenada radial e a_r é o raio do duto circular.

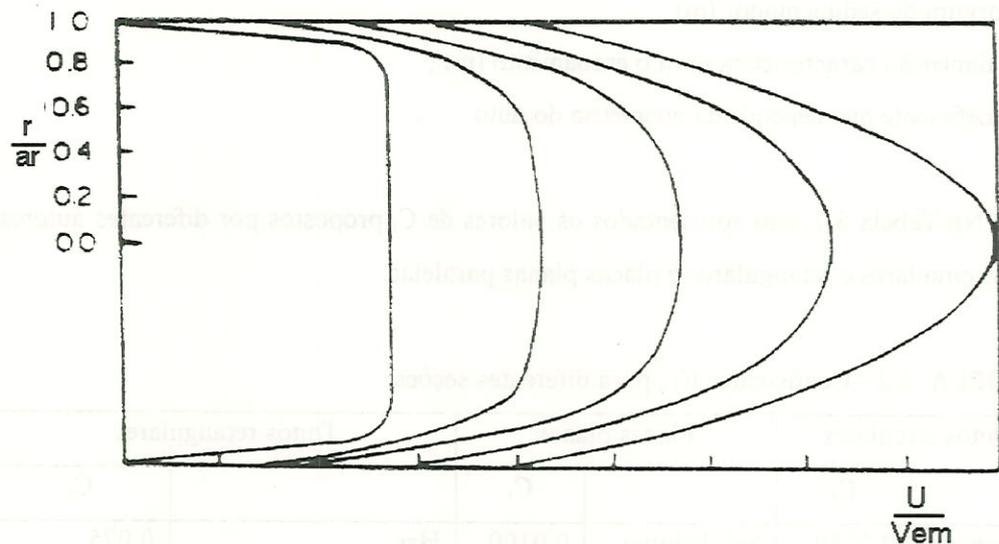


FIGURA 3.7 - Perfis de velocidade no regime de transição em um duto circular .
 FONTE : LANGHAAR (1942).

A partir de dados experimentais existentes na literatura, DI BERNARDO & SCHULZ (1991) apresentaram a eq. (3.10), para a determinação do trecho de transição de sedimentadores de seção quadrada e retangular. Cabe ressaltar que está equação pode ser utilizada com segurança para dutos ($a \leq 5b$).

$$L_t = \frac{l_t}{D_c} = C_t \text{ Re} \quad (3.10)$$

$$\text{Re} = \frac{V_{em} D_c}{\nu} \quad (3.11)$$

$$D_c = 4(\text{área da seção molhada/perímetro molhado})$$

$$D_c = \frac{8ab}{a+b} \quad (3.12)$$

em que:

a : altura do sedimentador (m);

b : largura do sedimentador (m);

D_c : dimensão característica para o escoamento (m) ;

C_t : coeficiente que depende da geometria do duto.

Na Tabela 3.2, são apresentados os valores de C_t propostos por diferentes autores para dutos circulares e retangulares e placas planas paralelas.

TABELA 3.2 - Coeficientes C_t , para diferentes seções.

Dutos circulares		Placas planas		Dutos retangulares	
	C_t		C_t		C_t
Langhaar	0.0580	Schlichting	0.0100	Han	0.075
Schiller	0.0288	Sparrow	0.0065	Goldstein & Kreid	0.090
				Sparrow	≥ 0.080

Autores como GOLDESTEIN & KREID (1967) citam o trabalho teórico de Han em que a constante C_t é igual a 0,075, porém esses autores, após realizarem uma investigação experimental, utilizando anemometria a laser, obtiveram perfis reais de velocidade, conforme se vê nas Figuras 3.8 e 3.9, para duas seções transversais distintas, central e diagonal, em que se observam a evolução da região central acelerada e a da camada limite. Esses pesquisadores concluíram que a constante C_t , para aquela forma, deve ser da ordem de 0,09.

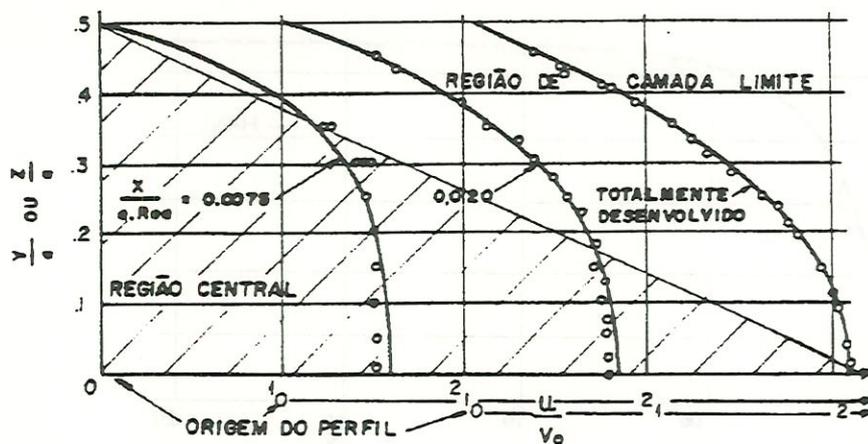


FIGURA 3.8 - Desenvolvimento do perfil de velocidade em duto de seção quadrada plano central.

FONTE: GOLDESTEIN & KREID (1967)

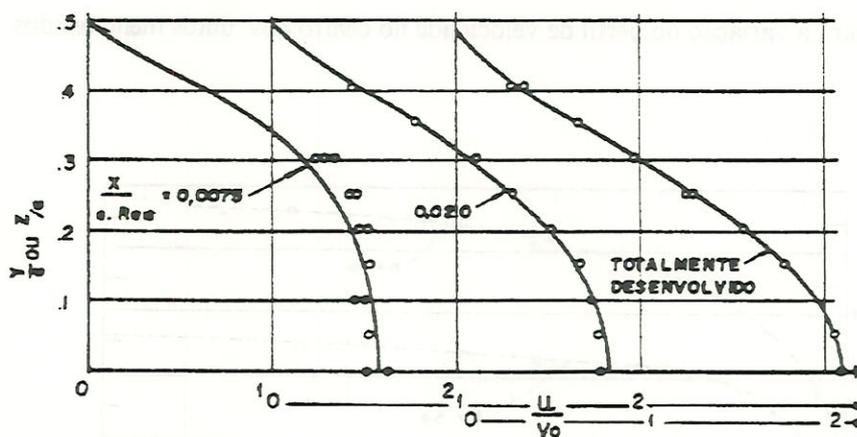


FIGURA 3.9 - Desenvolvimento do perfil de velocidade em duto de seção quadrada plano diagonal.

FONTE: GOLDESTEIN & KREID (1967)

Na Figura 3.10, vê-se a proximidade dos resultados experimentais da variação da velocidade no centro do duto de seção quadrada, obtidos por GOLDESTEIN & KREID (1967) quando comparados com os resultados teóricos obtidos por HAN (1960)

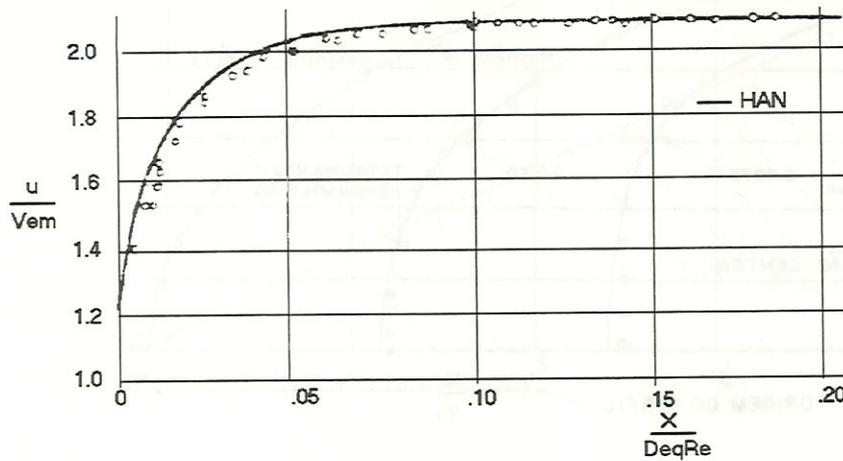


FIGURA 3.10 - Variação da velocidade no centro do duto quadrado
 FONTE: GOLDSTEIN & KREID (1967)

SPARROW et al. (1967) efetuaram medidas para o perfil de velocidade em dutos de seção retangular com relação entre os lados de 2:1 e 5:1, sendo utilizado como fluido o ar. A Figura 3.11 mostra a variação do perfil de velocidade no centro dos dutos mencionados.

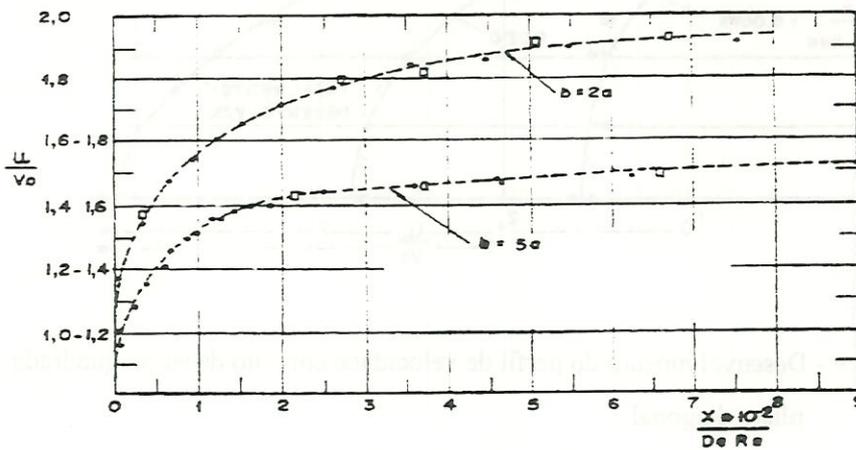
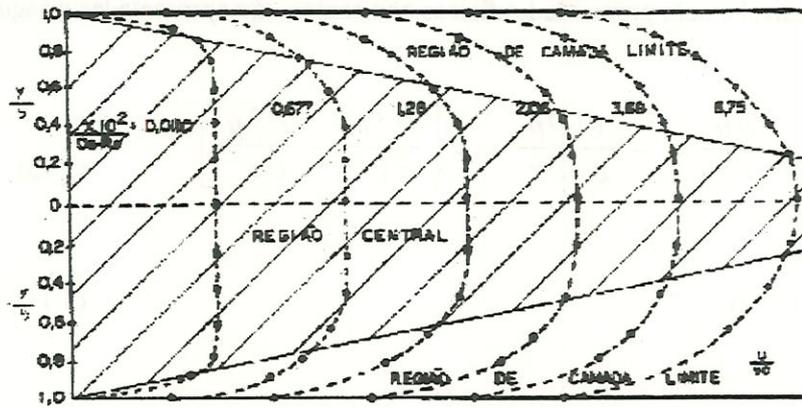
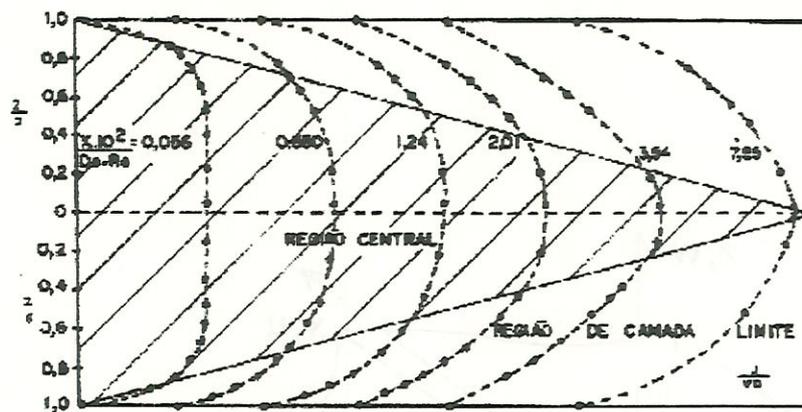


FIGURA 3.11 - Variação da velocidade no centro dos dutos retangulares.
 FONTE: DI BERNARDO (1993)

Podem-se observar, na Figura 3.12, a evolução da região central acelerada e a formação da camada limite. Esses pesquisadores chegaram à conclusão de que a constante C_1 , para as duas seções retangulares estudadas, deveria ser maior ou igual a 0,08.



a) plano central



b) Plano diagonal

FIGURA 3.12 - Perfil de velocidade em duto retangular $b/a = 2$

FONTE: SPARROW (1967)

3.2.2.1.1 Modelo teórico do escoamento para o trecho de transição

Segundo HAN (1960), a equação da quantidade de movimento da camada limite na direção axial eq. (3.13) e a equação da continuidade eq. (3.14), baseadas na Figura 3.13, para o fluido incompressível e com propriedades físicas constantes, são apresentadas a seguir:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

em que:

x, y, z : coordenadas cartesianas;

u : componente da velocidade na direção axial;

v : componente da velocidade na direção y ;

w : componente da velocidade na direção z ;

b : largura (m);

a : altura (m);

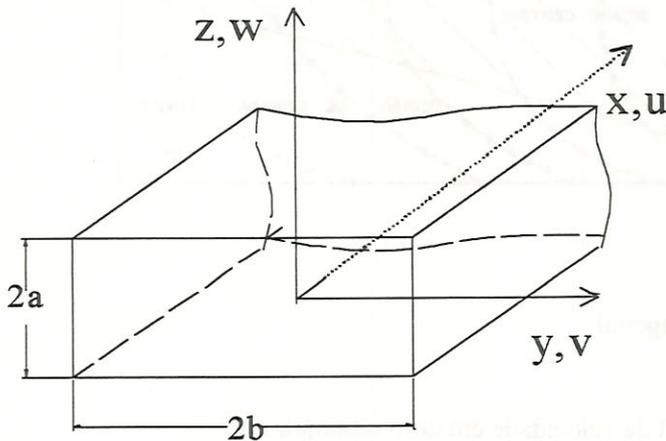


FIGURA 3.13 - Sistema de coordenadas para o duto

FONTE : HAN (1960)

A análise da camada limite considera que a tensão de cisalhamento em uma pequena região próxima à parede do duto é grande e conduz às seguintes conclusões :

i) O termo $\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)$ é muito pequeno quando comparado com os termos

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right).$$

ii) As velocidades transversais v e w são pequenas quando comparadas com a velocidade u .

iii) O termo gradiente de pressão $\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)$ é independente das coordenadas da seção transversal, e é função só de x .

Realizando-se as simplificações acima mencionadas, e multiplicando-se as eq. (3.13) e eq (3.14) por $dz dy$ e integrando-se na seção transversal, o resultado é a equação integral de Von Karman:

$$\int_A u^2 dz dy = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \int_A dz dy + \nu \int_A (\nabla^2 u) dz dy \quad (3.15)$$

$$\int_A u dz dy = 4abV_{em} \quad (3.16)$$

A solução para as equações (3.15) e (3.16) constitui uma primeira aproximação para a eq. (3.13).

Linearizando-se a eq. (3.13), substituindo-se os termos convectivos do lado esquerdo por $(\nu\beta^2 u)$, a equação resultante é:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \beta^2 u + \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.17)$$

Observa-se que β é função de x .

A utilização da eq.(3.17) para gerar um perfil de velocidade na transição tem a vantagem de não necessitar da espessura finita da camada limite.

$$u = \left(-\frac{16}{\pi^2}\right) \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}\right) \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn} \left[\cos\left(\frac{m \pi z}{2a}\right) \cos\left(\frac{n \pi y}{2b}\right) \right] \quad (3.18)$$

válida para $|z| < a$ e $|y| < b$

A eq. (3.18) deve satisfazer a condição de velocidade nula quando $|z| = a$,
 $|y| = b$. O desenvolvimento da serie de Fourier para a velocidade u deve cumprir :

$$u = \sum_{m,n=\text{int eiros pares.}}^{\infty} C_{mn} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn} \left[\cos\left(\frac{m\pi z}{2a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{2b}\right) \right] \quad (3.19)$$

Substituindo-se as eq. (3.18) e eq. (3.19) na eq. (3.17), C_{mn} é determinado. A expressão da velocidade na equação 3.19 torna-se:

$$u = \left(-\frac{16}{\pi^2}\right) \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}\right) \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} (2a/\pi)^2 \cos(m\pi z/2a) \cos(n\pi y/2b)}{mn \left[m^2 + n^2 g^2 + \left(\frac{2\beta a}{\pi}\right)^2 \right]} \quad (3.20)$$

O termo de queda de pressão é eliminado pela relação da continuidade (eq. 3.16). Portanto, integrando-se na seção transversal, obtém-se:

$$\frac{u}{V_{em}} = \frac{\pi^2}{4} \frac{\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \cos(m\pi z/2a) \cos(n\pi y/2b)}{mn \left[m^2 + n^2 \gamma^2 + \left(\frac{2\beta a}{\pi}\right)^2 \right]}}{\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 \left[m^2 + n^2 \gamma^2 + \left(\frac{2\beta a}{\pi}\right)^2 \right]}} \quad (3.21)$$

β é o valor paramétrico que define o comprimento do trecho de transição

Para determinar a variação de β com x ; considera-se:

na entrada do duto:

$$x = 0, (u/V_{em}) = 1 \quad \beta = \infty \quad (3.22)$$

no Perfil inteiramente desenvolvido:

no Perfil inteiramente desenvolvido:

$$x = \infty \quad (u/Vem) \rightarrow (u/Vem)_{\text{estabelecido}} \quad \beta = 0 \quad (3.23)$$

A eq. (3.13), para $x = y = 0$, ou seja na linha central do duto, se torna:

$$u_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu (\nabla^2 u)_0 \quad (3.24)$$

Multiplicando-se a eq.(3.24) por $dzdy$ e integrando-se na seção transversal, o resultado é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_A \frac{u_0^2}{2} dzdy = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \int_A dzdy + \nu \int_A (\nabla^2 u)_0 dzdy \quad (3.25)$$

Subtraindo-se a eq.(3.25) da eq. (3.15), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_A \left(u^2 - \frac{u_0^2}{2} \right) dzdy = \nu \int_A \left((\nabla^2 u) - (\nabla^2 u)_0 \right) dzdy \quad (3.26)$$

Os integrandos da eq. (3.26) são funções apenas de β . Portanto temos:

$$I_1(\beta) = \int_A [u^2 - u_0^2/2] dzdy \quad (3.27)$$

$$I_2(\beta) = \left\{ \nu \int_A [\nabla^2 u - (\nabla^2 u)_0] dzdy \right\}^{-1} \quad (3.28)$$

Detalhes do desenvolvimento das eq. (3.27) e (3.28) são mostrados no Anexo A.

A eq. 3.26 pode ser colocada da seguinte forma:

$$\frac{d}{dx} (I_1) = \frac{1}{I_2} \quad (3.29)$$

ou

$$x = \int_{b=\infty}^b I_2 d(I_1) \quad (3.30)$$

A eq.(3.30) mostra a relação entre x e β . O trabalho numérico consiste em fixar o valor a/b , e seguir os passos:

- i) Atribuir uma série de valores de β para a eq. (3.30);
- ii) Calcular os integrandos I_1 e I_2 ;
- iii) Plotar I_2 versus I_1 , tomando-se β como valor paramétrico;
- iv) Integrar numericamente a eq.3.30, ou seja calcular a área entre as curvas I_1 e I_2 . A área representa o valor de z correspondente ao valor de β no final do processo de integração.

A expressão de dupla soma indicada pela eq. 3.21 foi reduzida a uma expressão de soma simples, para reduzir o esforço computacional:

$$\frac{u}{V_{em}} = \frac{F_1}{F_2} \quad (3.31)$$

em que:

$$F1 = \frac{1}{b^2 a^2} \left(\frac{\cosh \beta z}{\cosh(\beta a)} - 1 \right) + \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{16 (-1)^{\frac{n-1}{2}} \cos \left[\frac{n\pi z}{2a} \right] \cosh \left\{ \frac{\pi}{2\gamma} \left[v^2 + \left(\frac{2\beta a}{\pi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{y}{b} \right\}}{\pi^3 n \left[n^2 + \left(\frac{2b a}{\pi} \right)^2 \right] \cosh \left\{ \frac{\pi}{2\gamma} \left[n^2 + \left(\frac{2\beta a}{\pi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}} \quad (3.32)$$

$$F_2 = \frac{1}{\beta^2 a^2} \left(\frac{\tanh(\beta a)}{\beta a} - 1 \right) + \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{32}{\pi^4 n^2 \left[n^2 + \left(\frac{2\beta a}{\pi} \right)^2 \right]^*} \frac{\tanh \left\{ \frac{\pi}{2\gamma} \left[n^2 + \left(\frac{2\beta a}{\pi} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}}{\frac{\pi}{2\gamma} \left[n^2 + \left(\frac{2\beta a}{\pi} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (3.33)$$

A eq. (3.31) satisfaz a eq. (3.17), as condições de contorno e a equação da continuidade. A soma infinita foi trocada por uma soma finita com o índice n variando de 1,3,5... a 199.

Estima-se que os integrandos I_1 e I_2 apresentam precisão até a oitava casa.

O comprimento do trecho de transição é definido como a distância a partir da entrada até o ponto onde a velocidade da linha central é 99% da velocidade central, quando o escoamento está totalmente desenvolvido.

3.2.2.2 Escoamento com perfil de velocidade inteiramente desenvolvido

Considerando-se o escoamento do fluido no duto retangular ou quadrado em regime laminar, conforme mostra a Figura 3.14 . A partir das equações de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mathcal{G} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (3.34)$$

em que:

x,y,z : coordenadas cartesianas;

u : componente da velocidade na direção x ;

v : componente da velocidade na direção y ;

w : componente da velocidade na direção z ;

b : largura (m);

a : altura (m);

Condições:

- i) Não existe nenhum gradiente de pressão nas direções y e z .
 ii) Para o caso $\theta = 60^\circ$ { no duto inclinado existem forças de corpo }

$$X = -\rho g \sin \theta = g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.35)$$

iii) O fluido é incompressível.

As velocidades $v = w = 0$, ou seja, as velocidades nos eixos y e z são nulas.

Considerando-se as condições estabelecidas para o problema, a eq. (3.34) fica:

$$\left[\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = - \frac{1}{\mu} \frac{\partial (\rho g + p)}{\partial x} = - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p^*}{\partial x} \quad (3.36)$$

A solução da equação :

$$u = \frac{a^2}{2\mu} \frac{\partial P^*}{\partial x} \frac{y}{a} \left(\frac{y}{a} - \frac{b}{a} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \sin \left(\frac{m\pi y}{b} \frac{a}{a} \right) \left(A_m \cosh \left(\frac{m\pi z}{b} \frac{a}{a} \right) + B_m \sinh \left(\frac{m\pi z}{b} \frac{a}{a} \right) \right) \quad (3.37)$$

As constantes A_m e B_m podem ser determinadas através das condições de contorno, ou seja:

$$u = 0 \text{ para } y = 0 \text{ e } y = b \quad (3.38)$$

$$u = 0 \text{ para } z = 0 \text{ e } z = a \quad (3.39)$$

Para $z = 0$, a eq. (3.37) fica:

$$0 = \frac{a^2}{2m} \frac{\partial P^*}{\partial x} \frac{y}{a} \left(\frac{y}{a} - \frac{b}{a} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin \left(\frac{m\pi y}{b} \frac{a}{a} \right) \quad (3.40)$$

em que, o coeficiente A_m é encontrado pela formula de Fourier:

$$A_m = - \frac{2b^2}{m\pi^3} \frac{\partial P^*}{\partial x} [\cos(m\pi) - 1] \quad (3.41)$$

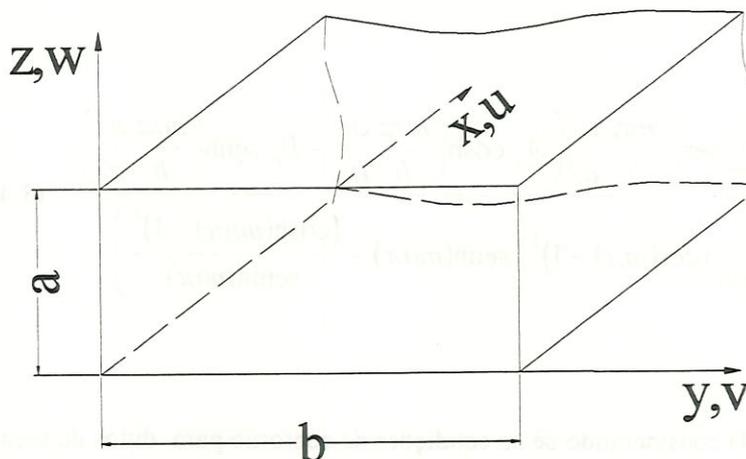


FIGURA 3.14 Sistema de Coordenadas para o duto retangular.

FONTE: ROUSE (1959).

Para $z = a = nb$ a eq (3.37) fica:

$$0 = \frac{a^2}{2m} \frac{\partial \mathcal{P}^*}{\partial x} \frac{y}{a} \left(\frac{y}{a} - \frac{b}{a} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \text{sen} \left(\frac{m\pi y}{b} \frac{a}{a} \right) (A_m \cosh mn\pi + B_m \sinh mn\pi) \quad (3.42)$$

Substituindo a eq.3.41 na eq.3.42 tem-se:

$$B_m = -A_m \left(\frac{\cosh(mn\pi) - 1}{\sinh(mn\pi)} \right) \quad (3.43)$$

Cálculo da velocidade média:

$$V_{em} = \frac{\int_0^a \int_0^b u(z,y) dz dy}{\int_0^a \int_0^b dz dy} \quad (3.44)$$

$$V_{em} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathcal{P}^*}{\partial x} \left[-\frac{b^2}{12} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2b^3}{m^5 \pi^5 a} (\cos(m\pi) - 1)^2 \left(\sinh(mn\pi) - \frac{(\cosh(mn\pi) - 1)^2}{\sinh(mn\pi)} \right) \right] \quad (3.45)$$

$$\frac{u}{V_{em}} = \frac{\frac{a^2}{2} \frac{y}{a} \left(\frac{y}{a} - \frac{b}{a} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \text{sen} \left(\frac{m\pi y}{b} \frac{a}{a} \right) \left(A_m \cosh \left(\frac{m\pi z}{b} \frac{a}{a} \right) + B_m \sinh \left(\frac{m\pi z}{b} \frac{a}{a} \right) \right)}{\left[-\frac{b^2}{12} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2b^3}{m^5 \pi^5 a} (\cos(m\pi) - 1)^2 \left(\sinh(mn\pi) + \frac{(\cosh(mn\pi) - 1)^2}{\sinh(mn\pi)} \right) \right]} \quad (3.46)$$

A partir da eq. (3.34) considerando-se as condições de contorno para dutos de seção circular, de placas planas paralelas e de canais rasos, pode ser encontrada a relação $\frac{u}{V_{em}}$, como mostra a Tabela 3.3.

3.3 Modelos matemáticos para a sedimentação no trecho com perfil totalmente desenvolvido

YAO (1970) apresentou os fundamentos teóricos da sedimentação em dutos, a partir do ponto em que o regime de escoamento fosse laminar, o que permite determinar, em função das características do escoamento e da geometria do duto, o comprimento necessário para que uma partícula discreta qualquer se sedimente.

A equação do movimento de uma partícula discreta, suspensa em escoamento laminar, é dada por:

$$m \frac{d \vec{p}}{dt} = (\rho_a - \rho_s) vol \vec{g} - \vec{F}_D \quad (3.47)$$

em que:

m : massa da partícula (kg);

\vec{F}_D : força de arrasto (N);

ρ_a : massa específica da partícula (Kg/m³);

ρ_s : massa específica da água (Kg/m³).

Vol : volume da partícula (m³)

t : tempo (s);

g : aceleração da gravidade (m/s²).

\vec{V}_p : velocidade da partícula (m/s)

Como $\vec{V}_s = \vec{V}_p - u$, a força de arrasto será igual para partículas esféricas e resulta igual a:

$$\vec{F}_D = 3\pi\mu D_p (\vec{V}_p - u) \quad (3.48)$$

em que:

\vec{V}_s : velocidade de sedimentação da partícula (m/s):

u : velocidade local do fluido (m/s);

D_p : diâmetro da partícula (m);

μ : viscosidade absoluta da água (Ns/m²).

Se não forem considerados os efeitos inerciais ($m dV_p / dt = 0$), depois de combinadas as equações tem-se:

$$\vec{V}_s = \vec{V}_p - \vec{V}_e = \frac{(\rho_a - \rho_s) Vol g}{3\pi\mu d_p} \quad (3.49)$$

Considerando-se o sistema de coordenadas, em que o eixo x é paralelo à direção do escoamento, θ é o ângulo entre o eixo x e o plano horizontal, u é a velocidade no ponto P, na direção do eixo x. (Figura 3.15).

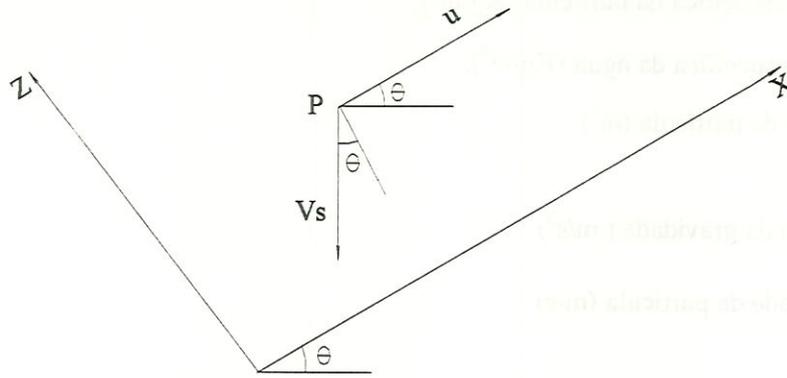


FIGURA 3.15- Sistema de coordenadas

FONTE: YAO (1970).

$$V_p = V_{px} \vec{i} + V_{pz} \vec{j} \quad (3.50)$$

$$V_{px} = u - V_s \text{ Sen } \theta = \frac{dx}{dt} \quad (3.51)$$

$$V_{pz} = -V_s \text{ cos } \theta = \frac{dz}{dt} \quad (3.52)$$

Combinando-se as equações 3.51 e 3.52, obtém-se:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{-V_s \text{ cos } \theta}{u - V_s \text{ sen } \theta} \quad (3.53)$$

$$udz - V_s \text{ sen } \theta dz + V_s \text{ cos } \theta dx = 0 \quad (3.54)$$

$$\int \frac{u}{V_{em}} \frac{dz}{a} - \frac{V_s \text{ Sen } \theta}{V_{em}} \int \frac{dz}{a} + \frac{V_s \text{ Cos } \theta}{V_{em}} \int \frac{dx}{a} = C1 \quad (3.55)$$

Integrando-se para as seguintes condições (Figura 3.16):

$$\text{na entrada : } Z = 1 \text{ (} z = a \text{) e } X = 0 \text{ (} x=0 \text{)} \quad (3.56)$$

$$\text{na saída : } Z = 0 \text{ (} z = 0 \text{) e } X = L_s = ls/a \quad (3.57)$$

tem-se:

$$\int_1^0 \frac{u}{V_{em}} dZ = \frac{V_s}{V_{em}} \{ \text{sen } \theta + L_s \cos \theta \} \quad (3.58)$$

Conhecendo-se V_s e fixando-se θ e V_{em} , o comprimento relativo, L_s , para a remoção de partícula considerada em um sedimentador com escoamento laminar estabelecido irá depender de sua forma, ou seja, do termo $\int_1^0 \frac{u}{V_{em}} dZ$, que foi denominado por Yao de S_c e que corresponde á condição crítica para o sedimentador, quando a partícula se encontra na seção central do duto.

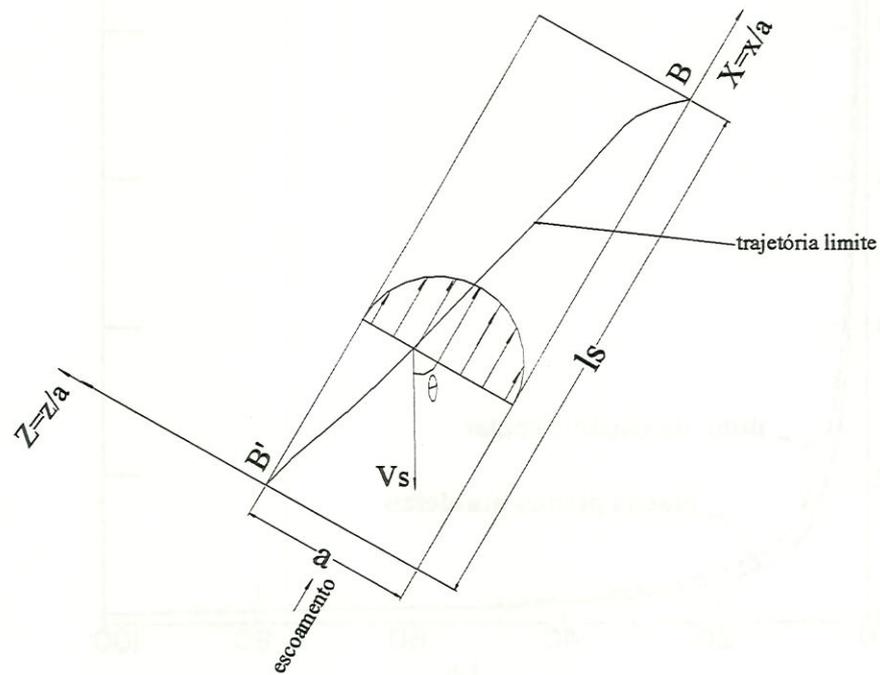


FIGURA 3.16 - Esquema do sedimentador Idealizado

FONTE: Yao (1970)

TABELA 3.3 - Valores de u/V_{em} e de S_c .

Tipo de sedimentador	u/V_{em}	S_c
Duto circular	$8(Z-Z^2)$	$4/3$
Placas planas paralelas	$6(Z-Z^2)$	1
Canais rasos	$1.5(2Z-Z^2)$	1

Fonte: YAO (1970)

Com base nos valores de S_c apresentados na Tabela 3.3, conclui-se que, teoricamente, os dutos de placas planas paralelas e de canais rasos são mais eficientes que os correspondentes formados por dutos circulares, operando sob mesmas condições.

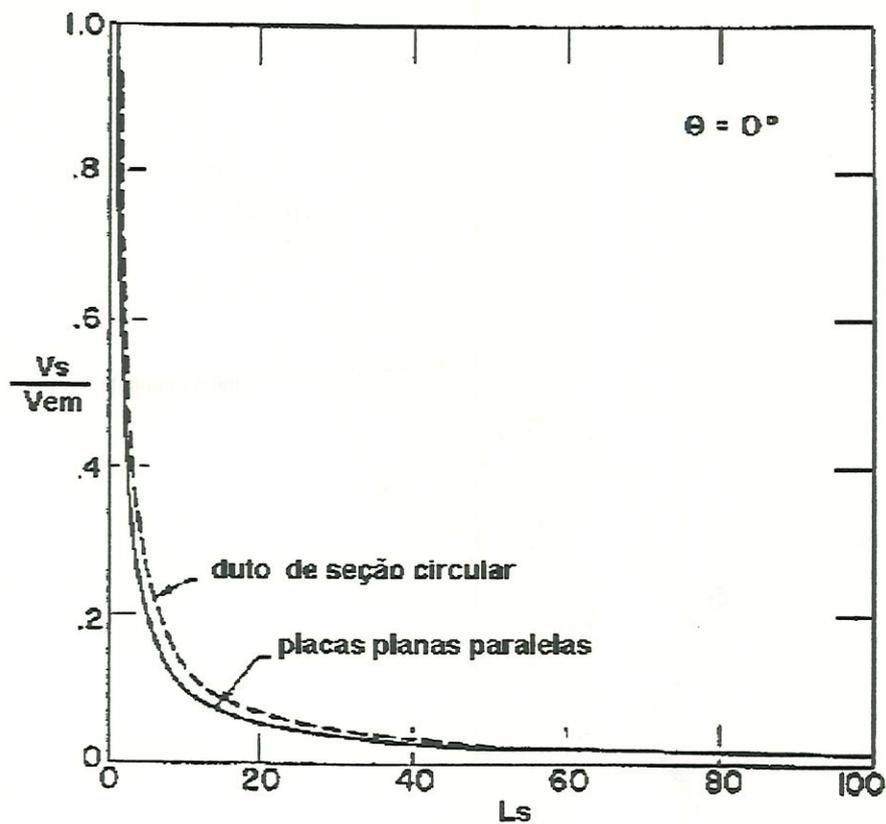


FIGURA 3.17 - Variação da eficiência dos sedimentadores circulares e de placas paralelas em função do comprimento relativo.

FONTE : DI BERNARDO (1993)

A Figura 3.17 mostra a variação de V_s/V_{em} em função de L_s , com $\theta = 0^\circ$ e um valor fixo de V_{em} , para duto de seção circular e placas paralelas. Para os dois tipos de sedimentadores, o valor de V_s diminui rapidamente com o aumento de L_s , significando um aumento da eficiência até L_s da ordem de 20. A partir desse valor, pouca variação de V_s é obtida.

Esse comportamento pode, também, ser observado nos dutos de placas paralelas, para outros ângulos, como mostra a Figura 3.18.

Variando-se o valor de θ , entre 0° e 90° , obtém-se a Figura 3.19, para $L_s = 20$. Para L_s e V_{em} fixos, o valor de V_s ($\theta = 0^\circ$) é constante e, portanto, à medida que aumenta θ , é necessário um valor maior de V_s ($\theta = \theta$). Apesar disso, o valor de θ tem sido adotado entre 50° e 60° para facilitar o deslizamento do lodo depositado no sedimentador.

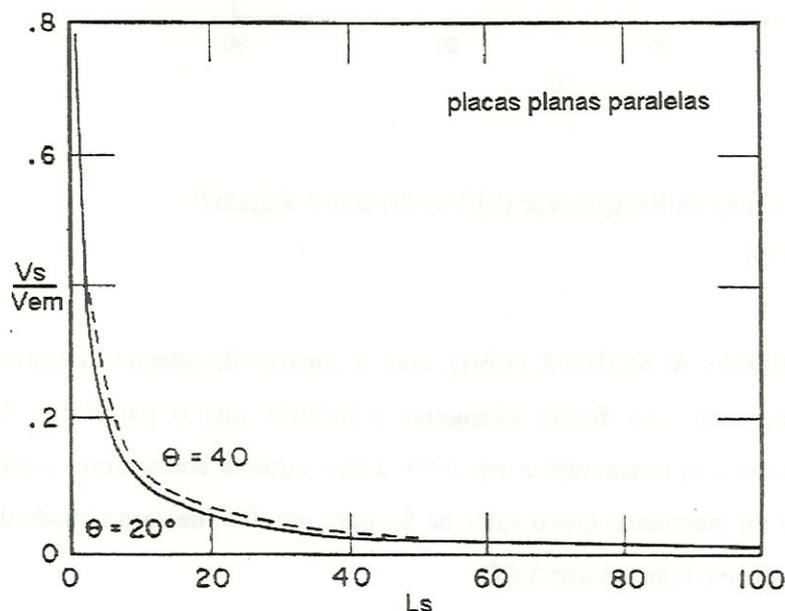


FIGURA 3.18 - Variação da eficiência do sedimentador de placas planas paralelas em função do comprimento relativo.

FONTE : DI BERNARDO (1993).

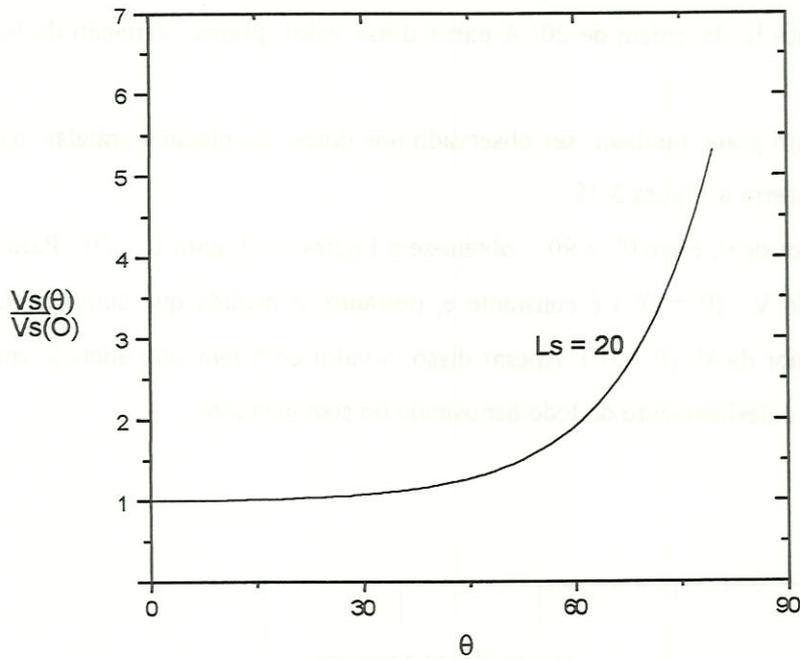


FIGURA 3.19 - Variação da Relação $V_{sc}(\theta)/V_{sc}(0)$ com o ângulo θ .

FONTE : YAO (1970)

DI BERNARDO, ROMA & SCHULZ (1991), com o objetivo de estender a teoria de YAO (1970) a qualquer duto com forma retangular e mostrar que o parâmetro S_c é influenciado pela relação b/a , apresentaram a eq. 3.59. Esses autores construíram a curva apresentada na Figura 3.20 mostrando que o valor de S_c , para um duto de seção quadrado é 1.43, em vez de $11/8$, conforme relatado por YAO.

$$S_c = \int_1^0 \frac{udz/a}{V_{em}} = \frac{\frac{2}{3} - \frac{64}{\pi^4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^4 \cosh[(2n+1)b/2a]}}{\left[\frac{2}{3} - \frac{128}{\pi^5 b/a} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \operatorname{tgh}((2n+1)\pi b/a) \right]} \quad (3.59)$$

Comparando-se a eficiência dos sedimentadores de placas planas paralelas e dutos quadrados tem-se::

a) Se os sedimentadores têm os mesmos valores de θ , L_s e V_{em} , a velocidade de sedimentação de aquela partícula considerada crítica, que se deseja remover, deverá ser 1,43 vezes maior para o duto quadrado.

b) Se os sedimentadores têm os mesmos valores de θ , L_s e V_s , a velocidade média de escoamento no duto de placas planas paralelas poderá ser 1,43 vezes maior, indicando que o decantador de alta taxa teria menores dimensões para um mesmo desempenho.

c) Se os sedimentadores têm os mesmos valores de V_{em} , θ e V_s , o comprimento relativo L_s , será menor para o duto de placas planas paralelas, indicando que o decantador de alta taxa teria menor profundidade para um mesmo desempenho.

YAO (1970,1973) propõe que o comprimento total do sedimentador l_s seja igual à soma do trecho de transição l_t calculada pela equação de LANGHAAR (1942), com o do comprimento remanescente para o escoamento com perfil de velocidade totalmente desenvolvido l_r , nos seguintes casos, $l_s = l_t + l_r$ se $l_t = l_r$ e $l_s = 2l_r$ se $l_t > l_r$.

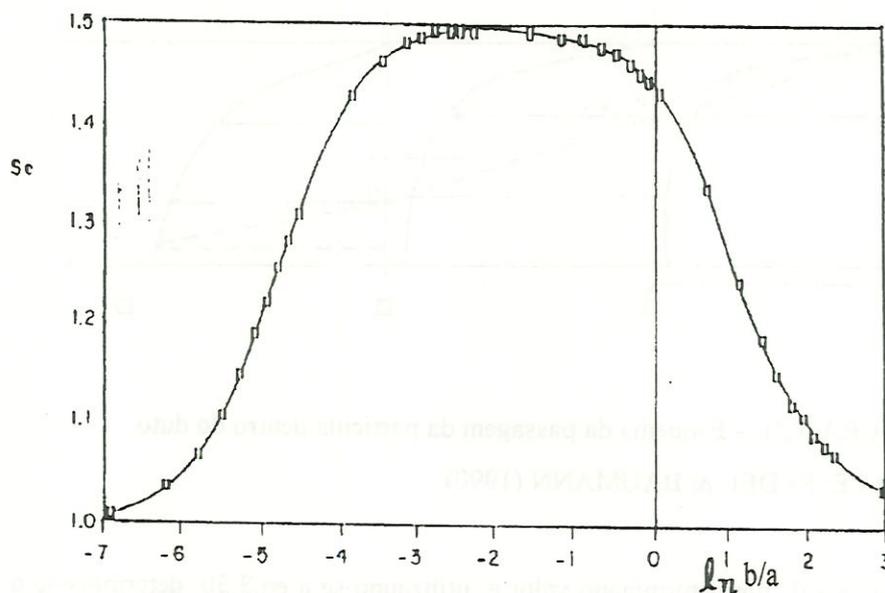


FIGURA 3.20 - Variação de S_c com relação b/a para um duto de seção retangular

FONTE: DI BERNARDO, ROMA & SCHULZ (1991)

3.4 Sedimentação no regime de escoamento de transição

A sedimentação no regime de escoamento de transição está sendo amplamente estudada. Trabalhos como de FADEL & BAUMANN (1990), CUNHA (1989), SOARES (1992) e COSTA NETO (1996) comprovaram a remoção de partículas neste trecho.

3.4.1 Dutos circulares

Utilizando a equação proposta por Langhaar, FADEL & BAUMANN (1990) desenvolveram um modelo que permite determinar os perfis de velocidade ao longo do duto circular, e seu efeito na trajetória da partícula, até que esta sedimente.

Os seguintes passos resumem o modelo de FADEL & BAUMANN (1990), que também foi utilizado por SOARES (1992) e COSTA NETO (1996) :

1. Supõe-se que a partícula que deve ser removida completamente entre no ponto A da seção I, da Figura 3.21.
2. A partícula atinge o ponto B na seção II pela sedimentação em uma distância X.

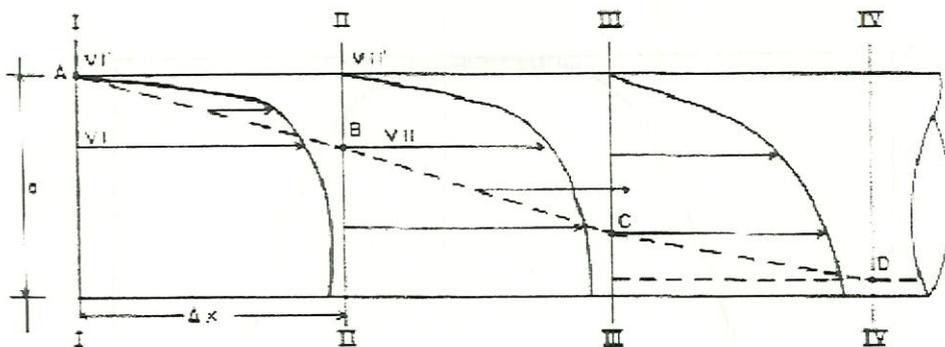


FIGURA 3.21 - Esquema da passagem da partícula dentro do duto.

FONTE: FADEL & BAUMANN (1990)

3. Atribui-se a β um determinado valor e, utilizando-se a eq.3.30, determina-se o valor correspondente da distância de X.
4. Supõe-se que a altura de sedimentação, Z_1 seja igual a $(0.05 a)$ para uma primeira aproximação.

5 Utiliza-se a eq. 3.31 para calcular os perfis de velocidades e encontrar as quatro velocidades locais (VI, VI', VII, VII').

6. Supõe-se que a partícula move -se do ponto A para o ponto B com uma velocidade igual à média das velocidades locais:

$$V_{em} = \frac{VI + VI' + VII + VII'}{4} \quad (3.60)$$

7 Calcula-se o tempo necessário para que a partícula passe de A para B :

$$t = \frac{Lz}{V_{em}} \quad (3.61)$$

8. Conhecendo-se a velocidade de sedimentação da partícula , V_s , calcula-se a altura de sedimentação real:

$$Z_a = V_c * t \quad (3.62)$$

9. Se Z_a for maior ou menor ao valor de Z_1 adotado inicialmente adota-se Z_1 igual altura Z_a calculado no passo 8, e repetem-se os passos 5 a 8 até que a altura Z_a seja igual a Z_1

10. Quando $Z_a = Z_1$, considera-se que a partícula moveu-se para o ponto B.

11. A velocidade VII será considerada como a velocidade VI' para o comprimento do duto entre as seções II e III, somente para o efeito de nomenclatura.

12. Repetem-se os passos 3 a 10 para o movimento da partícula do ponto B ao C e assim por diante, até que a partícula sedimente no fundo do tubo, ou até que seja atingido o final do comprimento de transição.

13. A soma dos comprimentos incrementais ao longo do tubo, até que a partícula atinja o fundo, será igual ao comprimento necessário para a sedimentação.

O comprimento remanescente, caso a partícula não atinja o fundo do duto na região de transição como mostra a Figura 3.22, foi calculado através da seguinte equação:

$$Lr = D \left[8 \left(\frac{V_{em}}{V_s} \cos \theta \right) \left(\frac{Z_r^2}{2} - \frac{Z_r^3}{3} \right) - Z_r \operatorname{tg} \theta \right] \quad (3.63)$$

$$Z_r = \frac{D - Z_s}{D} \quad (3.64)$$

em que:

θ : ângulo do sedimentador;

L_r : comprimento relativo remanescente;

Z_s : distância sedimentada pela partícula até o final da região de transição (m);

D : diâmetro do duto de seção circular (m);

V_{em} : velocidade média de escoamento (m/s);

V_s : velocidade de sedimentação da partícula (m/s)

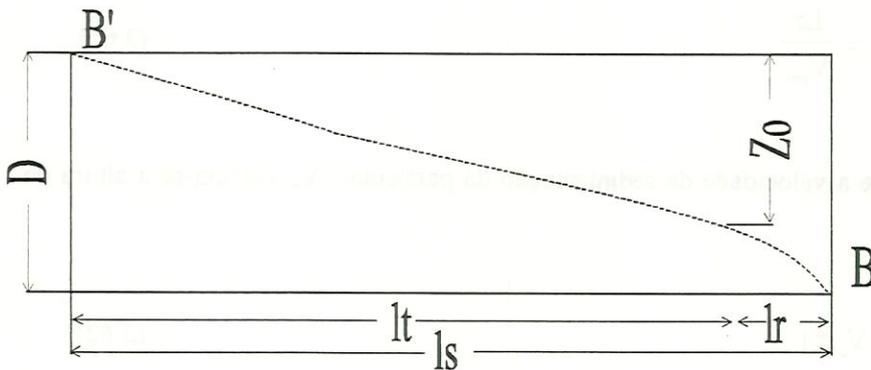


FIGURA 3.22 -Comprimento relativo remanescente

FONTE: FADEL & BAUMANN (1990).

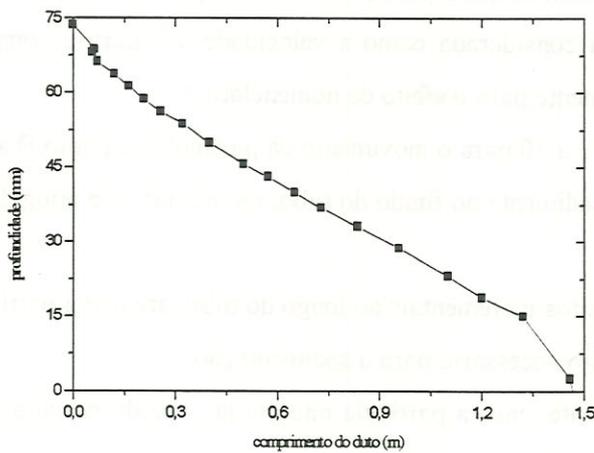


FIGURA 3.23 -Trajetória de uma partícula discreta em duto circular sedimentando no trecho de transição.

FONTE: FADEL & BAUMANN (1990).

Na Figura 3.23, é mostrada a trajetória de uma partícula que entra na parte superior de um tubo de 75 mm de diâmetro, para as seguintes condições: $V_{em} = 45$ cm/min; $V_s = 3$ cm/min; $\theta = 5^\circ$; temperatura de água = 32°C ; comprimento de transição, $L_t = 2,7$ m; tempo médio de sedimentação = 2,5 min. Como se vê na Figura 3.18, a partícula sedimenta a uma distância da ordem de 1,5 m, inferior ao comprimento do trecho de transição.

3.4.2 Dutos retangulares

SOARES (1992), utilizando o modelo matemático para o desenvolvimento do perfil de velocidades em dutos quadrados e retangulares de HAN (1960), e fazendo uma adaptação do modelo de sedimentação apresentado por FADEL & BAUMANN (1990), mostrou as trajetórias das partículas entrando em diferentes posições no topo do duto e a representação tridimensional no trecho de transição, em função do número de Reynolds. Ficou evidenciado que as partículas mais próximas às paredes laterais sedimentam mais rapidamente. Esta pesquisa foi desenvolvida para sedimentadores com ângulo de inclinação ($\theta = 0^\circ$), diferente do usual, cuja inclinação é geralmente de 50° a 60° . Resultados da simulação da trajetória das partículas são mostrados a seguir (Figura 3.24 e Figura 3.25):

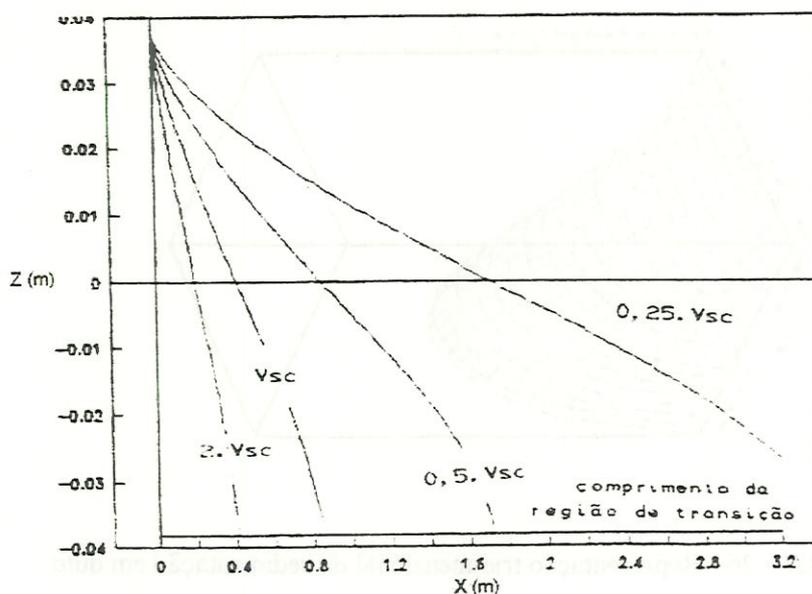


FIGURA 3.24 - Trajetória de uma partícula discreta em duto quadrado
 $a/b = 0,25$, $V_{so} = 3,3$ cm/min ; $Re = 579$

FONTE: SOARES (1992)

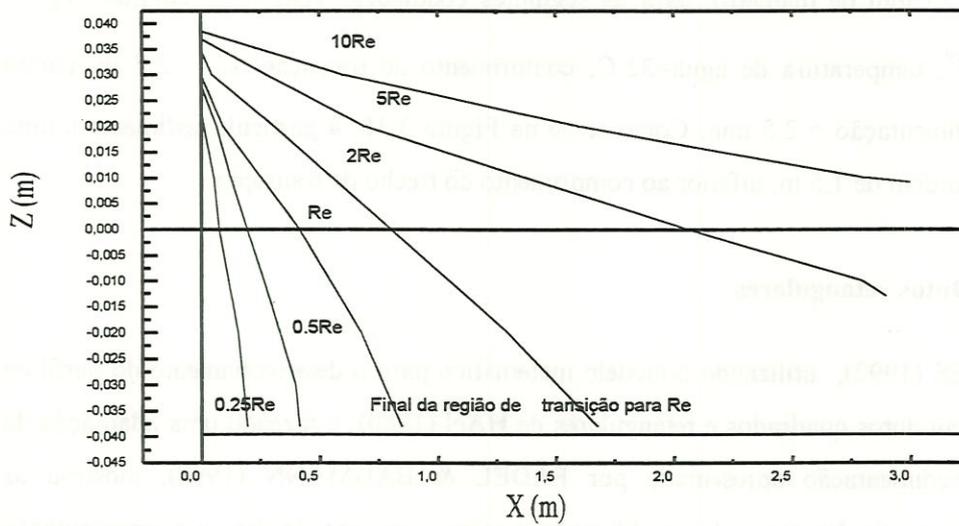


FIGURA 3.25 - Trajetória de uma partícula discreta em duto retangular

$a/b=0.25$, $V_{so} = 3,3$ cm/min ; $Re = 579$

FONTE: SOARES (1992)

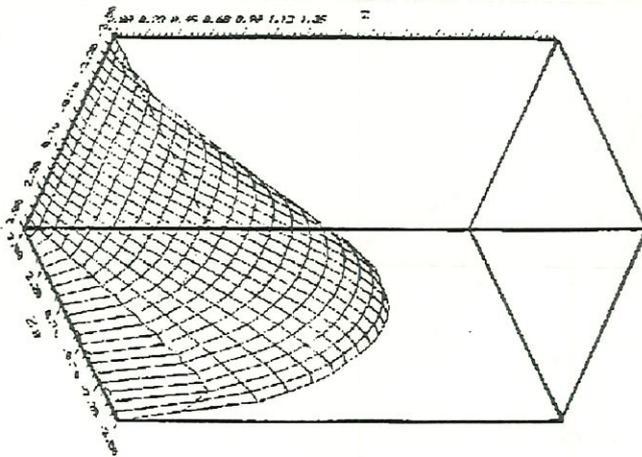


FIGURA 3.26 - Representação tridimensional da sedimentação em duto

quadrado com $Re=579.12$, $V_{sc} = 0.000508$ m/s

FONTE: SOARES (1992)

3.5 Sedimentação no trecho de transição e no trecho com perfil totalmente desenvolvido para dutos retangulares

COSTA NETO (1996) realizou a combinação dos modelos matemáticos para a obtenção das trajetórias das partículas discretas no trecho de transição, utilizando o modelo de SOARES (1992), e elaborou o modelo para o trecho com perfil de velocidade totalmente desenvolvido, baseado na equação do ROUSE (1959), considerando a partícula que entra na região central e no topo do sedimentador. Dessa forma, levou em conta a condição crítica para o sedimentador, quando a partícula se encontra na seção central do duto e entra na parte superior do duto. A Figura 3.27 mostra a sedimentação das partículas no trecho de transição, de um duto quadrado, e a Figura 3.28 mostra a sedimentação das partícula no trecho de transição e no perfil de velocidade totalmente desenvolvido, em que a velocidade de sedimentação das partículas são diferentes.

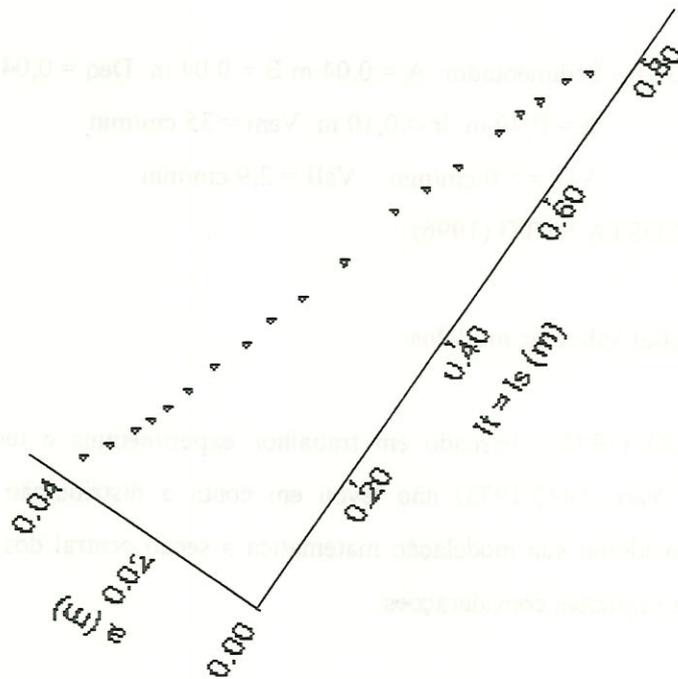


FIGURA 3.27 - Sedimentador $a = 0.04$ $b = 0.04$ $D_{eq} = 0.04$

$$l_t = 0.80 \quad V_{em} = 40 \text{ cm/min} \quad V_s = 5.0 \text{ cm/min}$$

FONTE: COSTA NETO (1996)

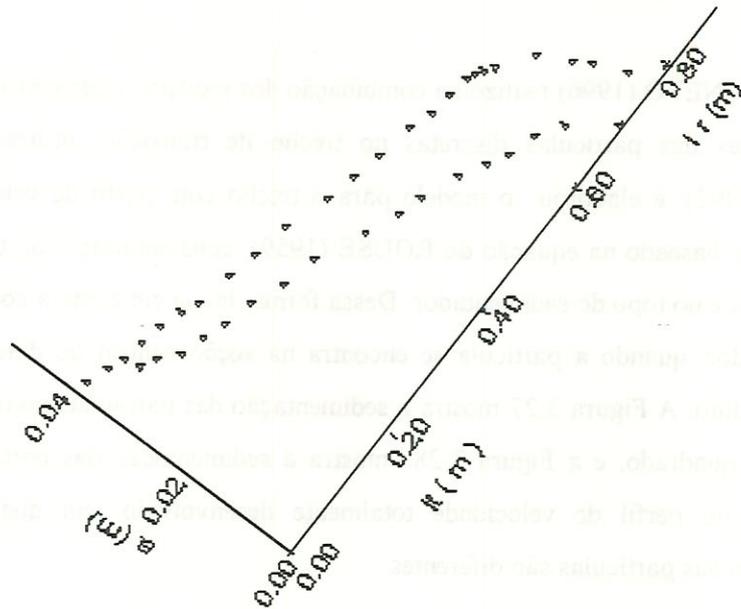


FIGURA 3.28 - Sedimentador $A = 0,04$ m $B = 0,04$ m $Deq = 0,04$

$l_t = 0,70$ m $l_r = 0,10$ m $V_{em} = 35$ cm/min

$V_{sI} = 5,0$ cm/min $V_{sII} = 2,9$ cm/min

FONTE: COSTA NETO (1996)

3.6 Considerações sobre os modelos

DI BERNARDO (1993) baseado em trabalhos experimentais e teóricos chegou a conclusão que Yao (1970,1973) não levou em conta a distribuição de tamanho de partículas e considerou sua modelação matemática a seção central dos sedimentadores, portanto faz as seguintes considerações:

a) *A suspensão é uniforme* - Considerem-se dois sedimentadores, um de placas planas paralelas e outro com duto de seção quadrada, ambos recebendo uma suspensão com partículas do mesmo tamanho e mesma velocidade de sedimentação (V_{s1}). As partículas serão removidas no sedimentador de placas planas paralelas, qualquer que seja a posição que elas ocupem, enquanto que no caso do duto quadrado algumas poderão ser removidas se entrarem em pontos distantes da região central, mesmo na parte superior do duto. (Figura 3.28).

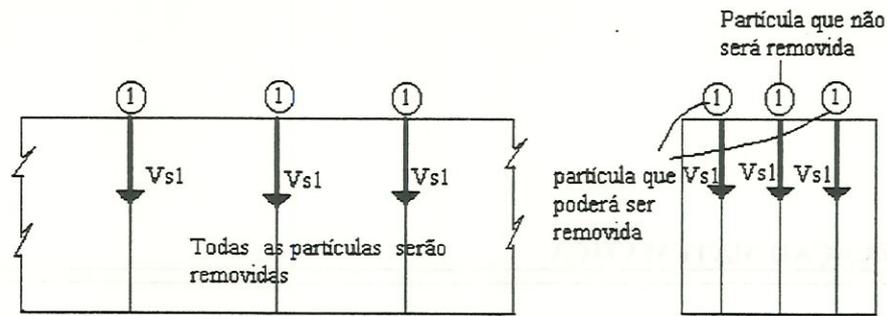


FIGURA 3.29 Remoção de partículas em sedimentadores: suspensão uniforme
 FONTE: DI BERNARDO (1993)

b) *A suspensão não é uniforme* - No sedimentador de placas planas paralelas serão removidas somente as partículas com a velocidade de sedimentação de projeto (V_{s1}), se entrarem pela parte superior do mesmo, independentemente da posição em relação ao centro, enquanto as partículas com velocidade de sedimentação menor ($V_{s2}; V_{s3}$) poderão ser removidas, se entrarem abaixo da extremidade superior do sedimentador. No caso do duto quadrado, partículas com velocidade menor que aquela considerada poderão ser removidas, mesmo que entrem na parte superior, se estiverem distantes do centro (Figura 3.29).

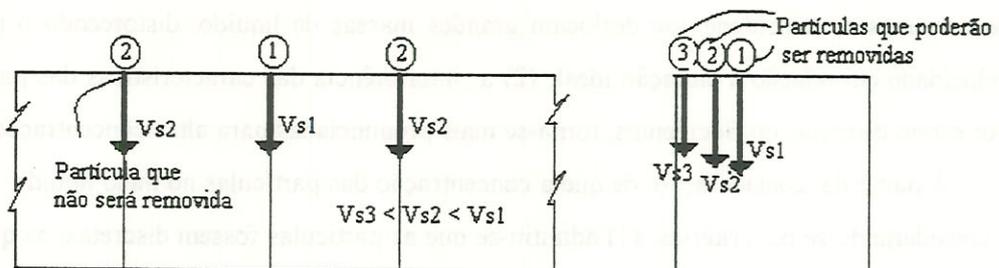


FIGURA 3.30 - Remoção de partículas em sedimentadores: suspensão não uniforme.
 FONTE: DI BERNARDO (1993).

O modelo matemático desenvolvido por SOARES (1992) para o trecho de transição, mostra que as partículas que estão perto da parede do duto sedimentaram mais rapidamente, mostrando, dessa forma, a influência dos perfis de velocidade nos dois planos. O trabalho desenvolvido por COSTA NETO (1996) considerou a situação crítica, isto é, aquela referida ao plano vertical, localizado longitudinalmente, no centro do duto, de forma que o desempenho não pode ser analisado para o trecho do perfil desenvolvido.

4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA

4.1 Condições Iniciais

Com o propósito de simplificar o tratamento matemático do processo de sedimentação, ele pode ser tratado para uma situação ideal na qual o escoamento do fluido não é perturbado pela presença das partículas. Trata-se de uma aproximação razoável para a situação em que a concentração de partículas no meio líquido não é elevada, condição geralmente encontradas nas estações de tratamento de águas.

Deve ficar bem esclarecido que a metodologia por ser simplificada, possui limitações, a saber:

Caso a concentração de partículas seja elevada, poderá acontecer: (1) o aparecimento de correntes de densidade que deslocam grandes massas de líquido, distorcendo o perfil de velocidade em relação à situação ideal; (2) a interferência das características das partículas, por serem discretas ou floculentas, torna-se mais pronunciadas para altas concentrações.

A partir da consideração, de que a concentração das partículas no meio líquido é baixa, e considerando-se os critérios: (1) admitiu-se que as partículas fossem discretas, as quais não mudam de tamanho forma e massa específica durante a sedimentação; (2) admitiu-se regime de escoamento laminar no interior do duto e perfil de velocidades como sendo bidimensional, torna-se possível quantificar o perfil de velocidades do escoamento e sobrepor, posteriormente a sedimentação das partículas para estudar as suas trajetórias.

Para encontrar a trajetórias das partículas foram utilizados dois critérios: (1) a partícula sedimenta antes ou no final do trecho de transição, nesse caso, o comprimento encontrado é o comprimento total da sedimentação da partícula; (2) a partícula sedimenta no perfil totalmente desenvolvido, considerou-se o comprimento total igual á soma do comprimento no trecho de transição com o do trecho de perfil de velocidade totalmente desenvolvido.

4.2 Desenvolvimento do modelo

O esquema iterativo de FADEL & BAUMANN (1990), descrito no capítulo 3, é geral, não se restringindo, na descrição dos passos, a qualquer geometria particular, permitindo ser adaptado para dutos retangulares e quadrados cuja geometria se concentra na utilização do estudo de HAN(1960) para os perfis de velocidade.

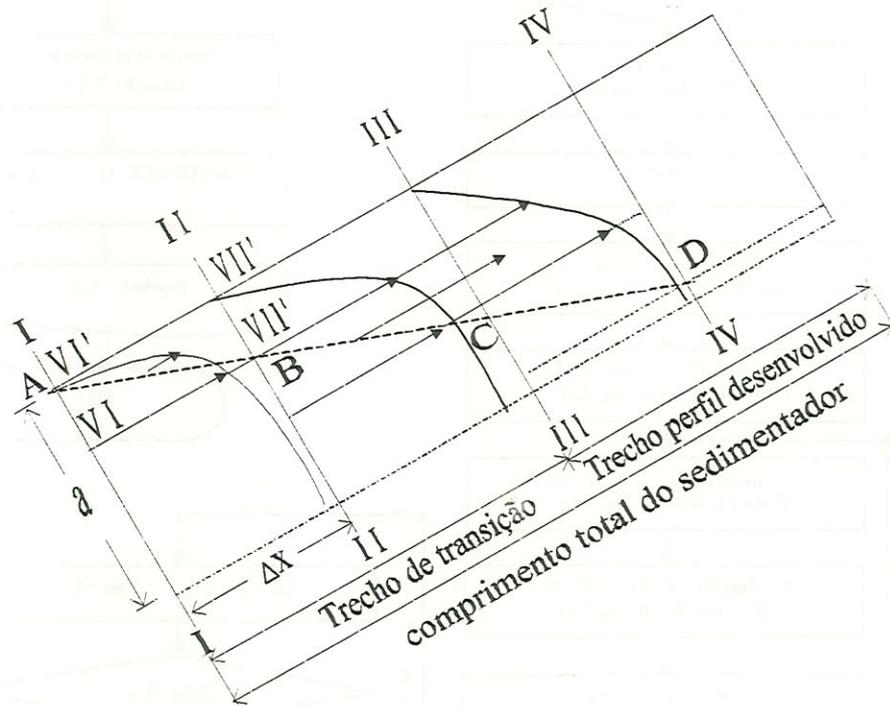


FIGURA 4.1 - Esquema da trajetória da partícula no interior do duto.

Na elaboração do modelo, foi considerada a entrada da partícula discreta em uma posição qualquer do topo da seção retangular ou quadrada, permitindo estudar a sedimentação em planos verticais, paralelos ao plano central do escoamento:

- a) no trecho de transição;
- b) no trecho com perfil totalmente desenvolvido.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são mostrados o esquema e o fluxograma do modelo desenvolvido respectivamente.

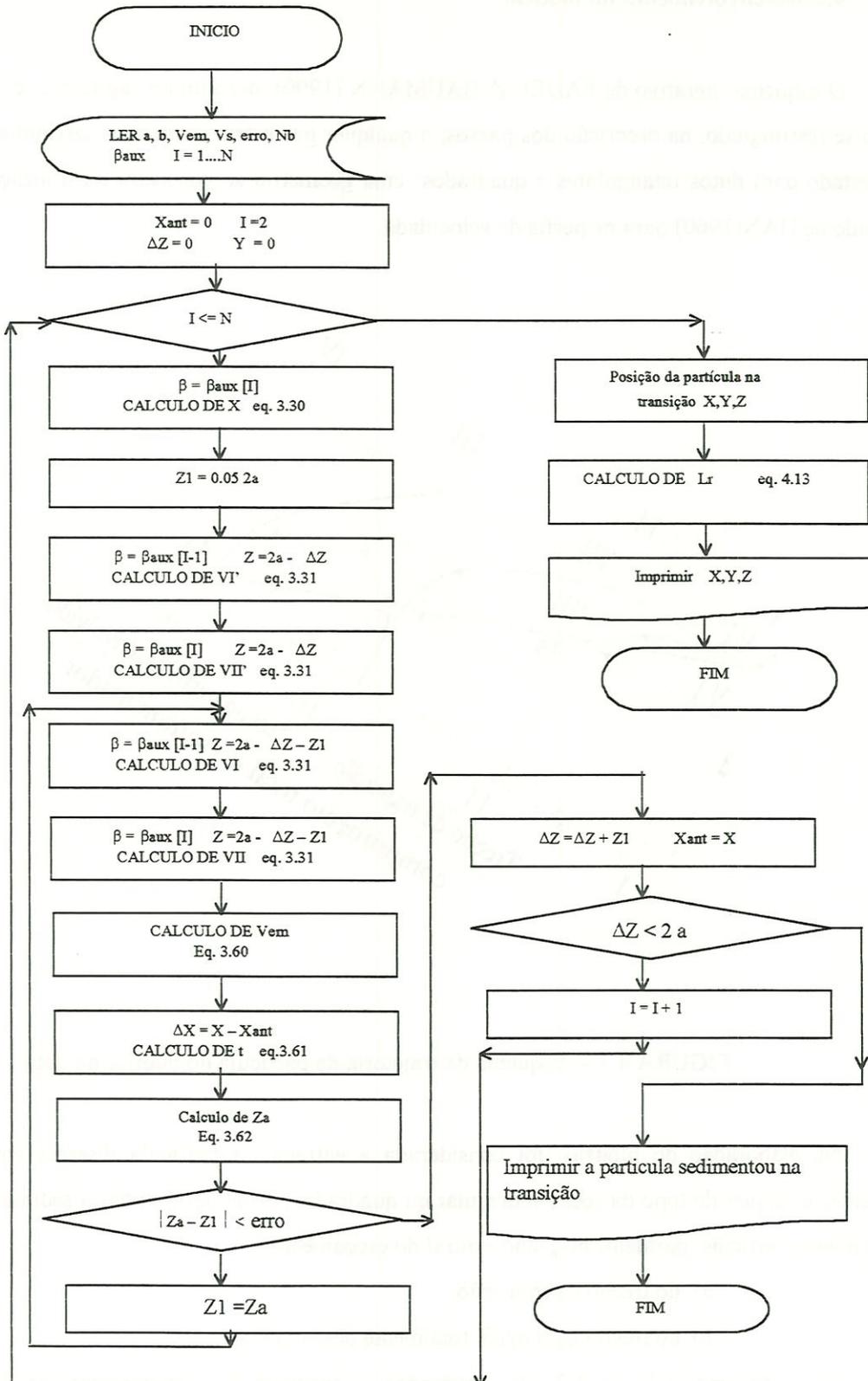


FIGURA 4.2 - Fluxograma do modelo para sedimentação de partículas discretas em dutos quadrados e retangulares.

4.2.1 Sedimentação de partículas discretas no escoamento laminar no trecho de transição

Para a sedimentação de partículas discretas no trecho de transição (Figura 4.3), foi utilizado o estudo apresentado por SOARES (1992), que permite conhecer a posição em que a partícula ocupará quando passa para o perfil totalmente desenvolvido, caso esta não sedimente no término do trecho de transição, para diferentes condições: (1) velocidade de sedimentação; (2) velocidade de escoamento; (3) configurações de dutos; (4) posição das partículas na entrada do duto.

Para a simulação dessas trajetórias, foram apresentados os seguintes programas em linguagem PASCAL.

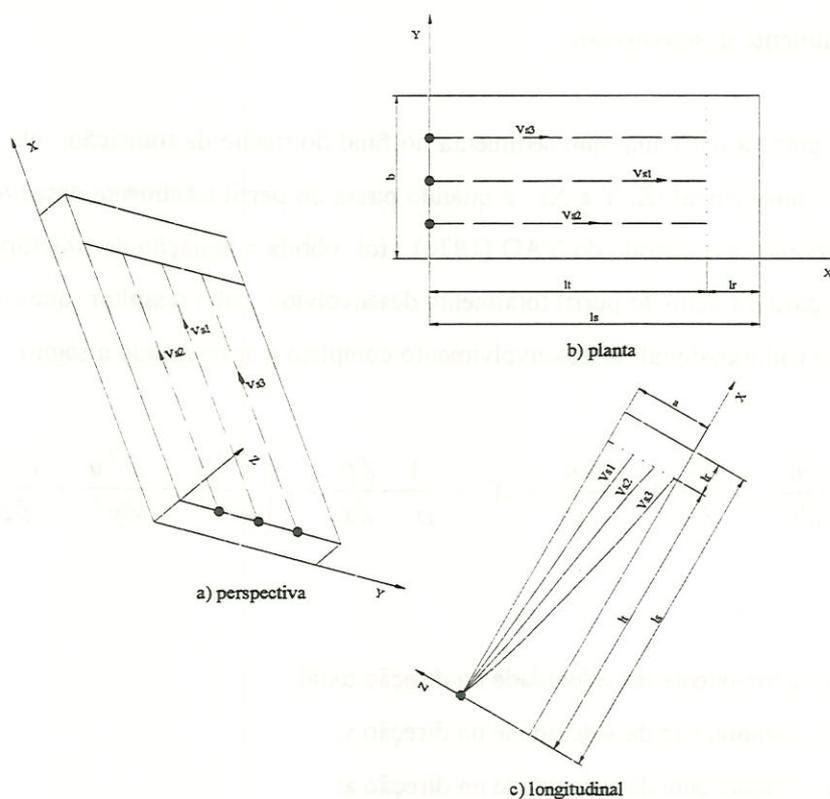


FIGURA 4.3 - Sedimentador com trajetória da partícula discreta e perfil no trecho de transição para diversas velocidades de sedimentação e para diferentes posições de entrada.

a) MODIFI1.PAS

Este programa foi desenvolvido para calcular o comprimento do trecho de transição. Os dados de entrada a , b , $Visc$, U , V_s , $erro$, são requeridos através da tela e os de saída são fornecidos através de arquivo de saída com extensão .DAT

b) SEDTRI.PAS

Este programa foi desenvolvido por SOARES (1992), para simular a trajetória da partícula no trecho de transição. Os dados de entrada são fornecidos através de arquivos de entrada com extensão .DAT e a saída se dá através de arquivo com extensão .RES

4.2.2 Sedimentação de partículas discretas no escoamento laminar, no trecho com perfil totalmente desenvolvido

Quando a partícula não sedimenta no final do trecho de transição, ela ocupará uma posição tridimensional (Z , Y e X), é quando passa ao perfil totalmente desenvolvido (Figura 4.4). Utilizando-se o método do YAO (1970), foi obtida a equação da trajetória da partícula (eq. 4.13) para o trecho do perfil totalmente desenvolvido, cabe ressaltar que o tratamento do problema é tridimensional. O desenvolvimento completo é apresentado a seguir:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (4.1)$$

em que:

- u : componente da velocidade na direção axial;
- v : componente da velocidade na direção y ;
- w : componente da velocidade na direção z ;
- b : largura;
- a : altura;

A equação fica:

$$\left[\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = - \frac{1}{\mu} \frac{\partial (g + P)}{\partial x} = - \frac{1}{\mu} \frac{\partial P^*}{\partial x} \quad (4.2)$$

A solução da equação :

$$u = \frac{a^2}{2\mu} \frac{\partial P^*}{\partial x} \frac{y}{a} \left(\frac{y-b}{a} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \text{sen} \left(\frac{m\pi y}{b} \frac{a}{a} \right) \left(A_m \cosh \left(\frac{m\pi z}{b} \frac{a}{a} \right) + B_m \sinh \left(\frac{m\pi z}{b} \frac{a}{a} \right) \right) \quad (4.3)$$

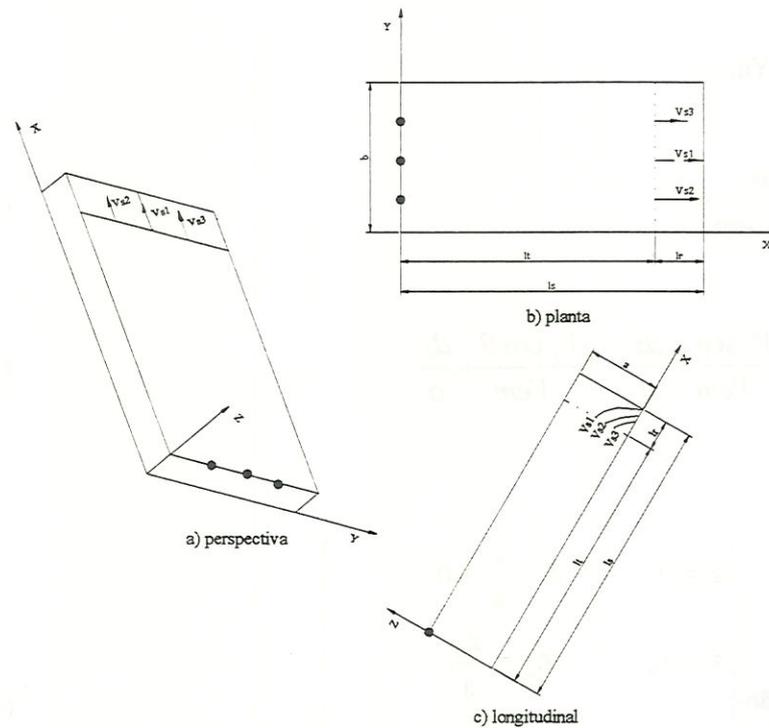


FIGURA 4.4 - Sedimentador com trajetória da partícula discreta e perfil totalmente desenvolvido para diversas velocidades de sedimentação e diferentes posições de entrada.

$$A_m = -\frac{2b^2}{m^3 \pi^3} \frac{\partial \mathcal{P}^*}{\partial x} [\cos(m\pi) - 1] \quad (4.4)$$

$$B_m = -A_m \left(\frac{\cosh(mn\pi) - 1}{\sinh(mn\pi)} \right) \quad (4.5)$$

$$V_{em} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathcal{P}^*}{\partial x} \left[-\frac{b^2}{12} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2b^3}{m^5 \pi^5 a} (\cos(mn\pi) - 1)^2 \left(\sinh(mn\pi) - \frac{(\cosh(mn\pi) - 1)^2}{\sinh(mn\pi)} \right) \right] \quad (4.6)$$

Pela equação de Yao :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{-V_s \cos \theta}{u(z,y) - V_s \sin \theta} \quad (4.7)$$

$$\int \frac{u(z,y) dz}{V_{em} a} = \int \frac{V_s \sin \theta}{V_{em} a} dz - \int \frac{V_s \cos \theta}{V_{em} a} dx \quad (4.8)$$

$$\text{Limites da equação} \left\{ \begin{array}{l} z = 0 \quad Z = \frac{z}{a} = 0 \\ z = z_0 \quad Z_0 = \frac{z_0}{a} \\ x = 0 \quad X = \frac{x}{a} = 0 \\ x = lr \quad X = \frac{x}{a} = \frac{lr}{a} = L_r \end{array} \right. \quad (4.9)$$

$$\int_{z_0}^0 \frac{u(z,y)}{V_{em}} dZ = \int_{z_0}^0 \frac{V_s \sin \theta}{V_{em}} dZ - \int_0^{L_r} \frac{V_s \cos \theta}{V_{em}} dX \quad (4.10)$$

$$\int_0^{z_0} \frac{u(z,y)}{V_{em}} dZ = \frac{V_s}{V_{em}} [\text{sen } \theta + L_r \text{ cos } \theta] \quad (4.11)$$

$$\int_0^{z_0} Sc = \frac{\frac{a^2}{2} \left(Y^2 - \frac{Y}{n} \right) Z_0 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2b^3}{m^4 \pi^4 a} DE \left[F - \frac{GH}{I} \right]}{-\frac{b^2}{12} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2b^3}{am^5 \pi^5} D^2 \left[I - \frac{G^2}{I} \right]} = \frac{V_s}{V_{em}} (\text{Sen } \theta + L_r \text{ cos } \theta) \quad (4.12)$$

em que :

$$D = (\cos (m\pi) - 1);$$

$$E = \text{senh } (mn\pi Y);$$

$$F = \text{senh } (mn\pi Z_0);$$

$$G = (\cosh (mn\pi) - 1);$$

$$H = (\cosh (mn\pi Z_0) - 1);$$

$$I = \text{senh } (mn\pi).$$

$$L_r = \frac{\frac{V_{em}}{V_s} \left(\int_0^{z_0} Sc \right) - \text{Sen } \theta}{\text{cos } \theta} \quad (4.13)$$

Para simulação dessas trajetórias foi desenvolvido um programa em linguagem PASCAL.

SEDESENV.PAS

Este programa foi desenvolvido para simular a trajetória da partícula no trecho com perfil totalmente desenvolvido. Os dados de entrada a, b, Visc, U, Vs, angulo de inclinação são requeridos através da tela e os de saída são obtidos através de arquivo de saída com extensão.DAT.



4.2.3 Trajetórias das partículas discretas

Dependendo da posição da entrada da partícula, velocidade de sedimentação, velocidade de escoamento, o modelo permite simular (Figura 4.5) :

1) Trajetória (I) - A sedimentação da partícula passa do trecho de transição sedimenta no perfil totalmente desenvolvido.

2) Trajetória (II) - A sedimentação da partícula ocorre antes ou coincide com o término do trecho de transição.

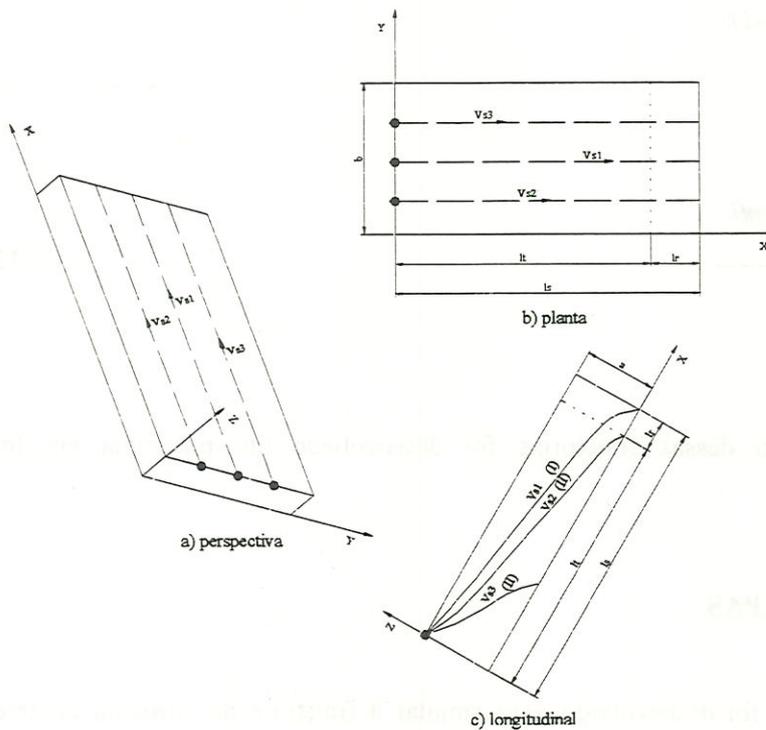


FIGURA 4.5 - Sedimentador com trajetória da partícula discreta no trecho de transição e no perfil inteiramente desenvolvido para diversas velocidades de sedimentação.

5. MATERIAL E MÉTODOS

A investigação experimental objetivou avaliar a modelação matemática proposta, para dutos de seção retangular e quadrada. Para tal efeito, foi utilizada uma instalação piloto e o levantamento de dados foi realizado com um sistema de aquisição e tratamento de imagens.

5.1 Instalação piloto

A instalação piloto foi montada no Laboratório de Fenômenos de Transporte da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Na figura 5.1 é apresentada uma vista da instalação piloto.

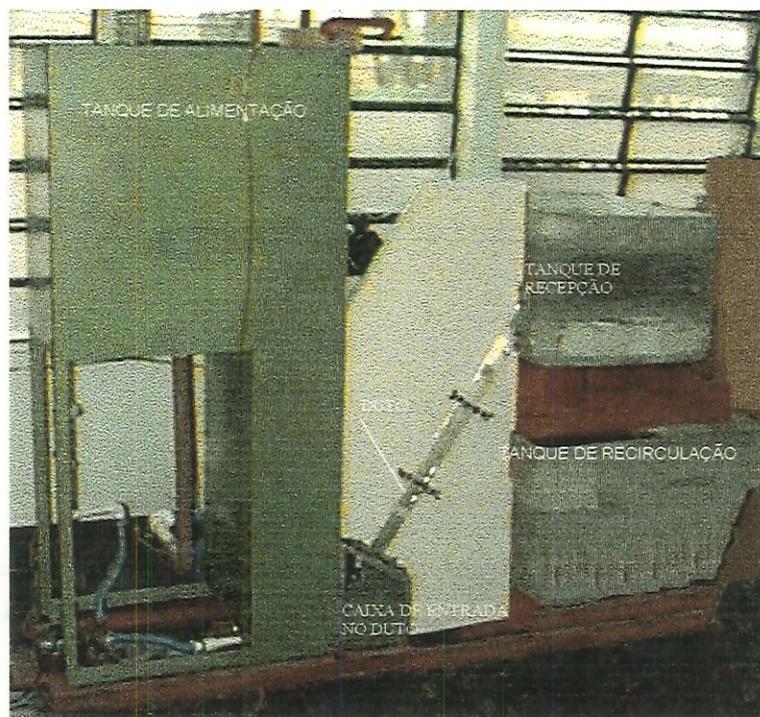


FIGURA 5.1 - Vista da instalação piloto

A instalação piloto cuja representação esquemática, em planta e corte, encontra-se ilustrada na Figura 5.2. Foi constituída de três caixas (alimentação, recepção e recirculação), um duto de ensaio, sistema de recalque e dispositivo de entrada de partículas.

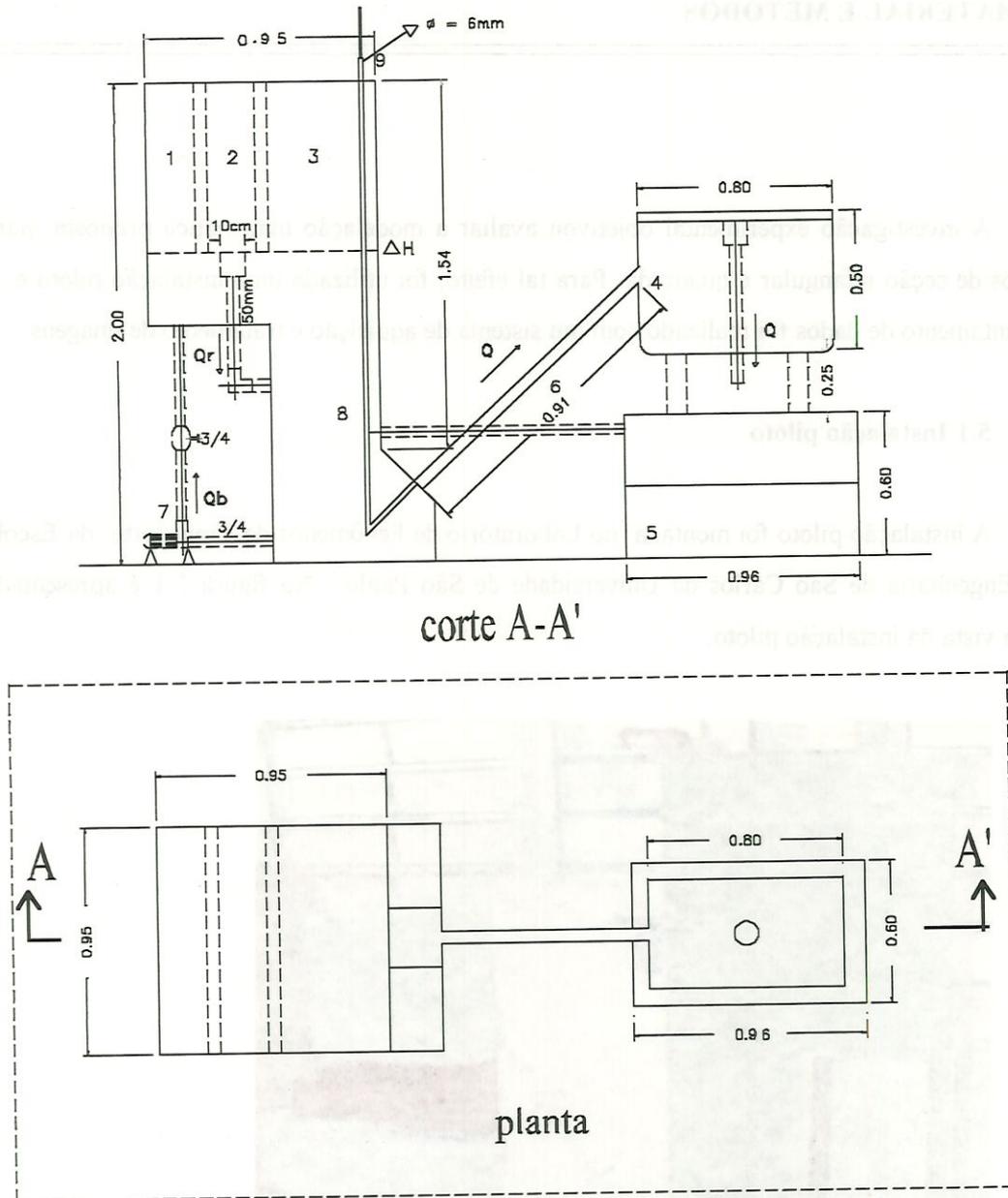


FIGURA 5.2 - Esquema da instalação piloto. 1 - 2 - 3 - caixa de alimentação, 4 - caixa de recepção, 5 - caixa de recirculação, 6 - duto de ensaio, 7 - bomba, 8-9 dispositivo de alimentação da partícula

a) A caixa de alimentação

Construída em chapa de aço, foi subdividida verticalmente em três câmaras com a finalidade de ajudar a distribuir homoganeamente o fluxo em toda a área útil dos dutos. A câmara (1) destinava-se a receber a água da bomba por um tubo vertical, que contém uma chapa horizontal para dissipar a energia do jato, diminuindo desta forma a perturbação da superfície. A câmara (2), separada por uma placa perfurada (colmeia) da primeira, evitava desta forma, a propagação das perturbações de superfície. Esta câmara foi constituída de um vertedor circular destinado a manter o nível de água constante para a vazão de alimentação. A câmara (3), separada da segunda câmara por uma colmeia, era a responsável pela alimentação do duto de estudo. A parte inferior da caixa foi construída com material transparente para permitir a visualização da entrada das partículas no sedimentador.

b) As caixas de recepção e de recirculação

Foram utilizadas caixas comerciais de cimento-amianto de 250 e 500 litros de capacidade, cuja finalidade era permitir o funcionamento da planta piloto em circuito fechado. Na caixa de recirculação, foram colocadas resistências de 3000 W.

c) Sistema de recalque

A capacidade da bomba de recirculação é de 30 m³/h, e a altura manométrica, de 5 mca com motor de 1 CV, originando teoricamente a velocidade máxima no duto de 30 cm/seg.

d) Vertedores

Os vertedores (Figura 5.3) estão montados em tubos plásticos do tipo de esgoto, com vedação por anel de borracha, que permitiu deslizar o tubo por escorregamento. A posição foi mantida por aperto sobre o anel de vedação.

e) Duto de ensaio

O dispositivo de sedimentação (Figura 5.4) propriamente dito foi construído em acrílico transparente, para permitir a visualização da trajetória da partícula. Tinha forma retangular e

as dimensões: 50 cm de largura, 5 cm de altura e 1000 cm de comprimento, com uma inclinação de 60° . Suas dimensões foram modificadas por meio da inclusão de uma parede divisória no sentido longitudinal.

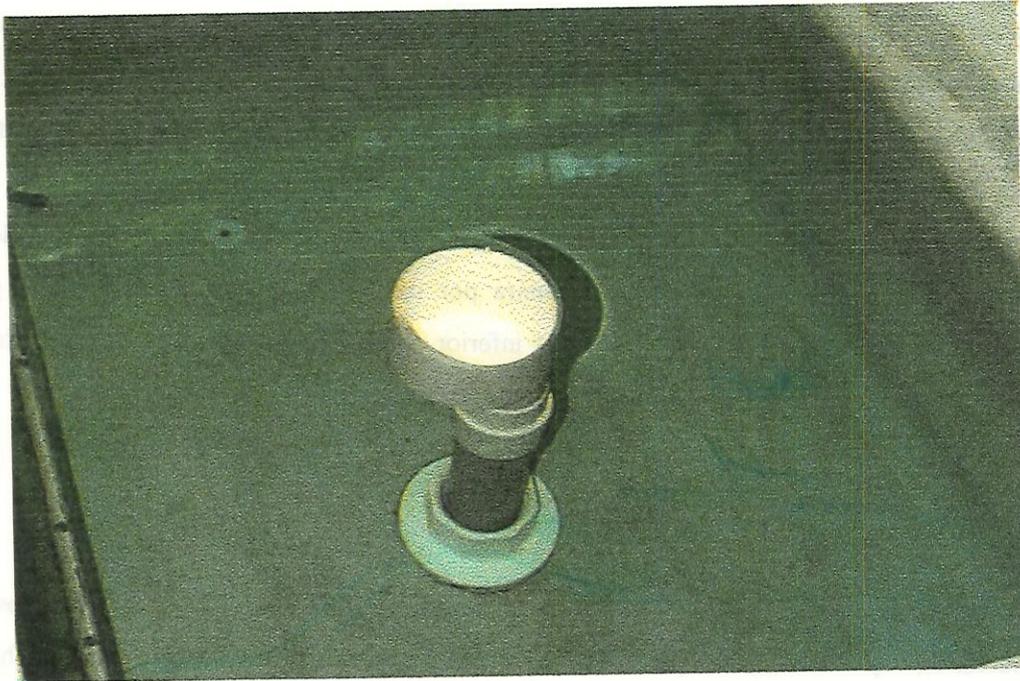


FIGURA 5.3 - Vista da superfície da água, e ação do vertedor na caixa de recepção.

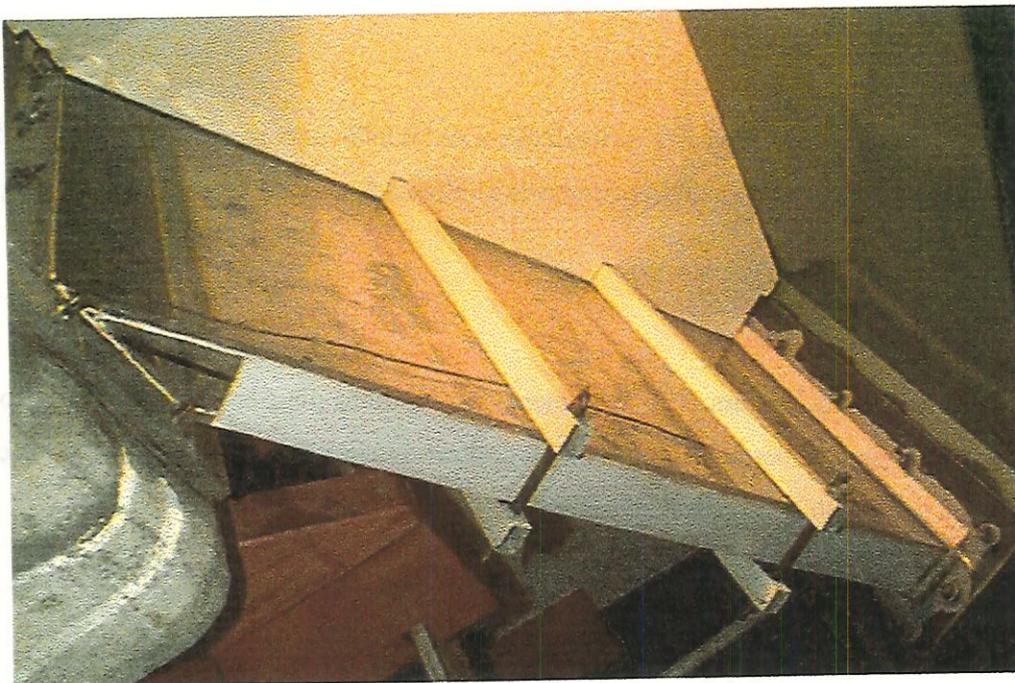


FIGURA 5.4 - Vista geral do duto.

f) Dispositivo de alimentação da partícula

O dispositivo de alimentação da partícula (Figura 5.5) era constituído de um tubo de cobre de 6 mm de diâmetro e um cabo de aço, que funcionou como êmbolo.

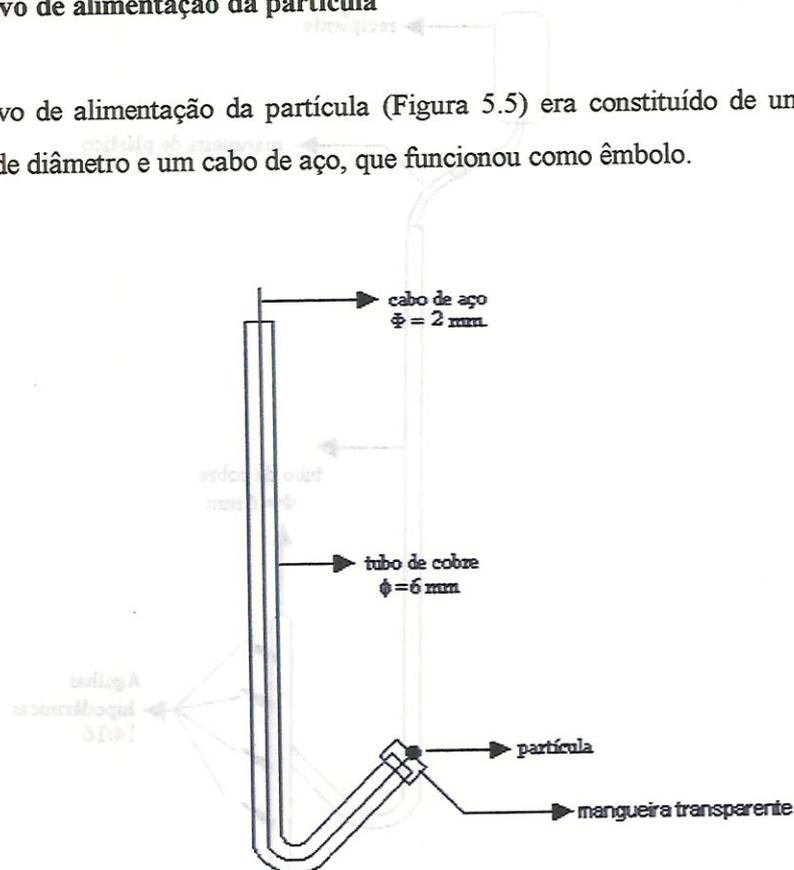


FIGURA 5.5 - Dispositivo de alimentação da partícula

g) Injetor de traçador

Foi construído um tubo de cobre de 6 mm de diâmetro, com agulhas hipodérmicas 14/16 como mostra a Figura 5.6. O traçador utilizado foi o azul de metileno.

h) Coluna de sedimentação

O aparelho utilizado para calcular a velocidade de sedimentação das partículas é apresentado na Figura 5.7

Foi montado com um tubo de vidro de 5 cm de diâmetro e 120 cm de comprimento, tendo uma chave borboleta para esvaziar a coluna, que permitiu pegar a partícula testada.

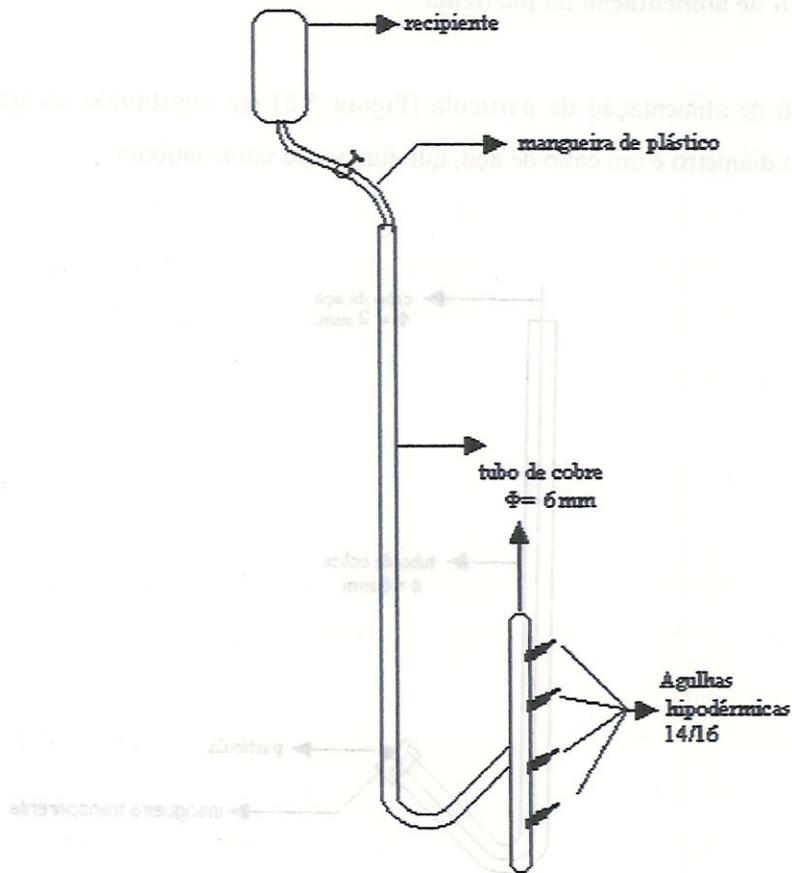


FIGURA 5.6 - Dispositivo para utilização do traçador

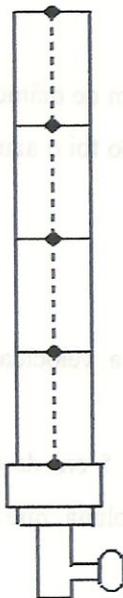


FIGURA 5.7 - Coluna de sedimentação.

i) Detecção de vazamentos

Com o intuito de garantir que o fluxo de água entrasse no duto em estudo, foram feitos testes para a detecção de vazamentos ao longo de todas as arestas de contato entre as paredes móveis e fixas, usando-se o traçador azul de metileno. Os vazamentos foram eliminados através da abertura de canaletas com 2 mm de profundidade nas laterais das paredes móveis, que foram preenchidas com borracha flexível, provendo-se a vedação por meio da utilização de reforços externos, colocados nas paredes fixas do duto.

j) Aquecimento elétrico

Com a temperatura de trabalho de 20 °C, muitas vezes foi necessário aquecer ou resfriar água. O aquecimento era realizado com resistências elétricas de 3000 W e para o resfriamento utilizou-se gelo em barra.

A uniformidade da temperatura na instalação piloto foi verificada pela medição de temperaturas, com um termopar. Por meio dos ensaios, foi possível constatar a boa uniformidade com desvios de no máximo 0,5°C durante o ensaio. Cabe ressaltar que essa situação ocorria quando a temperatura externa era estável.

5.2 Sistema de aquisição de dados e tratamento de imagens

Este sistema proporciona os meios para analisar imagens recolhidas de sinal de vídeo através da placa digitalizadora. A imagem é processada em tempo real e mostrada em monitores RGB.

a) Visualização e gravação

- Filmadora Panasonic modelo 605
- Filmadora JVC
- Televisor 14 " Philips

b) Análise de imagens:

- computador Pentium 100 Mhz

- videocassete JVC modelo HRA4M
- placa de aquisição de sinais de vídeo, marca Blaster, modelo SE100.

5.3 Métodos

O desenvolvimento da pesquisa experimental foi dividida em duas etapas:

- etapa 1:** Procedimento de determinação das características das partículas discretas;
- etapa 2:** Procedimento de execução dos ensaios.

5.3.1 Procedimento para determinação das características das partículas discretas

No tratamento convencional de água, os flocos, obtidos pela aglomeração das partículas presentes nas águas, apresentam grande variação de dimensões, forma e massa específica em função da concentração, natureza do coagulante e das partículas aglutinadas, como também da eficiência da coagulação e floculação. Segundo CAMP (1946), as dimensões dos flocos variam desde alguns μm até quase 4 mm, as formas são em geral totalmente irregulares e a massa específica compreende valores entre cerca de 1000 a 1200 Kg/m^3 , valores de V_s entre 2 e 5 cm/min.

Portanto, para o desenvolvimento da pesquisa requer-se que as partículas e o fluido apresentem as seguintes características:

partícula:

velocidade de sedimentação: 1,2 - 4,8 cm/min;

diâmetro: 0,1 - 4 mm;

Massa específica : 1000 - 1050 kg/m^3 .

meio líquido:

líquido: água potável;

temperatura: 20° C;

Massa específica: 998,2 kg/m^3 .

Essas restrições na escolha do material fizeram o trabalho laborioso, de qualquer forma, no presente caso uma boa inspeção de uma variedade de polímeros, resinas e acrílicos de diferentes indústrias, conduziram a escolha das partículas, as quais foram testadas uma a uma de uma grande quantidade, poucas foram apropriadas para a aplicação no experimento

O material usado neste estudo foram bolinhas de plástico, conhecidas comumente como "pérolas falsas", a faixa de tamanhos foi de 1 a 4 mm, de forma esférica. Da mesma forma foi essencial o controle da temperatura, na prática, o variação de $0,5^{\circ}\text{C}$ era suficiente para o propósito.

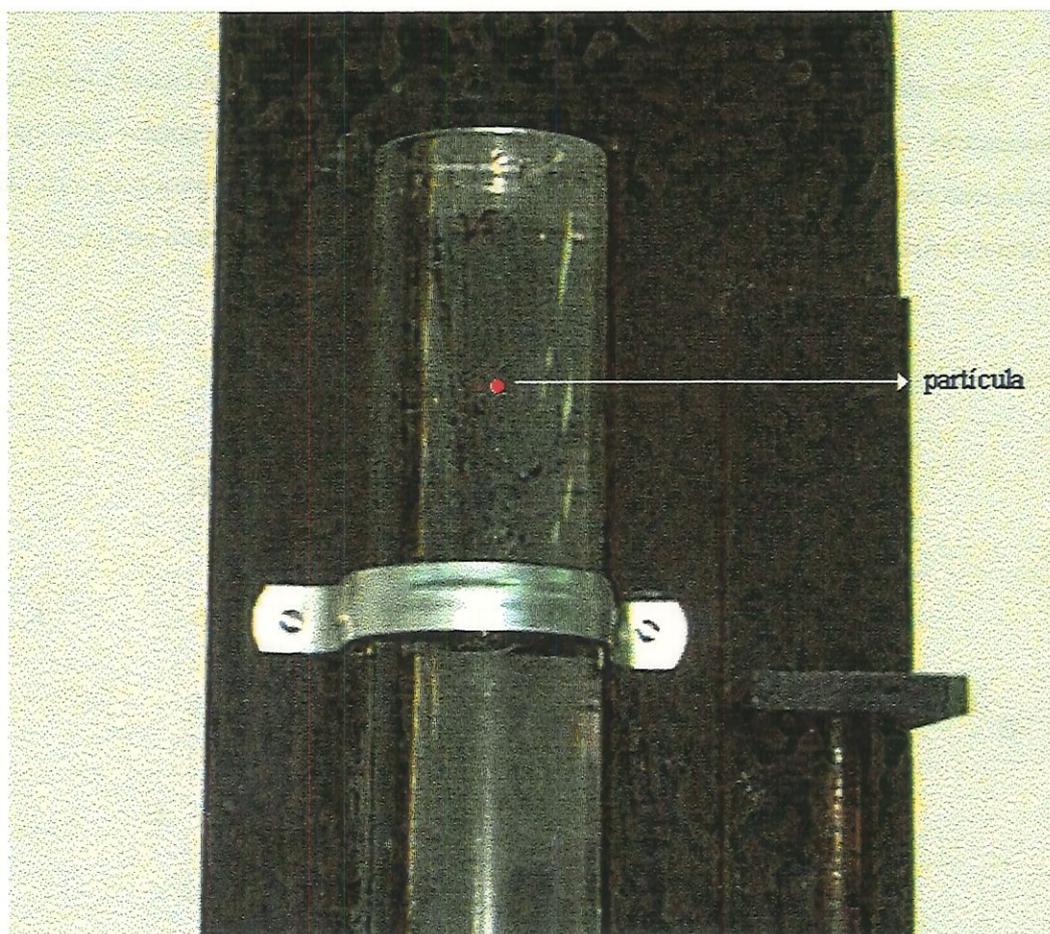


FIGURA 5.8 Partícula sedimentando na coluna de sedimentação

O procedimento do teste foi o seguinte:

- 1) enchimento da coluna com água de torneira;

- 2) leitura da temperatura da água ;
- 3) a partícula era solta na coluna;
- 4) o tempo que a partícula recorria até a marca foi cronometrado;
- 5) calcula-se $V_s = \text{espaço}/\text{tempo}$;

A partir de uma determinada distância, a velocidade mantém-se constante, constituindo-se a velocidade de sedimentação da partícula.

5.3.2 Procedimento de execução de ensaios

Para atender a condição de funcionamento da instalação piloto em circuito fechado, era necessário o enchimento das caixas (recirculação, alimentação e recepção) com água. A execução de um ensaio exigia o cumprimento de rotinas estabelecidas para cada fase. Essas rotinas constavam de procedimentos a serem executados, como está descrito abaixo.

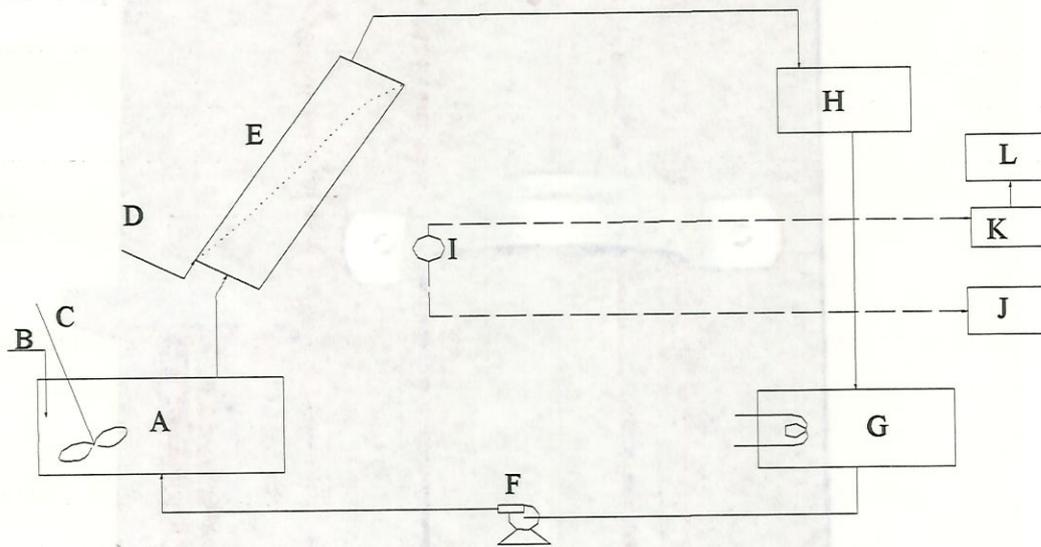


FIGURA 5.9 - Representação Esquemática do funcionamento da instalação piloto. A: caixa de alimentação; B: termômetro digital; C: agitador (Compressor e injetor ar) ; D: dispositivo de entrada da partícula; E: duto de ensaio; F: bomba; G : caixa de recirculação e resistência; H: caixa de recepção; I : câmara de vídeo; J: televisão; K: vídeo cassete; L: computador.

- 1) determinação da configuração dos sedimentadores;
- 2) ajuste da vazão de recalque, para se obter a velocidade média no sedimentador;
- 3) acondicionamento da temperatura do sistema;
- 4) para a verificação do escoamento laminar no interior do duto, injeção de tinta para o efeito de visualização dos filamentos no escoamento de água;
- 5) colocação da partícula na entrada do duto em diferentes posições;
- 6) filmagem da trajetória da partícula durante a sedimentação;
- 7) reprodução da filmagem e obtenção dos resultados.

Configuração dos sedimentadores: foram testadas 4 configurações físicas diferentes, obtidas pela combinação das dimensões dos dutos (a altura e b largura) e a relação l_s/a foi mantida em 20, conforme a listagem da tabela 5.2

TABELA 5.1 Dimensões físicas dos sedimentadores testados.

Duto	l_s (cm)	a (cm)	b(cm)	a/b
D5X5	100	5	5	1
D5X10	100	5	10	0,5
D5X20	100	5	20	0,25
D5X50	100	5	50	0,1

Posições da partícula As posições da partícula na entrada do duto são mostrada na Figura 5.10, para todas as configurações utilizadas.

Ajuste da vazão : A medida da vazão no duto foi realizada pelo método gravimétrico em que a saída da caixa de recepção fornece a mesma vazão que passa pelo duto de ensaio.

Temperatura : A temperatura média do escoamento devia ser de 20 °C. Algumas vezes foi necessário aquecer ou resfriar água.

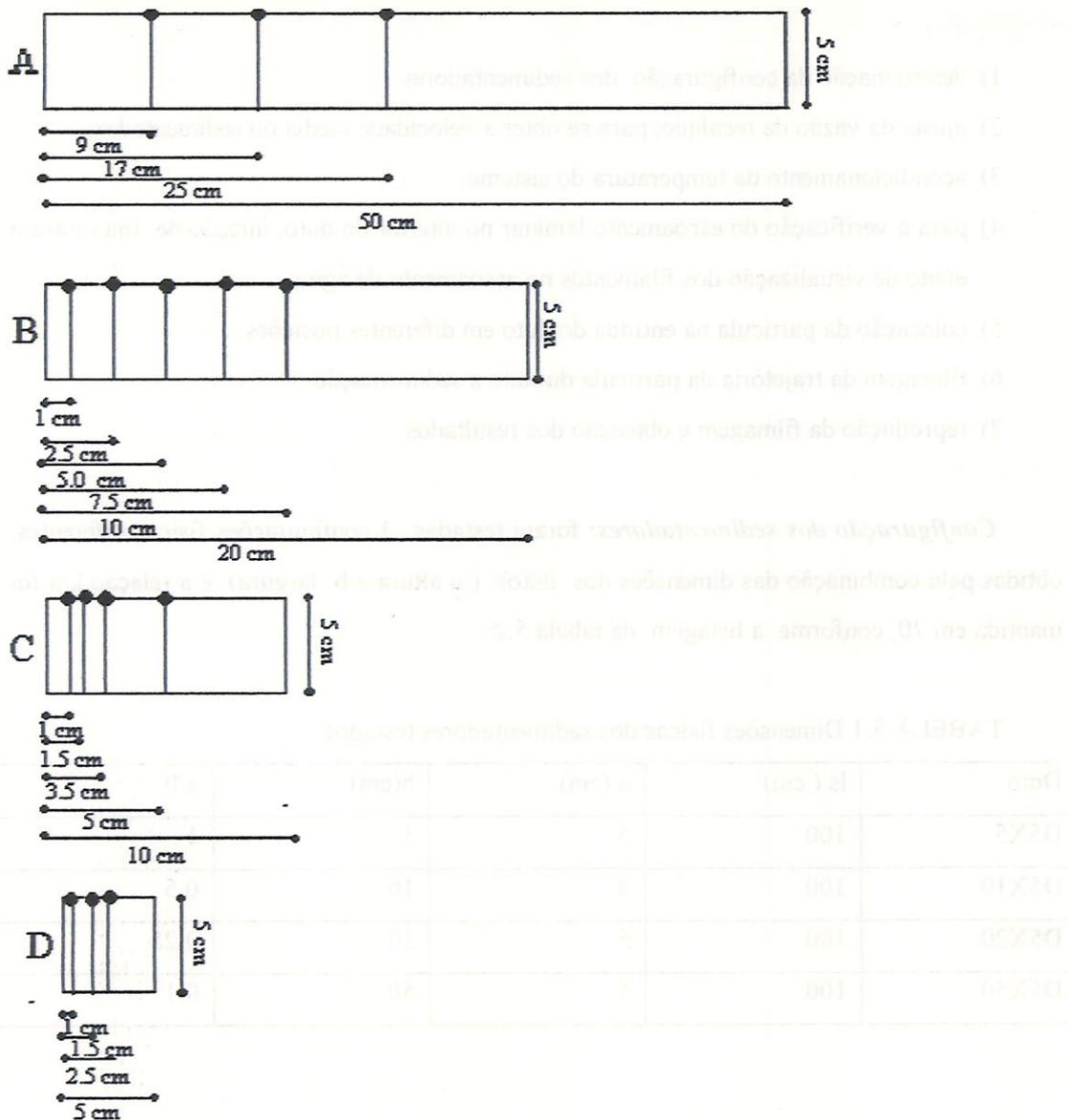


FIGURA 5.10 Posição das partículas nos dutos

Escoamento laminar: Para constatar o escoamento laminar no duto, foi montado um sistema, composto por um recipiente ligado por meio de uma mangueira ao injetor, a entrada do traçador, azul de metileno, ao duto era realizado por gravidade, e a quantidade do filete de corante que entrava no escoamento era regulada. As linhas de corrente apresentaram-se retilíneas, sem perturbações (Figuras 5.11 e Figuras 5.12)

Escoamento Homogêneo: Para homogeneizar a temperatura da água em todo o sistema foi utilizado um sistema de mistura, composto de um compressor de ar e um injetor de ar.

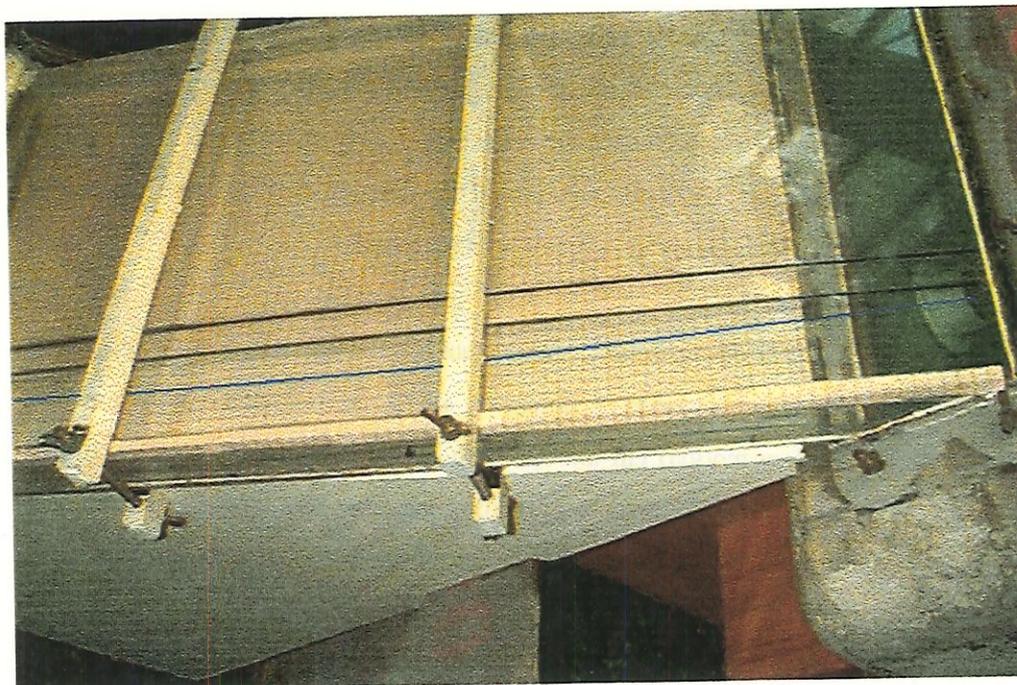


FIGURA 5.11 - Injeção do traçador . Duto quadrado $a = 5\text{ cm}$ e $b = 5\text{ cm}$

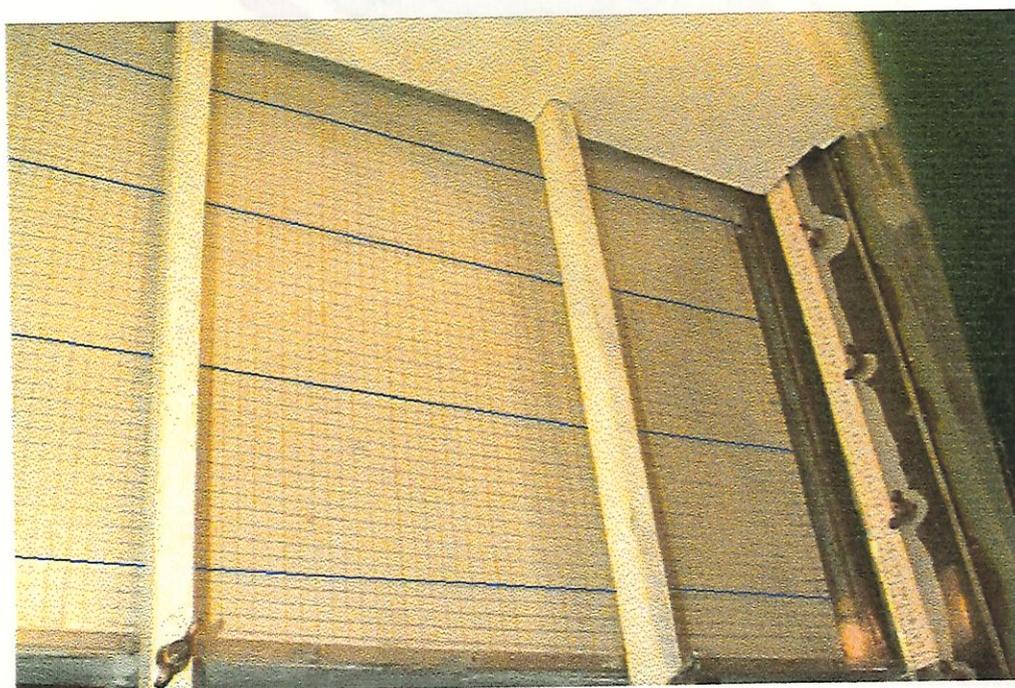


FIGURA 5.12 - Injeção de Traçador. Duto retangular $a = 5\text{ cm}$ e $b = 50\text{ cm}$.

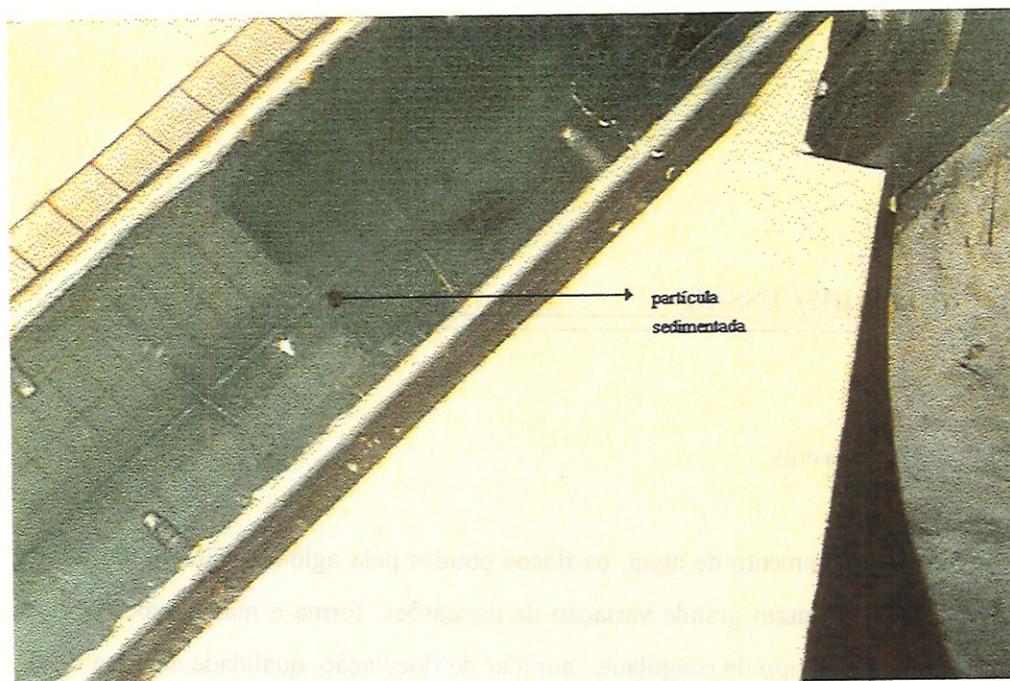
Filmagem da trajetória da partícula: Para a visualização da partícula foi utilizado o seguinte procedimento: Para todos os ensaios a câmara de vídeo foi colocada a uma distância do lateral do duto que permitia visualizar a escala utilizada como referência, sem apresentar

distorções. Foi utilizado um televisor de 14" para uma melhor visualização, que permitiu fazer os ajustes necessários para evitar as distorções e evitar posteriores erros na coleta de dados. Após os ajustes realizados, a câmara de vídeo era ligada para toda a seqüência de ensaios, filmando a trajetória da partícula pela lateral do duto de acrílico transparente. A figura 5.13 mostra uma seqüência típica da trajetória da partícula.

Reprodução da trajetória da partícula: A filmagem no padrão VHS é realizada a uma taxa constante de 30 quadros por segundo. A filmagem é então reproduzida quadro a quadro (através dos recursos de slow motion) em um aparelho de vídeo cassete, e com auxílio da placa Blaster e do programa que acompanha o produto, montou-se uma tabela representando a posição da partícula na tela. Para obter a posição da partícula no duto precisou-se fazer um cálculo para rotação e translação de eixos.



a) partícula sedimentando no duto



b) Partícula sedimentada

FIGURA 5.13 - Seqüência da partícula sedimentando.

Variáveis Analisadas

De acordo com os objetivos especificados, os ensaios foram realizados combinando variações de posição (Figura 5.10) de entrada da partícula, razões geométricas a/b (tabela 5.1), velocidades de escoamento (30, 25 e 20 cm/min) e velocidades de sedimentação (tabela 6.1).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Partículas discretas

Nas estações de tratamento de água, os flocos obtidos pela aglomeração das partículas presentes na água, apresentam grande variação de dimensões, forma e massa específica em função principalmente, do tipo de coagulante, auxiliar de floculação, qualidade da água bruta, características da coagulação e floculação. No caso de coagulação com sais de alumínio e ferro, a massa específica resulta geralmente entre 1,002 e 1,030 kg/m³.

Em geral os flocos são constituídos de partículas de argila, silte e substâncias húmicas e segundo CAMP (1946) variam de tamanho, desde alguns µm até 4 mm.

No presente trabalho, numerosas tentativas foram realizadas para obter partículas com as características acima mencionadas, neste trabalho foram utilizadas bolinhas de plástico (pérolas falsas). Foram realizadas 10 medidas da velocidade de sedimentação para cada partícula selecionada, cujo desvio padrão resultou na faixa de 2 a 4.

No ensaio da coluna de sedimentação observou-se a relação estreita entre a temperatura da água e a velocidade de sedimentação da partícula, já que a mudança de temperatura fazia com que a partícula flutuasse ou sedimentasse mais rapidamente.

A temperatura da água na coluna foi fixada em 20 °C, após cada medida de velocidade de sedimentação, era medida a temperatura por meio de inserção de termómetro na coluna, a máxima variação admitida foi de 0,5 °C, caso contrário a água era removida e corrigida a temperatura para 20 °C, portanto nos ensaios na instalação piloto a variação da temperatura foi também de 0,5 °C.

Na tabela 6.1, são apresentados os valores de velocidade de sedimentação e da massa específica, calculada a partir da equação de Stokes. Nesse cálculo, foi assumido que as partículas eram esféricas, o que pode não ter ocorrido, explicando, dessa forma obtenção de

valores de massa específica muito próximos aos da massa específica da água, que é igual a $998,20 \text{ Kg/m}^3$.

Tabela 6.1 Características das partículas discretas.

Partícula	massa específica (kg/m^3)	V s (cm/min)
1	998,2007	2,24
2	998,2015	5,20
3	998,2010	3,32
4	998,2011	3,50
5	998,2009	2,72
6	998,2012	3,56
7	998,2014	4,52
8	998,2013	4,48
9	998,2013	3,93

6.2 Validação da modelação matemática proposta

Na modelação matemática desenvolvida, considerando a formulação tridimensional, para a sedimentação de partículas discretas, foram levadas em conta duas situações: (1) a sedimentação ocorre no trecho de transição; (2) a sedimentação ocorre no perfil de velocidades totalmente desenvolvido.

Para verificar a validade do modelo proposto, as trajetórias teóricas e experimentais são apresentadas num mesmo gráfico, a fim de se ter melhor visualização para comparar ambas. Os gráficos estão apresentados para as quatro configurações utilizadas de $a/b = 1; 0,5; 0,25$ e $0,1$, nos Anexos, B,C,D e E respectivamente, em função da velocidade de sedimentação, velocidade média de escoamento e posição de entrada da partícula. Em cada Anexo é também apresentado um resumo indicando os dados correspondentes.

Nas tabelas 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 são apresentados os resumos dos resultados teóricos e experimentais obtidos para entrada da partícula em qualquer posição do topo superior, para os quatro dutos $a/b = 1; 0,5; 0,25$ e $0,1$ respectivamente.

Em vista do grande número de resultados a análise dos mesmos será realizado para algumas condições, as quais são representativas para todos os casos estudados.

TABELA 6.2 - Comprimento necessário para a sedimentação das partículas discretas no duto $a/b = 1$

Veloc. de escoam. (cm/min)	Posições	2,5 cm			1,5 cm			0,5 cm		
	Vel. de sedim. (cm/min)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)
30	2,24	0,9313	1,8636	0,88	0,9313	1,6361	0,94	0,8176	*	0,82
	5,20	0,7247	*	0,69	0,6528	*	0,59	0,3485	*	0,27
	3,32	0,9313	1,2226	0,65	0,9313	1,0784	0,86	0,5456	*	0,57
	3,50	0,9313	1,1508	0,44	0,9313	1,0194	0,86	0,5226	*	0,52
	2,72	0,9313	1,5186	0,67	0,9313	1,3341	0,92	0,6691	*	0,47
	3,56	0,9313	1,1276	0,60	0,9313	1,003	0,92	0,5079	*	0,47
	4,52	0,8475	*	0,51	0,7499	*	0,58	0,3975	*	0,42
	4,48	0,8553	*	0,43	0,7267	*	0,67	0,3975	*	0,31
	3,93	0,9313	1,0113	0,83	0,8793	*	0,77	0,4685	*	0,39
25	2,24	0,7767	1,5425	0,69	0,7767	1,354	0,90	0,6699	*	0,66
	5,20	0,5849	*	0,45	0,5278	*	0,43	0,2763	*	0,24
	3,32	0,7767	0,9995	0,92	0,7767	0,8812	0,89	0,4421	*	0,43
	3,50	0,7767	0,9443	0,88	0,7767	0,8358	0,70	0,4236	*	0,41
	2,72	0,7767	1,2531	0,59	0,7767	1,0984	0,87	0,5493	*	0,52
	3,56	0,7767	0,9257	0,67	0,7767	0,8202	0,67	0,4119	*	0,37
	4,52	0,6941	*	0,51	0,6151	*	0,48	0,3187	*	0,29
	4,48	0,7004	*	0,61	0,6202	*	0,50	0,3229	*	0,29
	3,93	0,7767	0,8282	0,62	0,7199	*	0,56	0,3689	*	0,28
20	2,24	0,6202	1,2158	0,84	0,6202	1,0641	0,68	0,5212	*	0,52
	5,20	0,4523	*	0,39	0,4026	*	0,39	0,2072	*	0,20
	3,32	0,6202	0,7847	0,68	0,6202	0,6902	0,60	0,3431	*	0,37
	3,50	0,6202	0,7354	0,69	0,6202	0,6494	0,61	0,3243	*	0,33
	2,72	0,6202	0,9848	0,87	0,6202	0,8615	0,82	0,4219	*	0,41
	3,56	0,6202	0,7215	0,67	0,6202	0,6373	0,60	0,3154	*	0,31
	4,52	0,5392	*	0,48	0,4787	*	0,46	0,2440	*	0,21
	4,48	0,5440	*	0,51	0,4827	*	0,45	0,2476	*	0,24
	3,93	0,6202	0,6427	0,56	0,5593	*	0,48	0,2829	*	0,25

TABELA 6.3 - Comprimento necessário para a sedimentação das partículas discretas no duto a/b = 0,5

Veloc. de escoam. (cm/min)	Posições	5 cm			3,5 cm			1,5 cm		
	Veloc. de sedimen. (cm/min)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)
30	2,24	1,4643	1,7046	0,85	1,4643	1,6525	0,84	1,2365	*	0,91
	5,20	0,6392	*	0,42	0,6276	*	0,45	0,5159	*	0,31
	3,32	1,0893	*	0,83	1,0537	*	0,78	0,8281	*	0,83
	3,50	1,0197	*	0,82	0,9979	*	0,59	0,7880	*	0,67
	2,72	1,3639	*	0,83	1,3138	*	0,77	1,0197	*	0,83
	3,56	0,9979	*	0,79	0,9767	*	0,72	0,7727	*	0,67
	4,52	0,7578	*	0,71	0,7433	*	0,65	0,6051	*	0,59
	4,48	0,7727	*	0,73	0,7578	*	0,62	0,6162	*	0,62
	3,93	0,8890	*	0,73	0,8710	*	0,73	0,7018	*	0,71
25	2,24	1,2212	1,4059	0,95	1,2212	1,3616	0,91	1,0191	*	0,91
	5,20	0,5234	*	0,46	0,5139	*	0,47	0,4229	*	0,41
	3,32	0,8941	*	0,68	0,8651	*	0,78	0,6881	*	0,66
	3,50	0,8322	*	0,70	0,8146	*	0,78	0,6441	*	0,57
	2,72	1,1233	*	0,92	1,0823	*	0,90	0,8413	*	0,77
	3,56	0,8146	*	0,69	0,7975	*	0,73	0,6320	*	0,66
	4,52	0,6199	*	0,62	0,6081	*	0,58	0,4956	*	0,49
	4,48	0,6320	*	0,61	0,6199	*	0,57	0,4956	*	0,55
	3,93	0,7339	*	0,65	0,7118	*	0,63	0,5743	*	0,49
20	2,24	0,9752	1,1049	0,83	0,9752	1,072	0,85	0,8043	*	0,88
	5,20	0,3958	*	0,32	0,3887	*	0,34	0,3208	*	0,24
	3,32	0,6941	*	0,67	0,6791	*	0,64	0,5353	*	0,52
	3,50	0,6505	*	0,60	0,6369	*	0,67	0,5047	*	0,48
	2,72	0,8750	*	0,78	0,8538	*	0,66	0,6575	*	0,65
	3,56	0,6369	*	0,56	0,6236	*	0,63	0,4950	*	0,30
	4,52	0,4764	*	0,41	0,4674	*	0,37	0,3751	*	0,30
	4,48	0,4809	*	0,45	0,4674	*	0,41	0,3784	*	0,34
	3,93	0,5627	*	0,65	0,5515	*	0,53	0,4418	*	0,38

* $l_r = l_s$

TABELA 6.3 - continuação

Veloc. de escoam. (cm/min)	Posições	1 cm		
	Veloc. de sedimen. (cm/min)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)
30	2,24	1,0087	*	0,91
	5,20	0,4355	*	0,38
	3,32	0,6887	*	0,65
	3,50	0,6511	*	0,59
	2,72	0,8365	*	0,67
	3,56	0,6392	*	0,67
	4,52	0,5070	*	0,45
	4,48	0,5070	*	0,50
	3,93	0,5836	*	0,44
25	2,24	0,8322	*	0,85
	5,20	0,3515	*	0,31
	3,32	0,5672	*	0,56
	3,50	0,5331	*	0,45
	2,72	0,6838	*	0,56
	3,56	0,5234	*	0,37
	4,52	0,4086	*	0,39
	4,48	0,4086	*	0,39
	3,93	0,4697	*	0,44
20	2,24	0,6505	*	0,55
	5,20	0,2651	*	0,22
	3,32	0,4336	*	0,44
	3,50	0,4104	*	0,38
	2,72	0,5353	*	0,49
	3,56	0,4030	*	0,40
	4,52	0,3101	*	0,45
	4,48	0,3127	*	0,33
	3,93	0,3620	*	0,40

* $l_r = l_s$

TABELA 6.4 - Comprimento necessário para a sedimentação das partículas discretas no duto a/b = 0,25

Veloc. de escoam. (cm/min)	Posições veloc. de sedim. (cm/min)	10			7,5			5		
		l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)
30	2,24	1,3463	1,5206	0,88	1,3463	1,5166	0,91	1,3463	1,488	0,89
	5,20	0,5772	*	0,48	0,5772	*	0,50	0,5772	*	0,38
	3,32	0,9778	*	0,75	0,9778	*	0,88	0,9655	*	0,72
	3,50	0,9186	*	0,83	0,9186	*	0,69	0,9074	*	0,70
	2,72	1,2285	*	0,88	1,2285	*	0,77	1,1942	*	0,88
	3,56	0,9074	*	0,8	0,8964	*	0,62	0,8856	*	0,75
	4,52	0,6889	*	0,55	0,6815	*	0,5	0,6815	*	0,62
	4,48	0,6889	*	0,64	0,6889	*	0,59	0,6815	*	0,58
	3,93	0,8056	*	0,67	0,8056	*	0,62	0,7964	*	0,71
25	2,24	1,1189	1,2587	0,89	1,1189	1,2554	0,81	1,1189	1,2319	0,83
	5,20	0,4719	*	0,42	0,4679	*	0,36	0,4679	*	0,35
	3,32	0,8052	*	0,69	0,8052	*	0,66	0,7952	*	0,67
	3,50	0,7568	*	0,67	0,7568	*	0,62	0,7476	*	0,62
	2,72	1,0101	*	0,77	1,0101	*	0,93	0,9821	*	0,95
	3,56	0,7386	*	0,77	0,7297	*	0,60	0,7210	*	0,60
	4,52	0,5536	*	0,49	0,5563	*	0,51	0,5504	*	0,49
	4,48	0,5593	*	0,52	0,5593	*	0,52	0,5534	*	0,49
	3,93	0,6566	*	0,56	0,6566	*	0,58	0,6491	*	0,49
20	2,24	0,8935	0,9898	0,73	0,8935	0,9873	0,85	0,8935	0,9667	0,70
	5,20	0,3588	*	0,31	0,3588	*	0,35	0,3588	*	0,31
	3,32	0,6271	*	0,44	0,6271	*	0,55	0,6194	*	0,56
	3,50	0,5898	*	0,50	0,5898	*	0,56	0,5758	*	0,51
	2,72	0,7848	*	0,71	0,7848	*	0,68	0,7734	*	0,64
	3,56	0,5690	*	0,50	0,5690	*	0,52	0,5623	*	0,50
	4,52	0,4259	*	0,37	0,4259	*	0,41	0,4214	*	0,33
	4,48	0,4304	*	0,37	0,4304	*	0,39	0,4259	*	0,36
	3,93	0,5067	*	0,39	0,5067	*	0,44	0,5011	*	0,45

* $l_r = l_t$

TABELA 6.4 - Continuação

Veloc. de escoam. (cm/min)	Posições			2,5 cm			1,0 cm			
	veloc. de sedimen. (cm/min)	I_r (m)	I_s (m)	I_{obs} (m)	I_r (m)	I_s (m)	I_{obs} (m)	I_r (m)	I_s (m)	I_{obs} (m)
30	2,24	1,3068	*	0,78	0,8692	*	0,61			
	5,20	0,5335	*	0,51	0,3854	*	0,29			
	3,32	0,8646	*	0,85	0,6072	*	0,49			
	3,50	0,8246	*	0,73	0,5715	*	0,50			
	2,72	1,0706	*	0,97	0,7276	*	0,66			
	3,56	0,8056	*	0,95	0,5658	*	0,47			
	4,52	0,6198	*	0,65	0,4429	*	0,39			
	4,48	0,6262	*	0,62	0,4509	*	0,42			
	3,93	0,7196	*	0,67	0,5085	*	0,44			
25	2,24	1,0701	*	0,81	0,7211	*	0,88			
	5,20	0,4323	*	0,39	0,3109	*	0,21			
	3,32	0,7125	*	0,66	0,4962	*	0,46			
	3,50	0,6719	*	0,6	0,4672	*	0,39			
	2,72	0,8812	*	0,78	0,5936	*	0,47			
	3,56	0,6566	*	0,52	0,4581	*	0,34			
	4,52	0,5064	*	0,44	0,3596	*	0,41			
	4,48	0,5090	*	0,46	0,3628	*	0,40			
	3,93	0,5871	*	0,55	0,4162	*	0,44			
20	2,24	0,8421	*	0,68	0,5623	*	0,46			
	5,20	0,3292	*	0,25	0,2344	*	0,20			
	3,32	0,5557	*	0,54	0,3806	*	0,37			
	3,50	0,5243	*	0,44	0,3588	*	0,32			
	2,72	0,6855	*	0,55	0,4638	*	0,45			
	3,56	0,5067	*	0,40	0,3519	*	0,31			
	4,52	0,3883	*	0,31	0,2749	*	0,26			
	4,48	0,3922	*	0,36	0,2773	*	0,28			
	3,93	0,4539	*	0,39	0,3172	*	0,32			

* $I_r = I_s$

TABELA 6.5 - Comprimento necessário para sedimentação das partículas discretas no duto a/b = 0,1

Veloc. de escoam. (cm/min)	2,5 cm				17 cm				9 cm			
	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_{obs} (m)
30	2,24	1,3922	0,91	0,7860	1,3922	0,88	0,7860	1,3922	0,88	0,7860	1,3922	0,84
	5,20	*	0,52	0,5455	*	0,47	0,5455	*	0,47	0,5455	*	0,42
	3,32	0,9131	0,76	0,7860	0,9131	0,66	0,7860	0,9131	0,66	0,7860	0,9131	0,55
	3,50	0,8639	0,75	0,7860	0,8639	0,66	0,7860	0,8639	0,66	0,7860	0,8639	0,78
	2,72	1,1300	0,91	0,7860	1,1300	0,86	0,7860	1,1300	0,86	0,7860	1,1300	0,88
	3,56	0,8488	0,78	0,7860	0,8488	0,78	0,7860	0,8488	0,78	0,7860	0,8488	0,83
	4,52	*	0,65	0,6381	*	0,51	0,6381	*	0,51	0,6381	*	0,65
	4,48	0,6447	0,58	0,6447	0,6447	0,50	0,6447	0,6447	0,50	0,6447	0,6447	0,58
	3,93	0,7504	0,62	0,7504	0,7504	0,61	0,7504	0,7504	0,61	0,7504	0,7504	0,63
25	2,24	1,1476	0,85	0,6555	1,1476	0,72	0,6555	1,1476	0,72	0,6555	1,1476	0,77
	5,20	*	0,48	0,4424	*	0,39	0,4424	*	0,39	0,4424	*	0,49
	3,32	0,7479	0,80	0,6555	0,7479	0,74	0,6555	0,7479	0,74	0,6555	0,7479	0,70
	3,50	0,7064	0,61	0,6555	0,7064	0,44	0,6555	0,7064	0,44	0,6555	0,7064	0,49
	2,72	0,9295	0,86	0,6555	0,9295	0,85	0,6555	0,9295	0,85	0,6555	0,9295	0,83
	3,56	0,6937	0,62	0,6555	0,6937	0,47	0,6555	0,6937	0,47	0,6555	0,6937	0,39
	4,52	*	0,60	0,5214	*	0,52	0,5214	*	0,52	0,5214	*	0,59
	4,48	0,5267	0,63	0,5267	0,5267	0,45	0,5267	0,5267	0,45	0,5267	0,5267	0,50
	3,93	0,6118	0,61	0,6118	0,6118	0,49	0,6118	0,6118	0,49	0,6118	0,6118	0,50
20	2,24	0,9003	0,87	0,5234	0,9002	0,74	0,5234	0,9002	0,74	0,5234	0,8962	0,83
	5,20	*	0,31	0,3376	*	0,31	0,3376	*	0,31	0,3376	*	0,32
	3,32	0,5806	0,57	0,5234	0,5806	0,44	0,5234	0,5806	0,44	0,5234	0,5792	0,58
	3,50	0,5482	0,59	0,5234	0,5482	0,49	0,5234	0,5482	0,49	0,5234	0,5473	0,53
	2,72	0,7260	0,61	0,5234	0,7260	0,78	0,5234	0,7260	0,78	0,5234	0,7263	0,56
	3,56	0,5374	0,49	0,5234	0,5374	0,52	0,5234	0,5374	0,52	0,5234	0,5367	0,58
	4,52	*	0,44	0,4000	*	0,41	0,4000	*	0,41	0,4000	*	0,44
	4,48	0,4040	0,33	0,4040	0,4040	0,41	0,4040	0,4040	0,41	0,4040	0,4040	0,46
	3,93	0,4726	0,48	0,4726	0,4726	0,44	0,4726	0,4726	0,44	0,4726	0,4726	0,56

* $l_r = l_s$

a) sedimentação no trecho de transição

DUTO $a/b = 1$

Nas figuras B.10 a B.18, para a partícula com velocidade de sedimentação 5,20 cm/min, para velocidades médias de escoamento iguais a 30, 25 e 20 cm/min, é possível observar que, tanto nos dados previstos pela modelação como nos dados experimentais, houve deposição de partículas no trecho de transição, mesmo para a maior velocidade de escoamento (30 cm/min) como para a partícula que entra na posição mais desfavorável —que é o ponto superior do plano longitudinal vertical central do duto—, já que daí ela percorre a maior distância até sedimentar.

Nas partículas com $V_s = 5,20, 4,52$ e $4,48$ cm/min, para as três velocidades médias de escoamento, a maior variação dos resultados teóricos com relação aos resultados experimentais foi para as velocidades médias de escoamento maior, como é mostrada na tabela 6.6.

TABELA 6.6 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental - duto $a/b=1$

Vs cm/min	Vem cm/min	posição de entrada da partícula		
		2,5 cm	1,5 cm	0,5 cm
5,20	30	4,78%	9,62%	22,53%
	25	23%	18,53%	13,13%
	20	13%	3,12%	3,6%
4,52	30	39,82%	22,65%	8,75%
	25	26,52%	21,96%	9,0%
	20	10,97%	3,90%	13,93%
4,48	30	49,72%	7,80%	22,01%
	25	12,90%	19,38%	10,18%
	20	6,25%	6,77%	3,069%

DUTO $a/b = 0,5$

Nas figuras C.73 a C.84 são apresentadas as comparações referentes a partícula com velocidade de sedimentação igual a 4,52 cm/min, para velocidades médias do escoamento 30, 25 e 20 cm/min, para a partícula que entra no duto em diferentes posições da aresta superior. Neste caso, a variação da previsão do comprimento total necessário teórico quando comparados com os resultados experimentais é mostrada na tabela 6.7.

A maior variação dos resultados teóricos com os experimentais foi para as velocidades de 20 cm/min.

Tabela 6.7 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental - duto $a/b=0,5$

Vs cm/min	Vem cm/min	posição da partícula a partir da parede			
		5,0 cm	3,5 cm	1,5 cm	1,0 cm
4,52	30	6,30%	12,55%	2,49%	11,24%
	25	1%	4,67%	1,14%	4,55%
	20	12,59%	32,42%	42,46%	45,11%

DUTO $a/b = 0,25$

Nas figuras D.61 a D.64, observa-se para $L_s > 20$, as trajetórias experimentais apresentam desvios, já que sedimenta antes quando comparada com as trajetórias teóricas.

Nas figuras D.65 a D.75, são apresentadas as figuras referentes a partícula com $V_s = 2,72$ cm/min e velocidades médias de escoamento 30, 25 e 20 cm/min. Neste caso, o comprimento total necessário experimental é inferior ao comprimento previsto pela modelação. A variação para as posições da entrada da partícula no duto é apresentada na tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental - duto $a/b=0,25$

Vs cm/min	Vem cm/min	posição da partícula a partir da parede				
		10 cm	7,5 cm	5 cm	2,5 cm	1,0 cm
2,72	30	*	*	*	*	9,29%
	25	*	*	3,26%	11,48%	20,82%
	20	9,53%	13,35%	17,24%	19,77%	2,97%

* Não calculado $L_s > 20$

DUTO $a/b = 0,1$

As figuras E.73 a E.81 apresentam a trajetória teórica e experimental, para a partícula com velocidade de sedimentação igual a 3,93 cm/min, para velocidades de escoamento 30, 25 e 20 cm/min. A previsão do desempenho do duto pelo modelo é boa em termos de comprimento necessário para a sedimentação como mostra a tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental - duto $a/b=0,1$

Vs cm/min	Vem cm/min	posição da partícula a partir da parede		
		5,0 cm	3,5 cm	1,5 cm
3,93	30	17,37%	18,71%	16,64%
	25	1%	19,90%	18,27%
	20	1,56%	6,89%	18,49%

b) sedimentação no perfil de velocidades totalmente desenvolvido

DUTO $a/b=1$

Observa-se nas figuras B.19, B.20 e B.28, que o comprimento total necessário teórico para sedimentação da partícula é maior do que $L_s = 20$, significando que a trajetória experimental, até onde foi possível sua visualização, acompanhou a trajetória teórica.

Nas figuras B.25, B.26, B.29, B.32, B.34 e B.35, são apresentadas as variações do comprimento total necessário teórico e experimental. A variação do modelo teórico, junto os dados experimentais é apresentada na tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental- duto $a/b=1$

Vs cm/min	Vem cm/min	posição da partícula a partir da parede	
		2,5 cm	1,5 cm
3,32	30	*	*
	25	*	1,12%
	20	13,37%	13,06%
3,5	30	*	15,63%
	25	6,8%	16,24%
	20	10,13%	13,06%

* não calculado $l_s > 1.0$

DUTO $a/b = 0,5$

A comparação entre os dados experimentais e os previstos pela modelação referentes à partícula com velocidade de sedimentação V_s igual a 2,24 cm/min e para velocidades médias de escoamento 30, 25 e 20 cm/min é realizada nas figuras C.2, C.5 e C.6. Verifica-se que, para $L_s > 20$, a visualização da partícula até o final da sedimentação não foi possível,

embora tendência da trajetória experimental seja a mesma que a teórica, o que não acontece nas figuras C.1, C.9 e C.10, que apresentam um desvio da trajetória.

DUTO $a/b = 0,25$

Nas figuras D.1, D.2, observam-se as comparações para $L_s > 20$, verifica-se que o comportamento da trajetória experimental é muito parecida com a trajetória até onde é possível observar. Enquanto que as figuras D.3, D.6, D.7 e D.8, apresentam desvios da trajetória experimental comparada com a trajetória teórica.

Nas figuras D.11, D.12 e D.13, são apresentadas as trajetóriasteóricas e experimentais referentes a partícula com $V_s = 2,24$ cm/min e velocidade média de escoamento 20 cm/min. Neste caso, o comprimento total necessário experimental é inferior ao comprimento previsto pela modelação, sendo a variação para as posições da entrada da partícula no duto de 10 cm (25,22%), 7,5cm (13,90%) e 5 cm (27,58 %).

DUTO $a/b = 0,1$

A comparação entre os dados observados e previstos pela modelação referente ao experimento é realizada nas figuras D.28 até D.37 e D.45 até D.46, respectivamente. Verificando-se uma vez mais que o modelo prevê razoavelmente a variação observada.

Tabela 6.11 - Diferença entre os comprimentos teórico e experimental - duto $a/b=0,1$

Vs cm/min	Vem cm/min	posição da partícula a partir da parede		
		25 cm	17 cm	9 cm
3,50	30	15,18%	23,60%	9,71%
	25	6,96%	1,06%	18,89%
	20	1,83%	24,21%	1,3%
3,56	30	8,10%	8,10%	2,21%
	25	10,62%	32,23%	43,67%
	20	15,97%	7,43%	22,89%

Os desvios numéricos verificados durante o trabalho, estão dentro das margens de erros previsíveis em trabalhos experimentais.

Ainda no que tange aos desvios verificados, pode-se dizer quanto aos meios de ensaio utilizados, que o uso da metodologia de filmagem e reprodução da trajetória da partícula teve algumas limitações: a) não se pode ter a imagem completa do duto e, portanto, a observação e quantificação da partícula não foram completas (em alguns casos a medida foi realizada

manualmente); b) nos cálculos realizados, não foi considerada a refração da luz na água e no acrílico.

Portanto, em função dos resultados obtidos experimentalmente, pode-se concluir que a modelação matemática proposta é válida para reproduzir as trajetórias de partículas discretas sedimentando em dutos.

6.3 Comparação do modelo proposto com o de Yao (1970,1973).

O modelo de Yao (1970,1973), permite determinar o comprimento dos dutos utilizados na decantação de alta taxa, assumindo que a remoção da partícula ocorra no perfil totalmente desenvolvido. No entanto, desde a entrada dos dutos, onde se assume que o escoamento ocorre com velocidade uniforme, até uma distância em que o perfil encontra-se totalmente desenvolvido, verifica-se que é possível, sob certas circunstâncias, a partícula sedimentar ou estar numa posição diferente daquela assumida por Yao, que é na parte superior.

Yao (1970,1973) sugere que o comprimento de transição l_t seja somado ao comprimento do perfil desenvolvido l_r , para obter o comprimento total do sedimentador, ou seja: $l_t + l_r = l_s$, se $l_t < l_r$; $l_s = 2 l_r$ se $l_t > l_r$. Para o cálculo do comprimento de transição Yao utilizou a equação de Langhaar (1942) indiscriminadamente para qualquer seção do duto, observando-se erros apreciáveis quando se trata de dutos retangulares e quadrados, como mostra a tabela 6.12 quando são comparados resultados teóricos de HAN (1960) e experimentais de GOLDSTEIN & KREID (1967) E SPARROW (1967).

Cabe resaltar que o trabalho desenvolvido por Han (1960) foi utilizado nesta pesquisa, tendo sido reproduzidos satisfatoriamente os resultados obtidos pelo autor.

Nas tabelas 6.13 e 6.14 são apresentados resumos em que se compara o modelo proposto com o modelo de Yao, que é amplamente utilizado no projeto de decantadores de alta taxa, para placas planas paralelas ($a/b = 0,1$) e dutos quadrado ($a/b = 1$).

Considera-se para fins de comparação, a situação da partícula que define o comprimento do duto, como sendo aquela que se localiza inicialmente no ponto superior do plano longitudinal vertical central do duto por atingir uma distância maior. A conclusão que se chega é que a simples soma de l_t com l_r leva um sedimentador maior que o calculado pelo modelo proposto, já que no cálculo desenvolvido por Yao, a partícula encontra-se na parte superior quando está no perfil desenvolvido, situação que não acontece.

Cunha (1989), estudando diversos tipos de duto em uma instalação piloto localizada no interior da última câmara de floculação da instalação de tratamento de água de São Carlos,

TABELA 6.12 - Comprimento de transição nos dutos

Duto	a = 5 b = 5		a = 5 b = 10		a = 5 b = 20		a = 5 b = 50
D_c	0,05		0,067		0,08		0,091
Re_1	248,26		331,02		397,22		451,38
Re_2	207,05		276,07		331,28		376,46
Re_3	165,34		220,46		264,55		300,62
β_a	0,590		0,485		0,470		0,590
ϵ	0,0752*	0,08**	0,0660*	0,09***	0,0427*	0,09***	0,0192*
Φ_1	0,93*	0,99**	1,46*	1,99***	1,36*	2,86***	0,79*
Φ_2	0,78*	0,82**	1,21*	1,66***	1,13*	2,38***	0,66*
Φ_3	0,62*	0,66**	0,97*	1,33***	0,9*	1,90***	0,53*

- * resultados do Modelo de HAN (1960) , apresentado no anexo A.
- ** resultados a partir da constante obtida por SPARROW (1967) para dutos quadrados.
- *** resultados a partir da constante obtida por GOLDSTEIN & KRREID (1967)

Tabela 6.13 - Comparação dos Modelos para determinação do comprimento necessário para sedimentação duto $a/b = 0.1$

Velocidade de escoamento (cm/min)	Velocidade de sedimentação (cm/min)	Modelo de Yao (1970)			Modelo proposto			dados experimentais l_s (m)	% variação
		l_t (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_t (m)	l_r (m)	l_s (m)		
30	2,24	0,72	1,75	2,47	0,93	0,93	1,86	> 1.0	24,70
	3,32	0,72	1,05	1,77	0,93	0,29	1,22	> 1.0	31,00
	4,48	0,72	0,83	1,55	0,86	*	0,86	0,61	44,51
	5,20	0,72	0,71	1,42	0,72	*	0,72	0,69	49,29
25	2,24	0,60	1,45	2,05	0,77	0,76	1,54	> 1.0	24,87
	3,32	0,60	0,95	1,55	0,77	0,22	1,00	0,92	35,48
	4,48	0,60	0,68	1,28	0,70	*	0,70	0,61	45,31
	5,20	0,60	0,57	1,14	0,58	*	0,58	0,45	49,12
20	2,24	0,48	1,14	1,62	0,62	0,59	1,22	> 1.0	24,69
	3,32	0,48	0,74	1,22	0,62	0,16	0,78	0,68	58,06
	4,48	0,48	0,53	1,01	0,54	*	0,54	0,51	46,53
	5,20	0,48	0,44	0,88	0,45	*	0,45	0,39	48,86

* partícula que sedimenta na transição

Tabela 6.14 - Comparação dos Modelos para determinação do comprimento de sedimentação para $a/b = 1$

Velocidade de escoamento (cm/min)	Velocidade de sedimentação (cm/min)	Modelo de Yao (1970)			Modelo proposto			dados experimentais l_s (m)	% variação
		l_t (m)	l_r (m)	l_s (m)	l_t (m)	l_r (m)	l_s (m)		
30	2,24	0,72	1,25	1,97	0,79	0,6062	1,39	> 1	29,44
	3,32	0,72	0,81	1,53	0,79	0,1271	0,91	0,76	40,52
	4,48	0,72	0,58	1,16	0,64	*	0,64	0,58	44,88
	5,20	0,72	0,49	0,98	0,55	*	0,55	0,52	43,87
25	2,24	0,60	1,03	1,63	0,66	0,49	1,15	> 1	29,44
	3,32	0,60	0,67	1,27	0,66	0,09	0,75	0,80	43,62
	4,48	0,60	0,47	0,94	0,53	*	0,53	0,63	41,00
	5,20	0,60	0,39	0,78	0,44	*	0,44	0,48	43,58
20	2,24	0,48	0,81	1,29	0,52	0,38	0,90	0,87	30,23
	3,32	0,48	0,52	1,00	0,52	0,07	0,58	0,57	42,00
	4,48	0,48	0,36	0,72	0,40	*	0,40	0,33	42,67
	5,20	0,48	0,30	0,60	0,34	*	0,34	0,31	43,33

* partícula que sedimenta na transição

verificou experimentalmente que a teoria de Yao não se aplicava, pois, em várias situações havia remoção considerável de turbidez quando o comprimento do trecho de transição superava o comprimento do duto experimental.

Observa-se, nas tabelas 6.13 e 6.14 que para as partículas que sedimentaram no perfil de velocidades totalmente desenvolvido a diferença do comprimento entre os dois modelos fica na faixa de 24,70% a 58,06% para o duto quadrado e de 29 a 42 % para placas planas paralelas, enquanto que para as partículas que sedimentaram no comprimento de transição, a diferença fica na faixa de 41 % a 43 % para os dutos quadrados, sendo levemente superior para placas planas paralelas que é da ordem de 44,51% a 48,86 %,

6.4 Influência das variáveis

A seguir serão discutidos os resultados obtidos, geometria dos dutos, velocidade de sedimentação das partículas, posição da partícula na entrada do duto e a velocidade média de escoamento.

a) Geometria dos dutos - partícula no centro

Na Figura 6.1 é mostrada a variação do comprimento necessário para a sedimentação da partícula com velocidades de sedimentação de 2,24 e 4,52 cm/min. Para as três velocidades medias de escoamento de 20, 25 e 30 cm/min, o comprimento necessário para a sedimentação da partícula diminui com a diminuição da relação a/b . Para o duto quadrado ($a/b = 1$) o comprimento necessário para sedimentação será maior que para os dutos retangulares ($a/b = 0,5; 0,25$ e $0,1$). Observa-se que para dutos com relação geométrica $a/b = 0,1$ até $a/b = 0,5$, o comprimento necessário aumenta mais rapidamente que para dutos com relação geométrica $a/b = 0,5$ até $a/b = 1$. Na Figura 6.1 foi considerada a situação crítica, isto é, aquela referida ao plano vertical, longitudinalmente no centro do sedimentador: o sedimentador de placas planas paralelas apresenta melhor desempenho quando comparado às demais configurações.

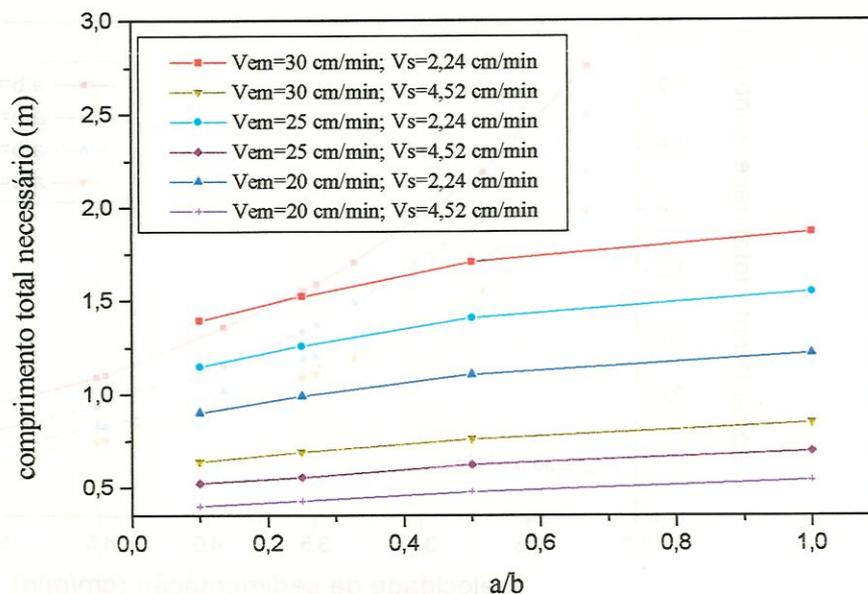


FIGURA 6.1 - Influência da relação a/b no comprimento necessário para a sedimentação da partícula discreta no centro do duto

b) Velocidade de Sedimentação

Na Figura 6.2, são mostradas as curvas que relacionam o comprimento total necessário para sedimentação em função da velocidade de sedimentação para diferentes dutos e velocidade média de escoamento igual a 30 cm/min.

As partículas com velocidades de sedimentação menores precisam de comprimento maior para sedimentar, para os quatro dutos.

Utilizando-se o mesmo comprimento relativo para os quatro dutos ($L_s=20$), a velocidade de sedimentação diminui com a diminuição da relação a/b , significando que, para se obter o mesmo desempenho num duto quadrado e num de placas paralelas, a velocidade de sedimentação da partícula no duto quadrado deverá ser maior do que o de placas planas paralelas.

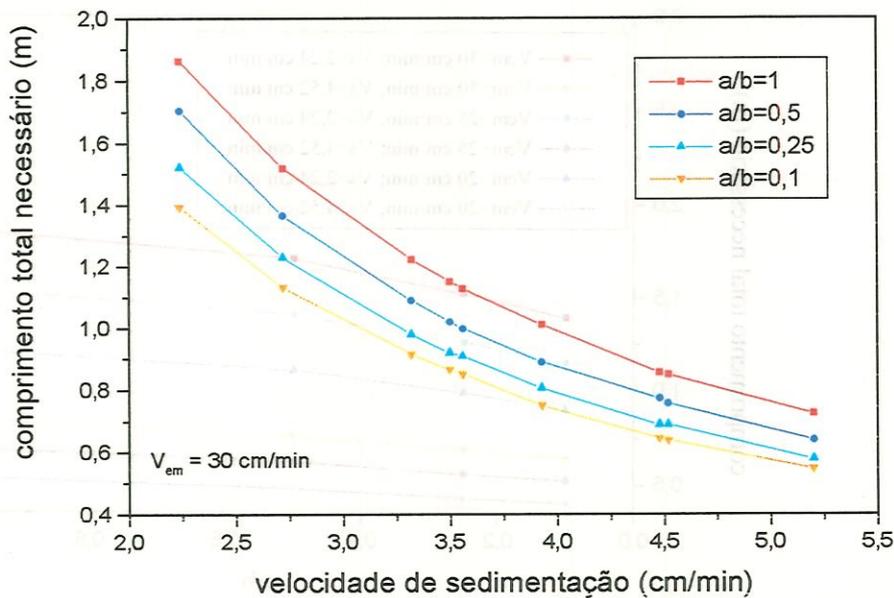


FIGURA 6.2 - Influência da velocidade de sedimentação no comprimento necessário para a sedimentação da partícula discreta

c) Posição da partícula na entrada do duto

A seguir serão analisadas duas situações :

c1) suspensão afluyente contendo partículas uniformes

Sejam os quatro dutos, com geometria de $a/b=1,0;0,5;0,25$ e $0,1$, para velocidade de escoamento constante e igual 25 cm/min, e velocidade de sedimentação constante e igual $2,72$ cm/min, e $L_s = 20$, como proposto por Yao (1970). As partículas serão removidas nos dutos com relação $a/b=0,1$ e $0,25$ (tendência a placas planas paralelas), qualquer seja a posição que elas ocupem na aresta superior do duto, enquanto que nas geometrias $a/b = 0,5$ e $a/b = 1$ (duto quadrado), as partículas que entrarem no centro não serão removidas. Entretanto, partículas que entrarem distantes do centro poderão ser removidas nos dutos com a/b igual a $0,5$ ou 1 .

Nas condições de uma partícula com velocidade de sedimentação $4,48$ cm/min, com velocidade de escoamento igual a 25 cm/min e com $L_s = 20$, as partículas sedimentam em

posição que elas ocupem na entrada do duto em todas as suas configurações. Ressalta-se que, para partículas que sedimentam no trecho de transição, a adoção do $L_s=20$ é uma atitude muito conservadora, mesmo que elas entrem no centro.

c2) suspensão afluyente contendo partículas não uniformes

Sejam as partículas com V_s de 2,72, 4,48 que entram no mesmo sedimentador. Considerando-se $V_s=4,48$ cm/min como velocidade de projeto tem-se:

Se $2,72$ cm/min $< V_s < 4,48$ cm/min e $L_s=20$ resulta:

i) duto $a/b = 1$ (duto quadrado) e $a/b = 0,5$: a partícula com $V_s = 2,72$ cm/min sedimentará quando ocupar posições distantes do centro.

ii) duto $a/b = 0,25$ e $a/b = 0,1$ (placas planas paralelas): a partícula com $V_s = 2,72$ cm/min, sedimentará qualquer seja sua posição de entrada nos dutos.

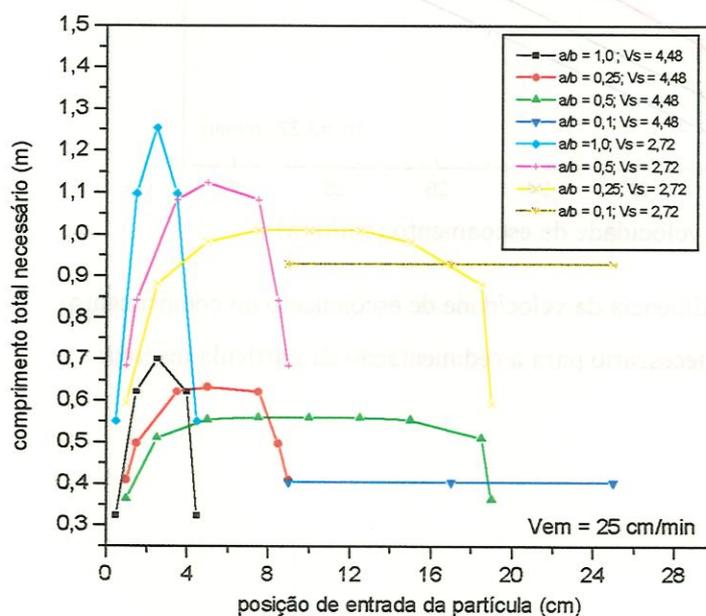


FIGURA 6.3 - Influência da posição da partícula na entrada do duto em função do comprimento total.

d) Velocidade de escoamento

O aumento da velocidade de escoamento conduz a um aumento do comprimento do trecho de transição como mostrado na tabela 6.6 e, conseqüentemente, provoca o aumento do

comprimento necessário para a sedimentação da partícula (tabelas 6.2,6.3,6.4 e 6.5). Tanto o comprimento de sedimentação no trecho de transição como o no perfil de velocidades totalmente desenvolvido aumenta com o aumento da velocidade de sedimentação.

Na Figura 6.4, assumindo-se que $V_s = 3,32$ cm/min e $L_s = 20$, a partícula sedimentará nos quatro dutos até uma velocidade de escoamento de 25 cm/min, embora as geometrias $a/b = 0,25$ e $a/b = 0,1$, requeram menor comprimento para sedimentar.

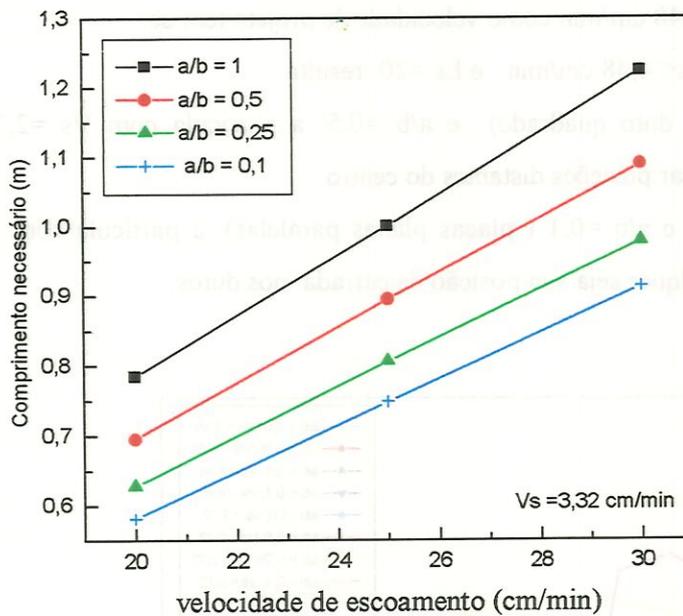


FIGURA 6.4 - Influência da velocidade de escoamento no comprimento necessário para a sedimentação da partícula discreta.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no trabalho realizado concluiu-se que:

- 1) A modelação matemática desenvolvida para prever o desempenho dos dutos quadrados e retangulares, foi baseada na distribuição de velocidades ao longo do duto.
- 2) Com o desenvolvimento da pesquisa experimental, usando 4 configurações de dutos diferentes e ângulo de inclinação de 60° para velocidades de sedimentação diferentes, verificou-se que a previsão do modelo é satisfatória para prever as trajetórias de partículas discretas como é mostrado nos Anexos B, C, D e E e nas tabelas 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5.
- 3) A modelação matemática é válida para prever o comprimento necessário para sedimentação de partículas discretas em dutos quadrados e retangulares, nos trechos de transição e de perfil de velocidades totalmente desenvolvido.
- 4) O modelo proposto fornece a trajetória de partículas discretas sedimentando no trecho de transição e no trecho com perfil totalmente desenvolvido, para diferentes situações fluidodinâmicas (V_{em} , V_s e a/b).
- 5) A região de intrusão de partículas no sedimentador foi quantificada, mostrando que partículas que entram em diferentes posições tangenciando a face superior do duto, apresentam diferentes comprimentos de sedimentação, comprovando desta forma a influência do perfil de velocidades nos dois planos (longitudinal e transversal).
- 6) Os resultados permitiram observar que para dutos quadrados e retangulares, as partículas podem ser removidas no trecho de transição, entre a região de entrada e a região de escoamento totalmente desenvolvido, o que foi desprezado por YAO (1970, 1973).
- 7) A diferença do modelo proposto quando comparado com o modelo de Yao (1970), enquanto se refere ao comprimento necessário para sedimentação das no perfil de velocidades totalmente desenvolvido fica na faixa de 24,70% a 58,0% no duto quadrado e

de 29 a 42 % para placas planas paralelas, e para aquelas partículas que sedimentaram no comprimento de transição, a diferença fica na faixa de 41% a 43% para os dutos quadrados para placas planas paralelas que é da ordem de 44,51% a 48,86%.

8) Um exemplo da utilização do modelo para um caso real, é apresentado no Apêndice.

É recomendável a execução de investigação experimental com partículas de menor velocidade de sedimentação, entrando no dutos abaixo da face superior, para verificar a sua trajetória, pois a modelação proposto pode ser utilizada independente da posição de entrada da partícula.

Recomenda-se também a execução experimental semelhante, porém utilizar água floculada.

...

(A) ...

(B) ...

(C) ...

(D) ...

(E) ...

(F) ...

ANEXO A

(G) ...

(H) ...

(I) ...

(J) ...

(K) ...

MODELO DO HAN (CALCULO DO COMPRIMENTO DE TRANSIÇÃO)

CALCULO DE X EM FUNÇÃO DE β

$$I_1(\beta) = \int_A [u^2 - u_0^2/2] dz dy \quad (\text{A.1})$$

$$I_2(\beta) = \{v \int [\nabla^2 u - (\nabla^2 u)_0] dz dy\}^{-1} \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{d}{dx}(I_1) = \frac{1}{I_2} \quad (\text{A.3})$$

$$x = \int_{b=-\infty}^b I_2 d(I_1) \quad (\text{A.4})$$

CALCULO DE I_1

$$u = \left(-\frac{16}{\pi^2}\right) \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} (2a/\pi)^2 AB}{mn[C]} \quad (\text{A.5})$$

$$V_{em} = \left(-\frac{16}{\pi^2}\right) \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \left(\frac{16}{\pi^{42}}\right) a^2 \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \quad (\text{A.6})$$

$$u' = \frac{u}{V_{em}} = \frac{\pi^2}{4} \frac{\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} AB}{mn[C]}}{\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]}} \quad (\text{A.7})$$

$$I_1(\beta) = \iint_A (u')^2 dz dy - \iint_A ((u_0')^2 / 2) dz dy \quad (\text{A.8})$$

$$\iint_A (u')^2 dz dy = \frac{\pi^4}{16} \frac{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} AB}{mn[C]} \right)^2}{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right)} \quad (\text{A.9})$$

$$\iint_A (u_0')^2 dzdy = \frac{\pi^4}{16} \frac{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{(mn[C])} \right)^2}{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{(m^2 n^2 [C])} \right)^2} \quad (\text{A.10})$$

Resolvendo a Integral:

Limite superior: $z = a$ $y = b$

Limite inferior $z = 0$ $y = 0$

$$\iint_A (u')^2 dzdy = \frac{\pi^4}{16} \frac{ab}{4} \frac{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \left(\frac{1}{mn[C]} \right)^2 \right)}{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right)^2} \quad (\text{A.11})$$

$$\iint_A (u_0')^2 dzdy = \frac{\pi^4}{16} \frac{ab}{2} \frac{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{(mn[C])} \right)^2}{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{(m^2 n^2 [C])} \right)^2} \quad (\text{A.12})$$

$$I_1(\beta) = \frac{\pi^4}{16} ab \left[\frac{1}{4} \frac{\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \left(\frac{1}{mn[C]} \right)^2}{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right)^2} - \frac{1}{2} \frac{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{(mn[C])} \right)^2}{\left(\sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right)^2} \right] \quad (\text{A.13})$$

CALCULO DE I_2

$$I_2(\beta) = \left\{ \nu \iint_A \left((\nabla^2 u') - (\nabla^2 u')_0 \right) dzdy \right\}^{-1} \quad (\text{A.14})$$

$$I_2(\beta) = \left\{ \nu \iint_A \left(\left(\nabla^2 \frac{u}{Vem} \right) - \left(\nabla^2 \frac{u}{Vem} \right)_0 \right) dzdy \right\}^{-1} \quad (\text{A.15})$$

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 AB}{mn[C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2 AB}{mn[C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \quad (\text{A.18})$$

Para $z = y = 0$ então:

$$(\nabla^2 u)_0 = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_0 \quad (\text{A.19})$$

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)_0 = -\frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 AB}{mn[C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \quad (\text{A.20})$$

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_0 = -\frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2 AB}{mn[C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \left(\left(\frac{m\pi}{2a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2b} \right)^2 \right) AB}{mn[C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \quad (\text{A.22})$$

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)_0 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_0 = -\frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \left(\left(\frac{m\pi}{2a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2b} \right)^2 \right)}{mn[C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \left((m)^2 + (n\gamma)^2 + \left(\frac{2\beta\alpha}{\pi} \right)^2 - \left(\frac{2\beta\alpha}{\pi} \right)^2 \right) AB}{\left(\frac{2a}{\pi} \right)^2 mn[C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \quad (\text{A.24})$$

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)_0 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_0 = -\frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1} \left((m)^2 + (n\gamma)^2 + \left(\frac{2\beta\alpha}{\pi} \right)^2 - \left(\frac{2\beta\alpha}{\pi} \right)^2 \right)}{\left(\frac{2a}{\pi} \right)^2 mn[C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \quad (\text{A.25})$$

Resolvendo a Integral:

Limite superior: $z = a$ $y = b$

Limite inferior $z = 0$ $y = 0$

$$\iint_A \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{\pi^2 b}{4 a} \left[\frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} - \left(\frac{2\beta a}{\pi} \right)^2 \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \right] \quad (\text{A.26})$$

$$\iint_A \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{\pi^2 b}{4 a} \left[\frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} - \left(\frac{2\beta a}{\pi} \right)^2 \right] \quad (\text{A.27})$$

$$\iint_A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_0 = -\frac{\pi^2 b}{4 a} \left[\frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} - \left(\frac{2\beta a}{\pi} \right)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn [C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \right] \quad (\text{A.28})$$

A equação fica:

$$I_2(\beta) = \left\{ v\beta^2 ab \left[1 - \frac{\pi^2}{4} \frac{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn [C]} \right\}}{\left\{ \sum_{m,n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{m^2 n^2 [C]} \right\}} \right] \right\}^{-1} \quad (\text{A.29})$$

X esta adimensionalizado

$$\frac{x}{\text{Re} D_c} = \int_{b=\infty}^b \frac{I_2 d(I_1)}{\text{Re} D_c} \quad (\text{A.30})$$

em que:

$$\text{Re} = D_c v_{em} / v \quad (\text{A.31})$$

$$D_c = 4((2a)(2b)/2(2a+2b)) = 4ab/(a+b) \quad (\text{A.32})$$

Onde :

$$A = \cos\left(\frac{m\pi z}{2a}\right) \quad B = \cos\left(\frac{n\pi y}{2a}\right) \quad C = m^2 + n^2 \gamma^2 \left(\frac{2\beta a}{\pi}\right)^2$$

```

Program MODIFI1;
{Sn+,e+}
Uses crt;
Const

pi=3.141592654;

VAR

Beta,I1,I2,H,M, F4           :array[1..200] of extended;
I,NB,J                       :integer;
F1,F5,F3,Baux,a,b,gama,De,visc,U,Vsc,erro :extended;
Ad                            :text;
nome                          :string [7];

Procedure CalculoF1(baux:extended);
VAR

f11,f12,f22,f21,terro,serro  :extended;
m,n                          :longint;

Begin
  m:=1;
  f11:=0;
  serro:=1;
  While serro > 0.0000005 do
  Begin
    n:=1;
    f21:=0;
    terro:=1;
    While terro > 0.0000005 do
    Begin
      f22 := f21 + sqrt(1/((M*N*1.0)*(sqrt(M*1.0) +
        sqrt(N*1.0*gama)+sqrt((2*baux*a/pi)))));
      terro:=abs((f22-f21)/f22)*100;
      f21:=f22;
      n:=n+2;
    end;
    f12:=f11 + f21;
    serro:= abs((f12-f11)/f12);
    f11:=f12;
    m:=m+2;
  end;
  f1:= f11;
end;

Procedure CalculoF2(baux:extended);

VAR
serro,terro,f12,f11,f21,f22  : extended;
m,n                          : longint;
Sinal,Zinal                  : Integer;

Begin
  m:=1;
  f11:=0;
  serro:=1;
  zinal:= 1;
  While serro > 0.0000005 do

  Begin
    n:=1;
    f21:=0;
    terro:=1;
    sinal:=1;
    While terro > 0.0000005 do

    Begin

      f22 := f21 + zinal*sinal/((M*N*1.0) * (sqrt(M*1.0) + sqrt(N*1.0*gama) +
        sqrt((2*baux*a/pi)))));
      terro:=abs((f22-f21)/(f22))*100;

```

```

f21:=f22;
sinal:=-1*sinal;
n:=n+2;

end;

f12:=f11 + f21;
serro:= abs((f12-f11)/(f12));
f11:=f12;
zinal:=-1*zinal;
m:=m+2;

end;

f5:=1*f11;

end;

Procedure calculoF3(baux:extended);

VAR
f11,f12,f22,f21,terro,serro      :extended;
m,n                             :longint;

Begin
m:=1;
f11:=0;
serro:=1;
While serro > 0.0000005 do

Begin
n:=1;
f21:=0;
terro:=1;
While terro > 0.0000005 do

Begin

f22 := f21 +(1/(sqr(M*N*1.0)*(sqr(M*1.0)+
sqr(N*1.0*gama)+sqr((2*baux*a/pi)))));
terro:=abs((f22-f21)/(f22))*100;
f21:=f22;
n:=n+2;

end;

f12:=f11 + f21;
serro:= abs((f12-f11)/(f12));
f11:=f12;
m:=m+2;

end;

f3:= 1*f11;

end;

{*****PROGRAMA PRINCIPAL*****}

BEGIN
write(' arquivo de saida ');
readln(nome);
Assign(ad,nome+'.dat');
rewrite(ad);
Clrscr;
write(' entre com a altura do sedimentador "a" em m = ');
readln(a);
write(' entre com a largura do sedimentador "b" em m = ');
readln(b);
write(' entre com a viscosidade "Visc" em m^2/s = ');
readln(visc);
write(' entre com a velocidade media "U" em m/s = ');

```

```

readln(U);
write(' entre com a velocidade de sedimentação: Eo "Vsc" em m/s = ');

readln(Vsc);
write(' entre com erro = ');
readln(erro);
gama:=a/b;
De:=(4*a*b*(2*a+2*b)/(2*a+2*b+2*a+2*b));
write('entre com o numero de betas=');
readln(NB);
For I:=2 to NB do
  Begin
    write(' entre com beta[I,I]=');
    readln(beta[I]);
    baux:=beta[I]/a;
    CalculoF1(baux);
    CalculoF2(baux);
    calculoF3(baux);
    I2[I]:=1/(sqr(baux)*sqr(De)*(1-(0.25*sqr(pi))*(F5/F3)));
    I1[I]:=(sqr(sqr(pi)*0.25))*((0.25*F1/sqr(F3)-(0.5 * sqr(F5)/sqr(F3))))

    end;
  { Calculo de X/ReDe}
  Begin
    I1[1]:=0.5;
    For I:=2 to Nb do
      begin
        H[I]:=(I2[I] + I2[I-1])/2;
        end;
      I2[1]:=0;
      For I:=2 to Nb do
        begin
          M[I]:= I1[I] -I1[I-1];
          end;
          F4[1]:=0;
          For I:=2 to Nb do
            begin
              F4[I]:=F4[I-1] + H[I]*M[I];
            end;
          end;
        { SAIDA DOS RESULTADOS}
      WriteLn(ad,a,b,U,vsc,visc,erro,nb-1:4);

      For I:=2 to Nb do
        Begin
          writeln(ad,beta[I],F4[I]);
          end ;
        close (ad)
      END.

```

```

program sedimentacao_tridimensional;
{$N+,E+}

Const
pi = 3.141593;

Var
I,NB,j      : Integer;
a,b,U,Vsc,Visc,erro : extended;
X,Y,delta z,Z1,Za,Baux,gama,Xant,Z,I,delta Y,
VI,VII,VIII,VIII,Vm,t,tempo : extended;
Angulo,Ang  : real;
AD,AR      : Text;
Beta,F4    : array[1..200] of extended;
nome       : string[7];
F2        : extended;

Function Cosh(arg:extended):extended;
Begin
  Cosh := (exp(arg) + exp(-arg)) / 2;
End;

Function Tanh(arg:extended):extended;
Begin
  Tanh := (exp(arg)-exp(-arg)) / (exp(arg) + exp(-arg));
End;

{ Funcao potenciacao }

function pot(base,expoe:extended):extended;

var expint, exppar : boolean;
    aux           : extended;

begin
  if(abs(base) < 0.00000001)
  then
  begin
    if(abs(expoe) < 0.000000001)
    then
      pot := 1.0
    else
      pot := 0;
    end
  else
  begin
    aux:=trunc(expoe)*1.0;
    aux:=expoe - aux;
    if(aux < 0.000000001)
    then
      expint := true
    else
      expint := false;
      aux := trunc(expoe/2);
      aux :=expoe/2 -aux;
      if (aux < 0.000000001)
      then
        exppar := true
      else
        exppar :=false;
        if (expint)
        then
          begin
            if (exppar)
            then
              pot := exp(trunc(expoe)*ln(abs(base)))
            else
              pot :=(base/abs(base))*exp(trunc(expoe)*ln(abs(base)));
            end
          end
        else
          pot := exp(expoe*ln(base));
        end
  end
end

```

```

end;
end;

Procedure CalculoF2(Baux:extended);

Var
  N      : Integer;

Begin
  N := 1;
  F2 := 0;
  While N <= 180 do
  Begin
    if (gama < 0.02) or (n < 100)
    then
    begin
      F2 := F2 + 32/(Pot(pi,4)*Sqr(N)*(Sqr(N)+Sqr(2*Baux*a/pi)))*
        tanh(pi/(2*gama)*Sqr(Sqr(N)+Sqr(2*Baux*a/pi)))/
        (pi/(2*gama)*Sqr(Sqr(N)+Sqr(2*Baux*a/pi)));
    end;
    N:= N+2;
  End;
  F2 := F2 + 1/Sqr(Baux*a)*(Tanh(Baux*a)/(Baux*a)-1);
End;

```

```

Function F3(Baux,Z,Y:extended):extended;

Var
  F1      : extended;
  N,Sinal : Integer;

Begin
  N := 1;
  F1 := 0;
  Sinal := 1;
  While N <= 180 do
  Begin
    if (gama < 0.02) or (n < 100)
    then
    begin
      F1 := F1 + (16*Sinal*cos(N*pi*Z/(2*a)))/
        (Pot(pi,3)*N*(Sqr(N)+Sqr(2*Baux*a/pi))*
        (cosh(pi/(2*gama)*Sqr(Sqr(N)+Sqr(2*Baux*a/pi))*Y/b)/
        (cosh(pi/(2*gama)*Sqr(Sqr(N)+Sqr(2*Baux*a/pi))));
      Sinal:=-1*Sinal;
    end;
    N:= N+2;
  End;
  F1 := F1 + 1/Sqr(Baux*a)*(Cosh(Baux*Z)/Cosh(Baux*a)-1);
  CalculoF2(Baux);
  F3 := F1/F2;
End;

```

```

Function Velocidade(I:Integer;Z,Y:extended):extended;

```

```

Begin
  If I=0
  Then
    Velocidade:=U
  Else
    Velocidade:=U*F3(Beta[I],Z,Y);
End;

```

```

Procedure CalculoX;

```

```

Var
  Dc,Re   : extended;

```

```

Begin
  Dc:=4*2*a*2*b/(2*(2*a+2*b));
  Re:=U*Dc/Visc;

```



```

X:=F4[I]*Dc*Re;
End;

Begin
Write('Arquivo de entrada = ');
readln(nome);
assign (AD,nome + '.Dat');
Write('Arquivo de saida = ');
readln(nome);
Assign(AR,nome + '.res');
Reset(AD);
Rewrite(AR);
readln(ad,a,b,U,Vsc,Visc,erro,NB);
Write('entre com o angulo do sedimentador em Graus= ');
readln (angulo);
Ang:=(2*Pi*angulo/360);
For I:=1 to NB do
begin
  Readln(AD,Beta[I],F4[I]);
  Beta[I]:=Beta[I]/a;
end;
deltaZ:=0;
Y:=0;
Xant := 0;
gama := a/b;
Tempo:=0;
for j:=0 to 20 do
begin
  Z:=J*a/20;
  writeln(ar,b:7:4,' ',2*z:7:4,' ',0);
  end;
for j:=0 to 16 do
begin
  Za := 0.05*2*a;
  deltaZ:=0;
  Xant := 0;
  tempo:=0;
  Y:=J*b/20;
  writeln(ar,y:7:4,' ',2*a:7:4,' ',0,' ',0);
  I:=1;
  While I <= nb do

    Begin
      CalculoX;
      Repeat
        Z1:=Za;
        Z:=(2*a-deltaZ)-a;
        If 7=2*a then begin
          VII:=0
          end
        else begin
          VII:= Velocidade(I-1,Z,Y) ;
          end;
        Z:=(2*a-deltaZ-Z1)-a; VI := Velocidade(I-1,Z,Y);
        7:=(2*a-deltaZ)-a;
        if Z=2*a then begin
          VIII:=0
          end
        else begin
          VIII:=Velocidade(I,Z,Y);
          end;
        7:=(2*a-deltaZ-Z1)-a; VII :=Velocidade(I,Z,Y);
        Vm :=(VII+VI+VIII+VII)/4;
        L:=X-Xant;
        t:= L/(Vm-Vsc*sin(ang));
        Za :=Vsc*cos (ang)*t;
        Until Abs(Za-Z1) < erro;
        I:=I+1;
        deltaZ := deltaZ + Z1; Xant:=X; Z:= 2*a-deltaZ; Tempo:=Tempo+t;
        writeln(ar,y:7:4,' ',Z:7:4,' ',X:7:4,' ',tempo:7:2);
        If abs(deltaZ - 2*a) < 0.005 then
          I:=nb+1;
        end;
end;

```

```
Z:=0; X:=Xant; Tempo:=tempo;  
writeln(ar,y:7:4, 'Z:7:4,' 'X:7:4,' 'tempo:7:2);  
end;
```

```
Close(AR);  
Close(AD);  
End.
```

```

program seddesenv;
{$N+,E+}
uses crt;
Const
pi = 3.1415926536;

```

```

Var

```

```

a,b,Vsc,Zaux,U,erro,Yaux      : extended;
F1,F2,F3                       : extended;
Angulo,ang                     : real;
I,J,N                          : Integer;
Sinal                          : Integer;
Y,Zo,X                         : array[1..20] of extended;
Lr,L                           : array[1..20,1..20] of extended;
Ad                             : text;
nome                           : string [7];

```

```

Function Cosh(arg:extended):extended;

```

```

Begin

```

```

  Cosh := (exp(arg) + exp(-arg)) / 2;

```

```

End;

```

```

Function Sinh(arg:extended):extended;

```

```

Begin

```

```

  Sinh := (exp(arg)- exp(-arg))/2;

```

```

End;

```

```

{ Funcao potenciacao }

```

```

function pot(base,expoe:extended):extended;

```

```

begin

```

```

  pot:= exp(expoe*ln(base));

```

```

end;

```

```

Procedure CalculoF1(Zaux,Yaux:extended);

```

```

Var

```

```

F21,F22,erro                  :extended;

```

```

M                             :longint;

```

```

Begin

```

```

  F21:= 0;

```

```

  M:=1;

```

```

  erro:=1;

```

```

  while erro > 0.000000001 do

```

```

  Begin

```

```

    F22 := F21 + (((2*(pot(b,3)))/(a*pot(M,5)*pot(pi,5)))*(sqrt(cos(M*pi)-1))*((sinh((M*pi*a)/(b)))-
      ((sqrt(cosh(M*pi*a/b)-1))/(sinh(M*pi*a/b))));

```

```

    erro:= ((F22-F21)/F22);

```

```

    F21:=F22;

```

```

    M:=M+2;

```

```

  end;

```

```

  F1 :=(b/12)*(-b)+F21;

```

```

end;

```

```

Procedure CalculoF2(Zaux,Yaux:extended);

```

```

Var

```

```

F11,F12,erro                  :extended;

```

```

M                             :longint;

```

```

Begin

```

```

F11:=0;
M:=1;
erro:=1;
while erro > 0.000000001 do
Begin
F12:= F11+(((2*(pot(b,3))/(a*(pot(M,4)*pot(pi,4))))*(cos(M*pi)-
1)*sin(M*pi*a*yaux/b))*((sinh((M*pi*a*Zaux)/(b))-
(((cosh(M*pi*a/b))-1)*((cosh(m*pi*a*Zaux/b)-1)))/(sinh(M*pi*a/b))));
erro:=abs((F12-F11)/F12);
F11:=F12;
M:=M+2;
End;
F2:= ((a*Yaux/2)*(a*Yaux-b)*(Zaux))-F11;
end;

```

```

Begin
write(' arquivo de saida ');
readln(nome);
Assign(ad,nome+ '.dat');
rewrite(ad);
Clrscr;
Write(' entre com a altura do sedimentador "2a" em m = ');
readln(a);
Write(' entre com a largura do sedimentador "2b" em m = ');
readln(b);
Write(' entre com a velocidade de sedimentação "Vsc" em m/s = ');
readln(Vsc);
Write(' entre com a velocidade media "U" em m/s = ');
readln(U);
Write(' entre com o angulo do sedimentador em graus = ');
readln(Angulo);
Ang:= (angulo * pi)/180;
Write(' entre com o numero de entrada de particulas= ');
readln(N);
For I:=1 to N do
Begin
Write(' entre com Y[I,]= ');
readln(Y[I]);
Write(' entre com X[I,]= ');
readln(X[I]);
Write(' entre com Zo[I,]= ');
readln(Zo[I]);
Yaux:=Y[I]/a;
For J:=1 to 10 do
Begin
Zaux:= (J*Zo[I]*0.1)/a;
CalculoF1(Zaux,Yaux);
CalculoF2(Zaux,Yaux);
L[L,J]:=a*(((F2/F1)*U)/Vsc)-(sin(ang)*(Zaux))/(cos(ang));
end;
end;

```

{ SAIDA DOS RESULTADOS }

```
Writeln(ad,a,b,U,vsc,angulo,N:3);
```

```

For I:=1 to N do
Begin
Lr[L,10]:= X[I] + L[L,10];
Writeln(ad, '0,' ,Y[I]:10:3, ' ,Lr[L,10]:10:4);
For J:=1 to 10 do
Begin

```

```
Lr[L,J]:= X[I] + L[L,10]-L[L,J];  
Writeln(ad,J*Zo[I]/10:10:4,' 'Y[I]:10:3,' 'Lr[L,J]:10:4);  
end;  
end;  
  
close (ad)  
END.
```

ANEXO B

Figura B.1	Figura B.2	Figura B.3	Figura B.4
Figura B.1	Figura B.2	Figura B.3	Figura B.4
Figura B.5	Figura B.6	Figura B.7	Figura B.8
Figura B.9	Figura B.10	Figura B.11	Figura B.12
Figura B.13	Figura B.14	Figura B.15	Figura B.16
Figura B.17	Figura B.18	Figura B.19	Figura B.20
Figura B.21	Figura B.22	Figura B.23	Figura B.24
Figura B.25	Figura B.26	Figura B.27	Figura B.28
Figura B.29	Figura B.30	Figura B.31	Figura B.32
Figura B.33	Figura B.34	Figura B.35	Figura B.36
Figura B.37	Figura B.38	Figura B.39	Figura B.40
Figura B.41	Figura B.42	Figura B.43	Figura B.44
Figura B.45	Figura B.46	Figura B.47	Figura B.48
Figura B.49	Figura B.50	Figura B.51	Figura B.52
Figura B.53	Figura B.54	Figura B.55	Figura B.56
Figura B.57	Figura B.58	Figura B.59	Figura B.60
Figura B.61	Figura B.62	Figura B.63	Figura B.64
Figura B.65	Figura B.66	Figura B.67	Figura B.68
Figura B.69	Figura B.70	Figura B.71	Figura B.72
Figura B.73	Figura B.74	Figura B.75	Figura B.76
Figura B.77	Figura B.78	Figura B.79	Figura B.80

Tabela B.1 – Descrição das Figuras do duto 5X5 cm²

Velocidade sedimentação cm/min	Velocidade escoamento cm/min	2,5 cm	1,5 cm	0,5 cm
(1) 2,24	30	Figura B.1	Figura B.2	Figura B.3
	25	Figura B.4	Figura B.5	Figura B.6
	20	Figura B.7	Figura B.8	Figura B.9
(2) 5,20	30	Figura B.10	Figura B.11	Figura B.12
	25	Figura B.13	Figura B.14	Figura B.15
	20	Figura B.16	Figura B.17	Figura B.18
(3) 3,32	30	Figura B.19	Figura B.20	Figura B.21
	25	Figura B.22	Figura B.23	Figura B.24
	20	Figura B.25	Figura B.26	Figura B.27
(4) 3,50	30	Figura B.28	Figura B.29	Figura B.30
	25	Figura B.31	Figura B.32	Figura B.33
	20	Figura B.34	Figura B.35	Figura B.36
(5) 2,72	30	Figura B.37	Figura B.38	Figura B.39
	25	Figura B.40	Figura B.41	Figura B.42
	20	Figura B.43	Figura B.44	Figura B.45
(6) 3,56	30	Figura B.46	Figura B.47	Figura B.48
	25	Figura B.49	Figura B.50	Figura B.51
	20	Figura B.52	Figura B.53	Figura B.54
(7) 4,52	30	Figura B.55	Figura B.56	Figura B.57
	25	Figura B.58	Figura B.59	Figura B.60
	20	Figura B.61	Figura B.62	Figura B.63
(8) 4,48	30	Figura B.64	Figura B.65	Figura B.66
	25	Figura B.67	Figura B.68	Figura B.69
	20	Figura B.70	Figura B.71	Figura B.72
(9) 3,93	30	Figura B.73	Figura B.74	Figura B.75
	25	Figura B.76	Figura B.77	Figura B.78
	20	Figura B.79	Figura B.80	Figura B.81

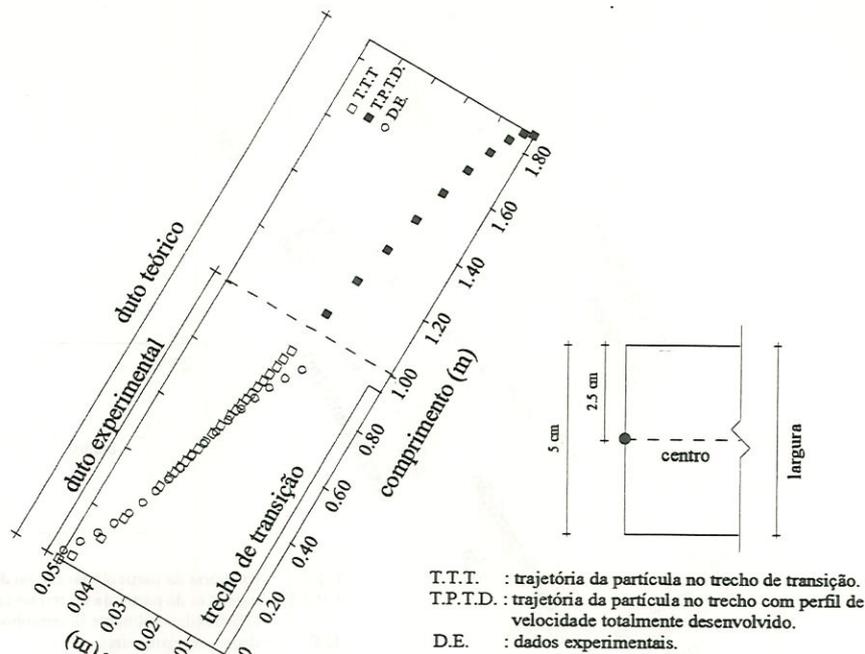


FIGURA B.1 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,93\text{ m}$
 $V_{em} = 30\text{ cm/min}$ $V_s = 2,24\text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

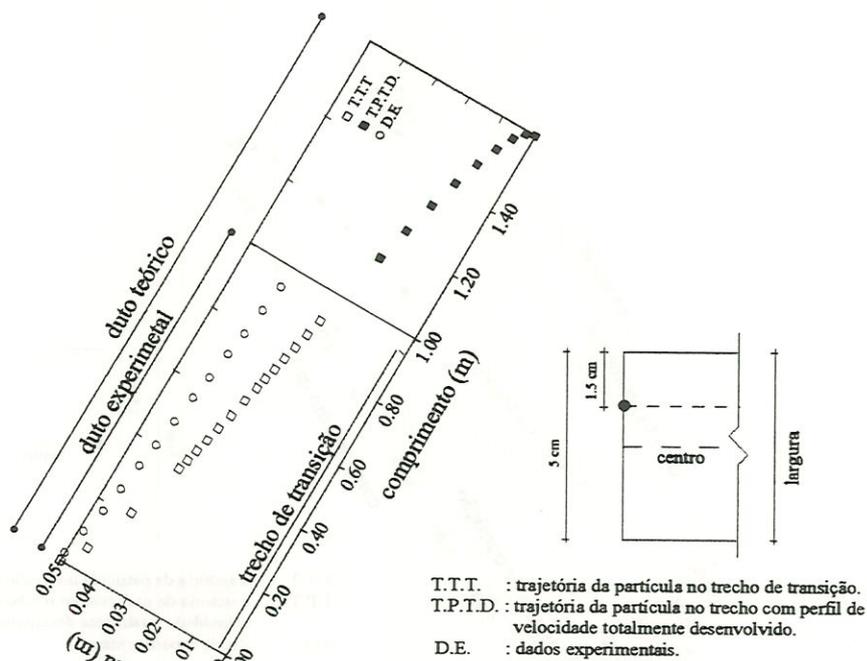


FIGURA B.2 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,93\text{ m}$
 $V_{em} = 30\text{ cm/min}$ $V_s = 2,24\text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

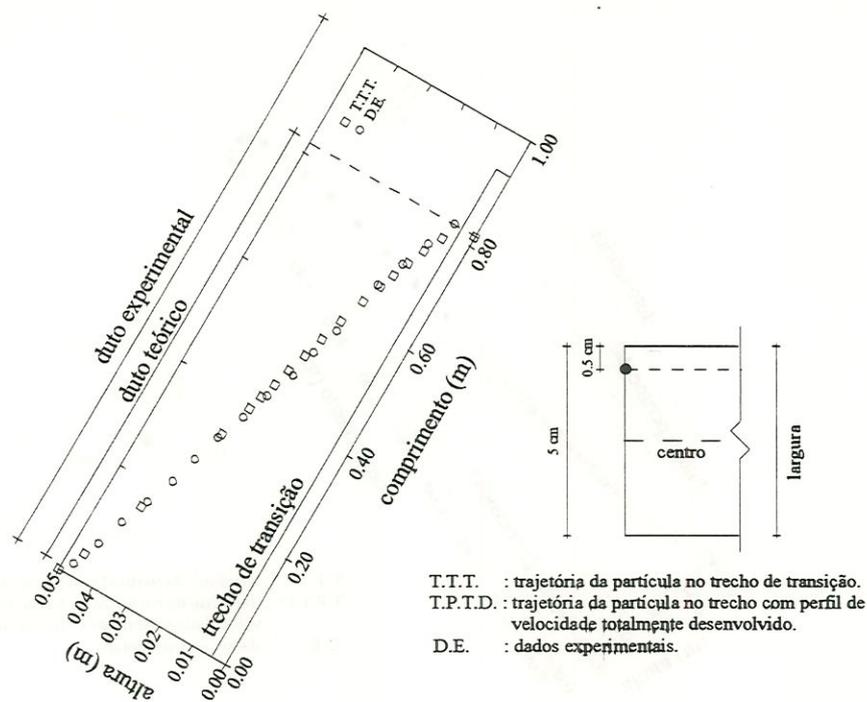


FIGURA B.3 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{cm} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

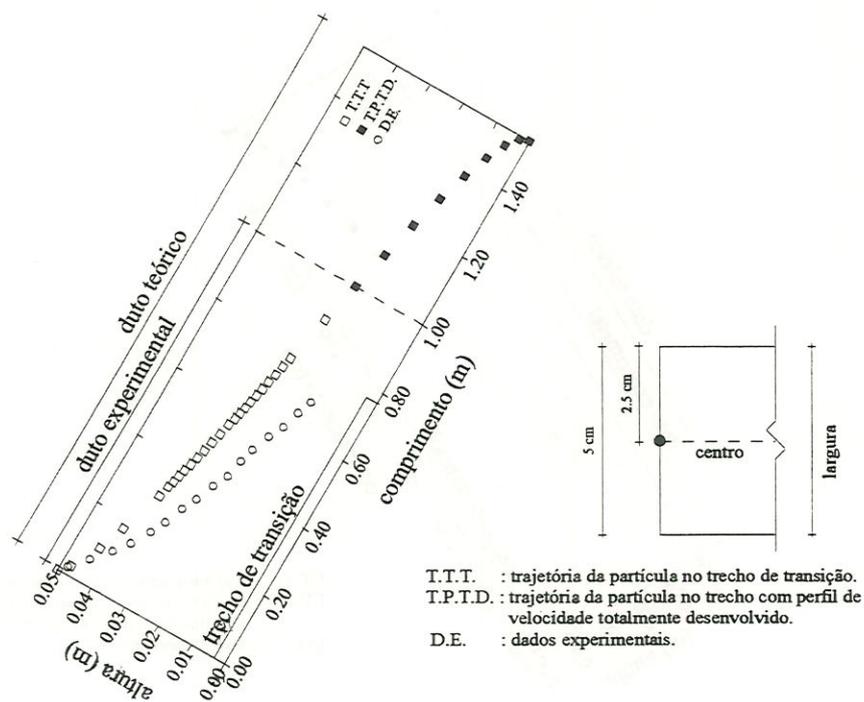


FIGURA B.4 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{cm} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

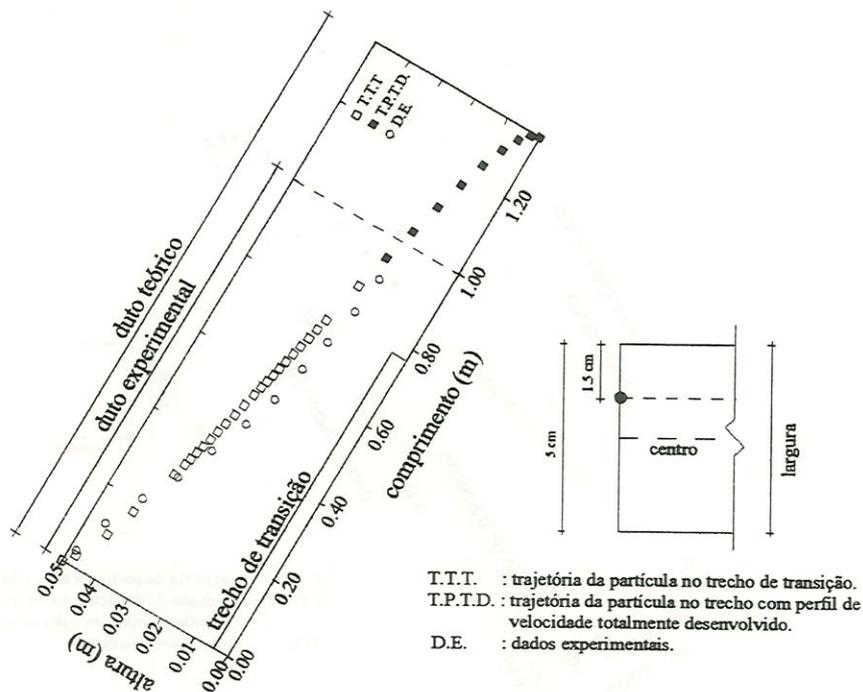


FIGURA B.5 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

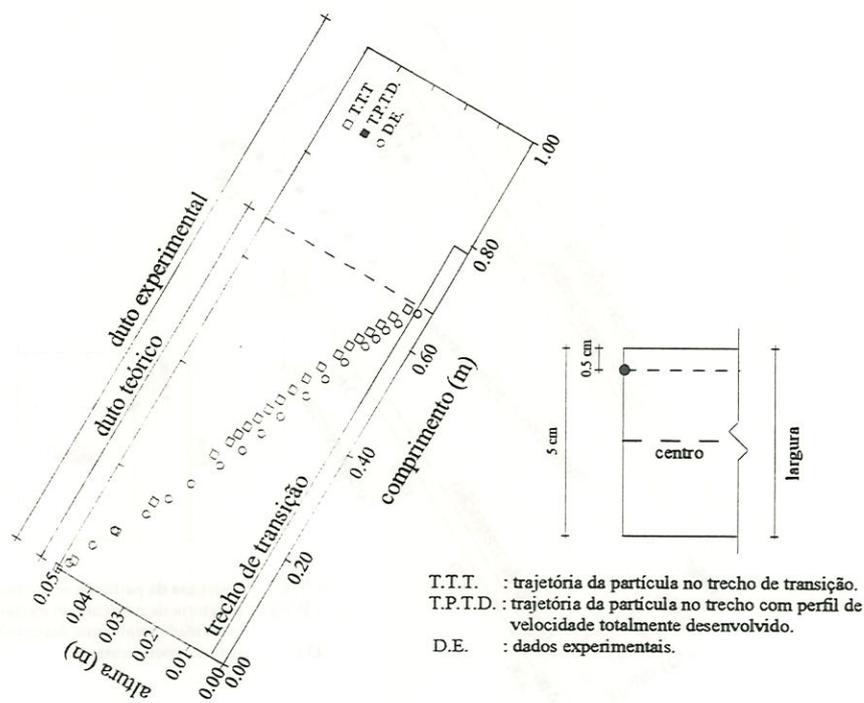


FIGURA B.6 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

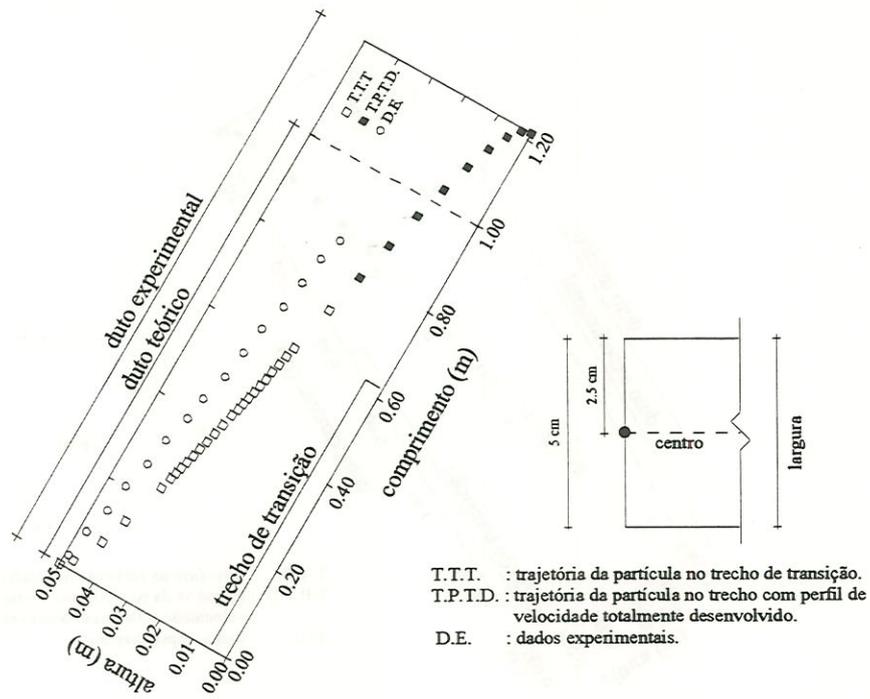


FIGURA B.7 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

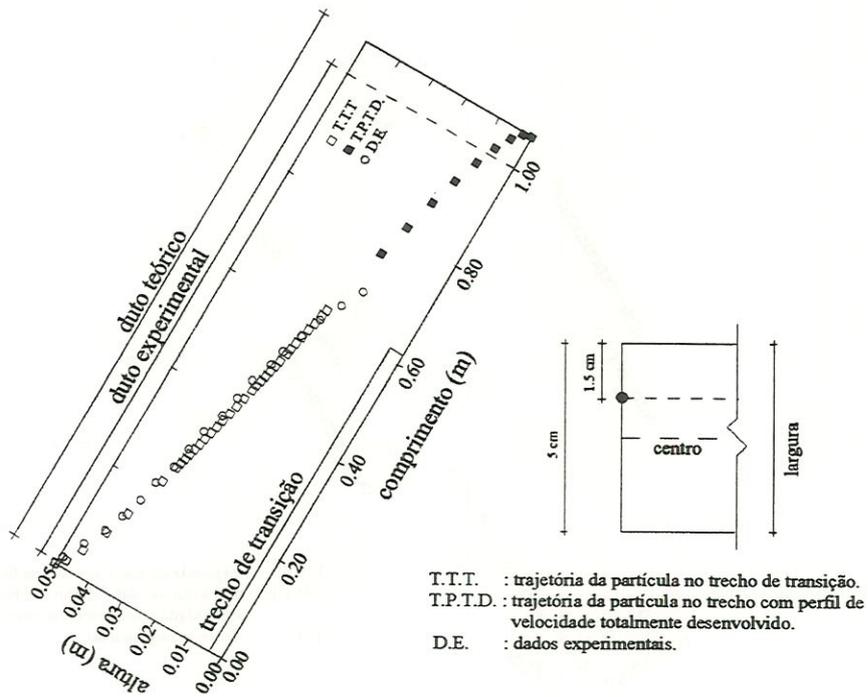


FIGURA B.8 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

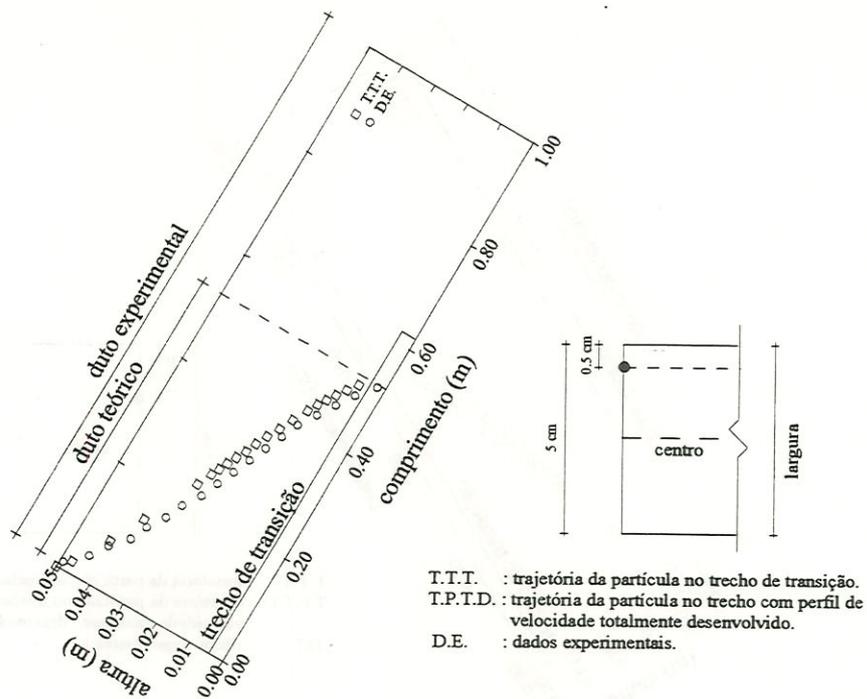


FIGURA B.9 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

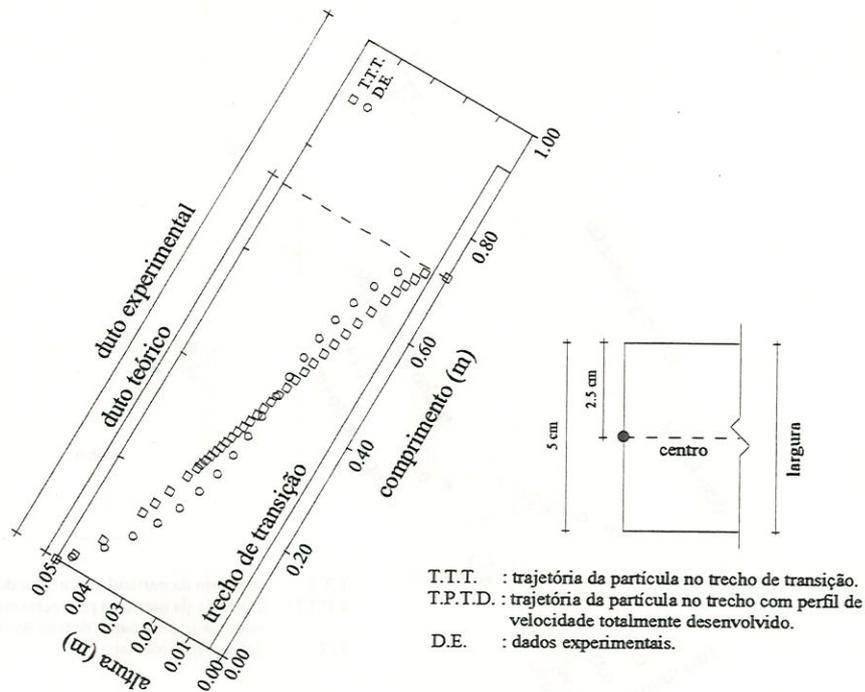


FIGURA B.10 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

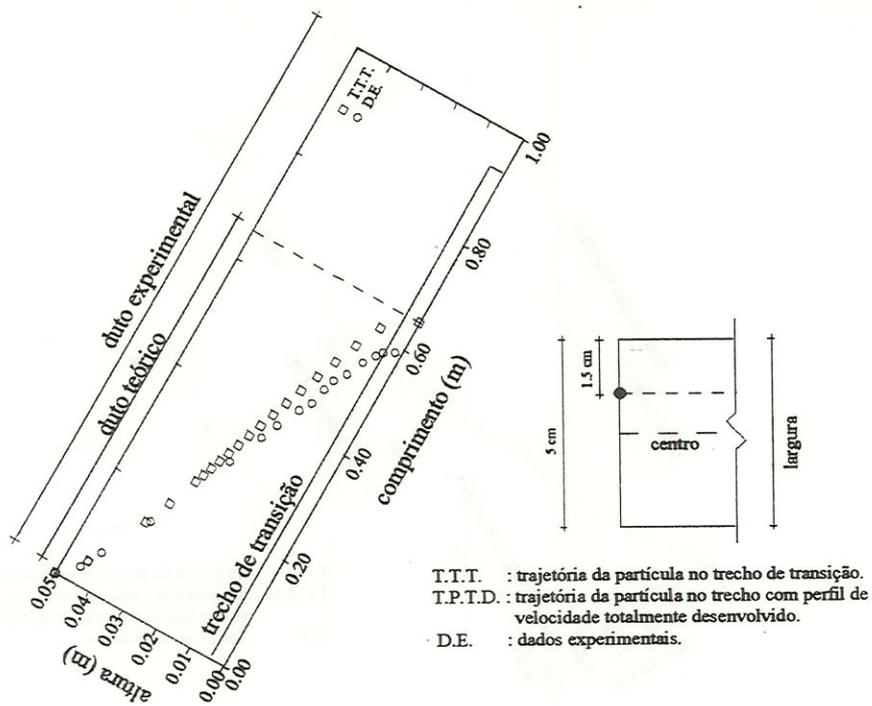


FIGURA B.11 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

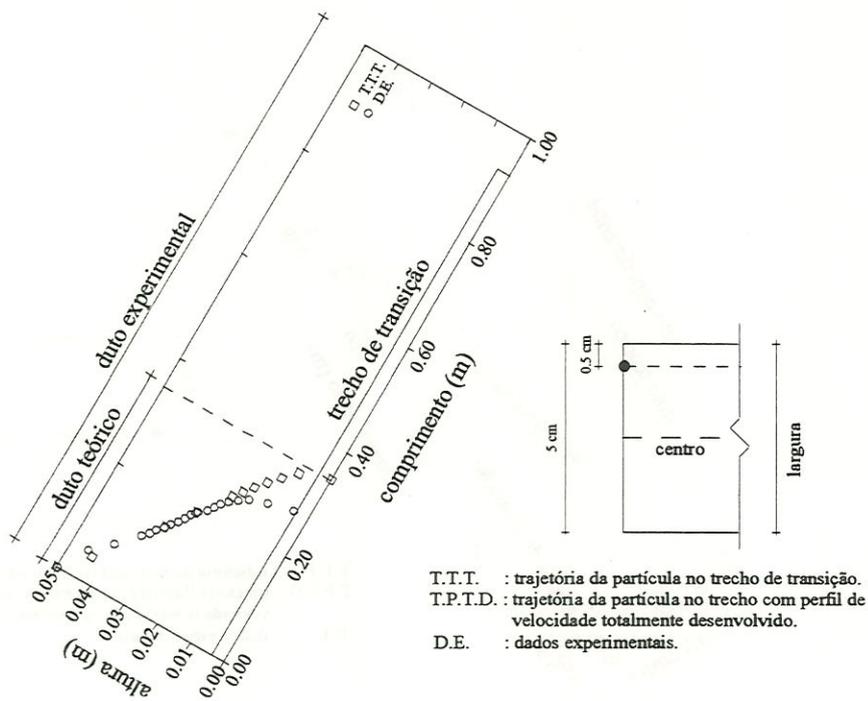


FIGURA B.12 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

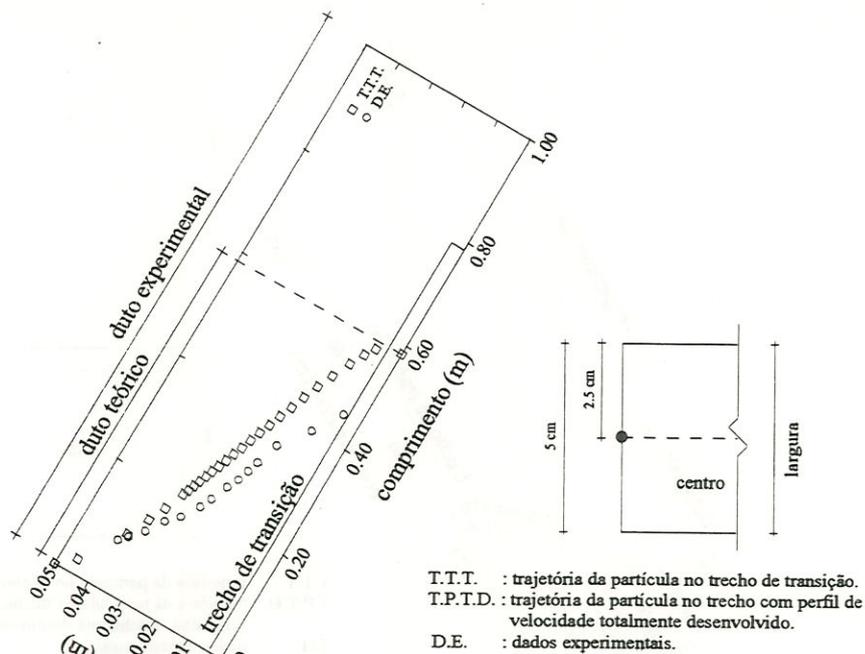


FIGURA B.13 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

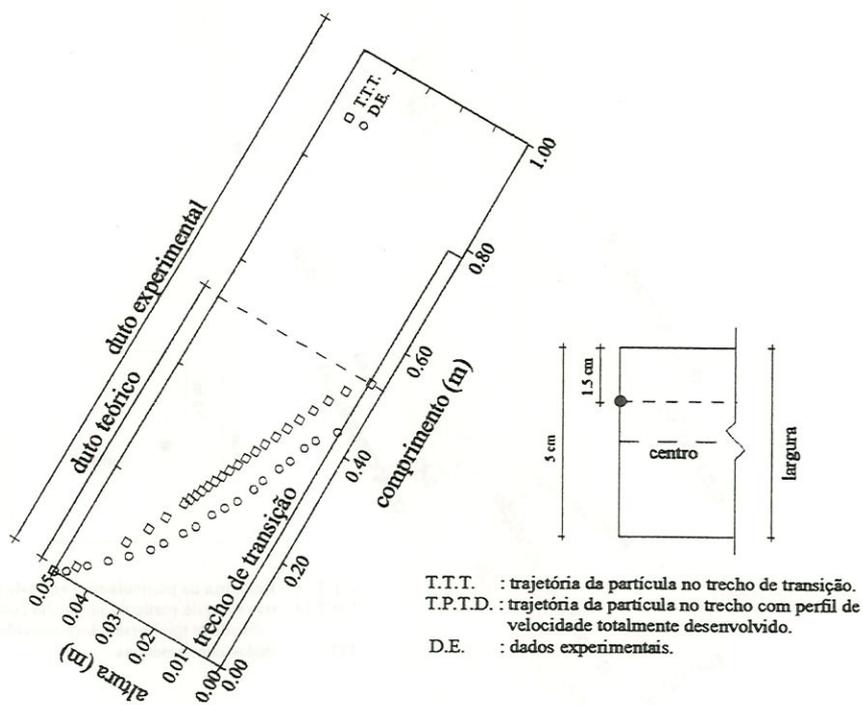


FIGURA B.14 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

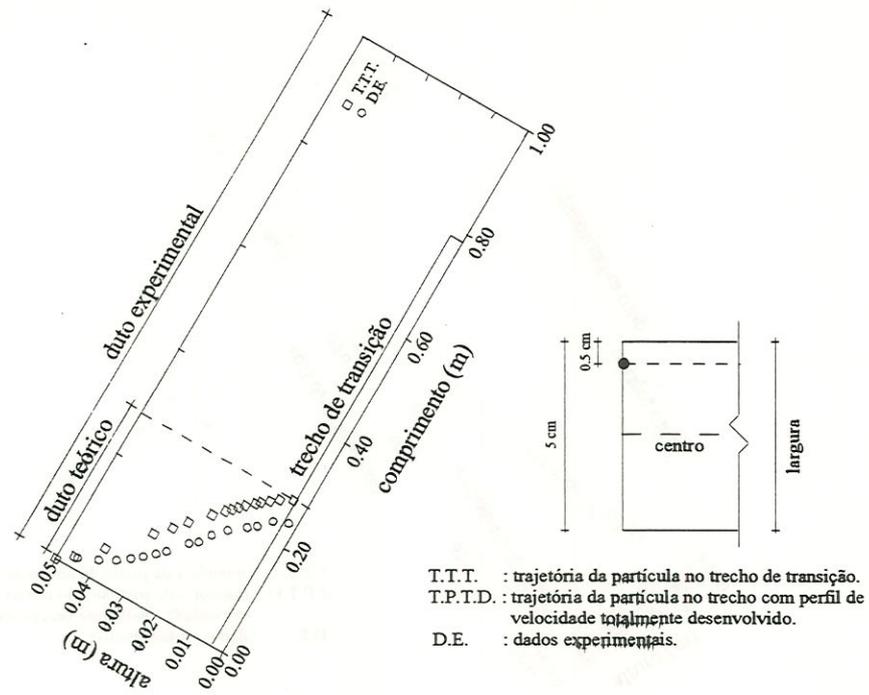


FIGURA B.15 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

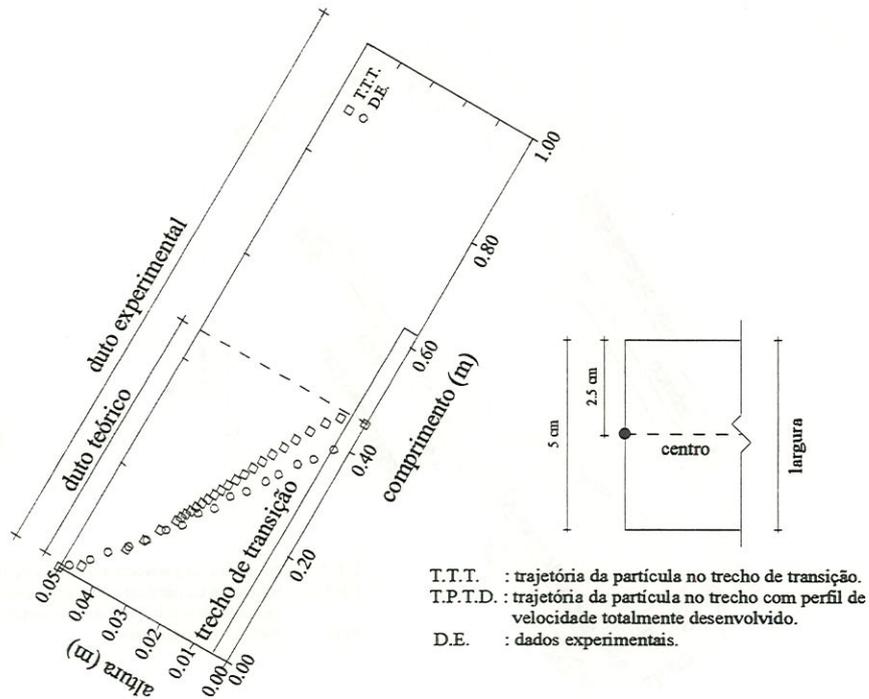


FIGURA B.16 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

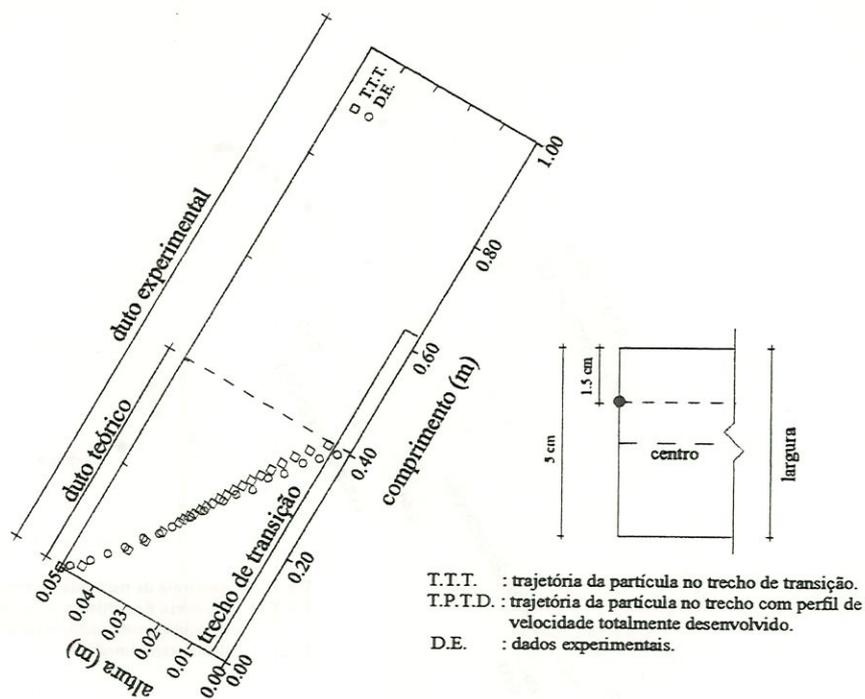


FIGURA B.17 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

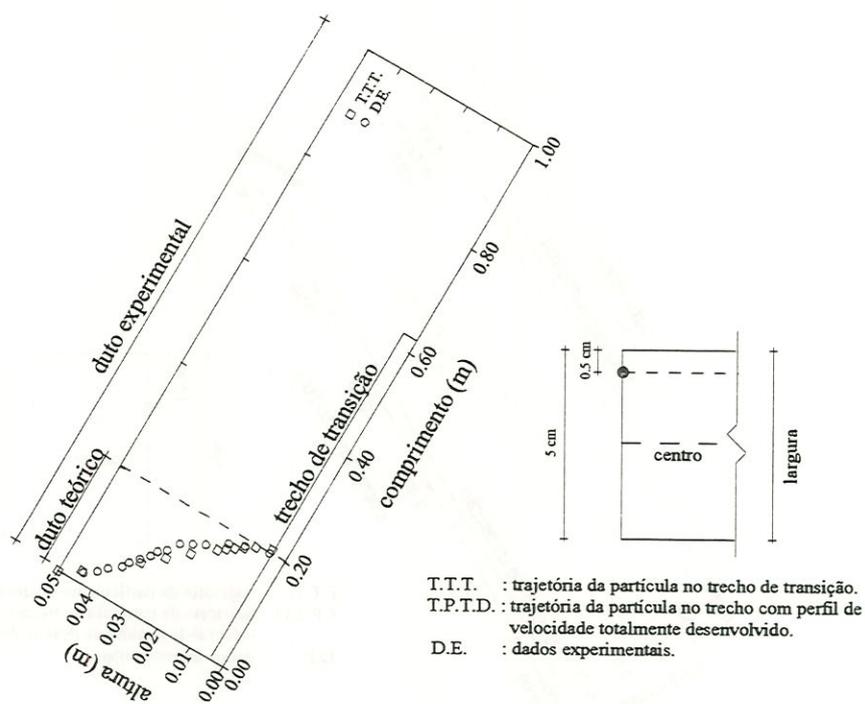


FIGURA B.18 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

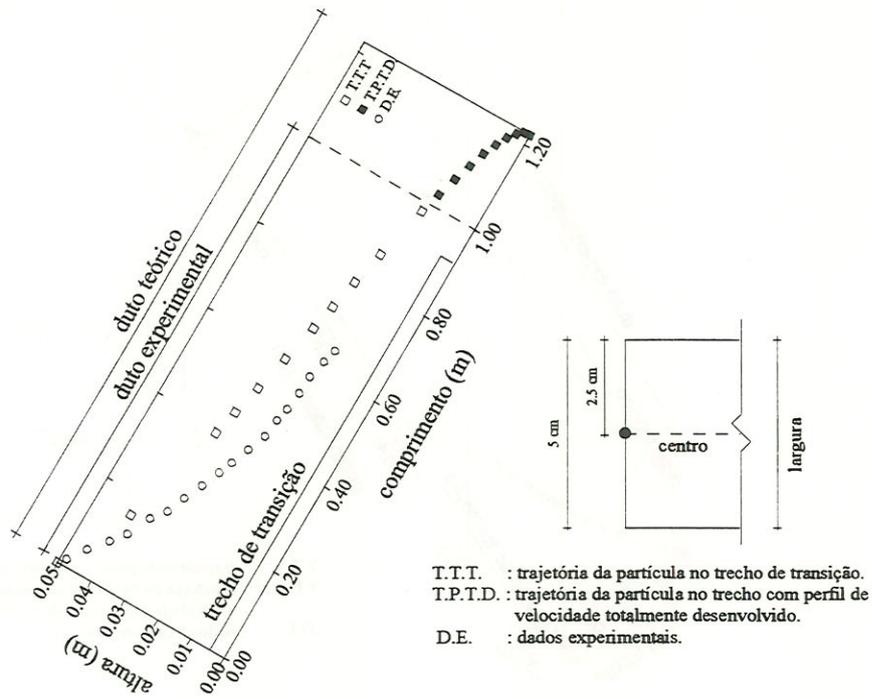


FIGURA B.19 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

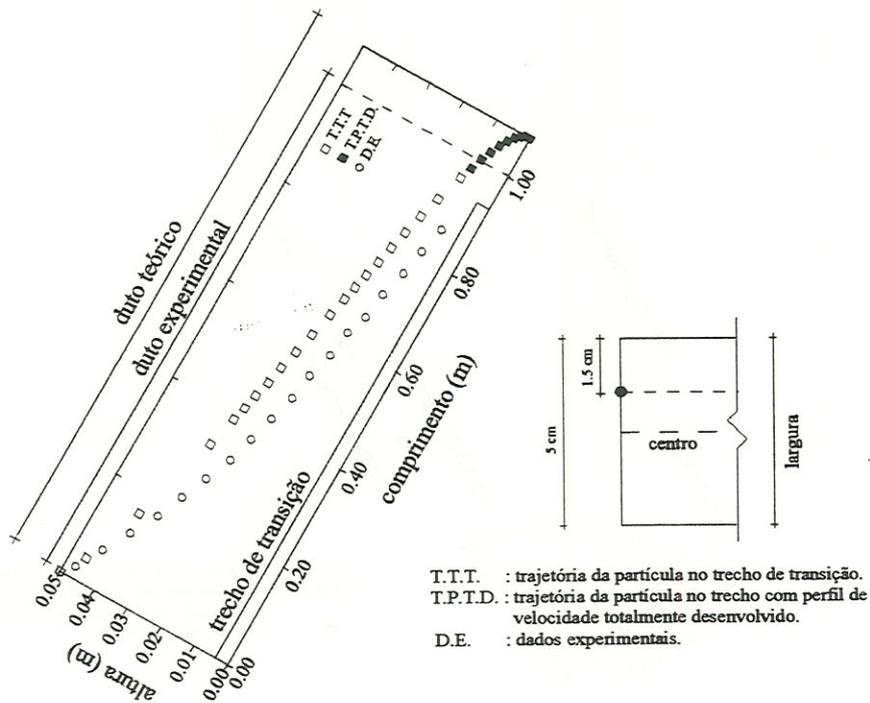


FIGURA B.20 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

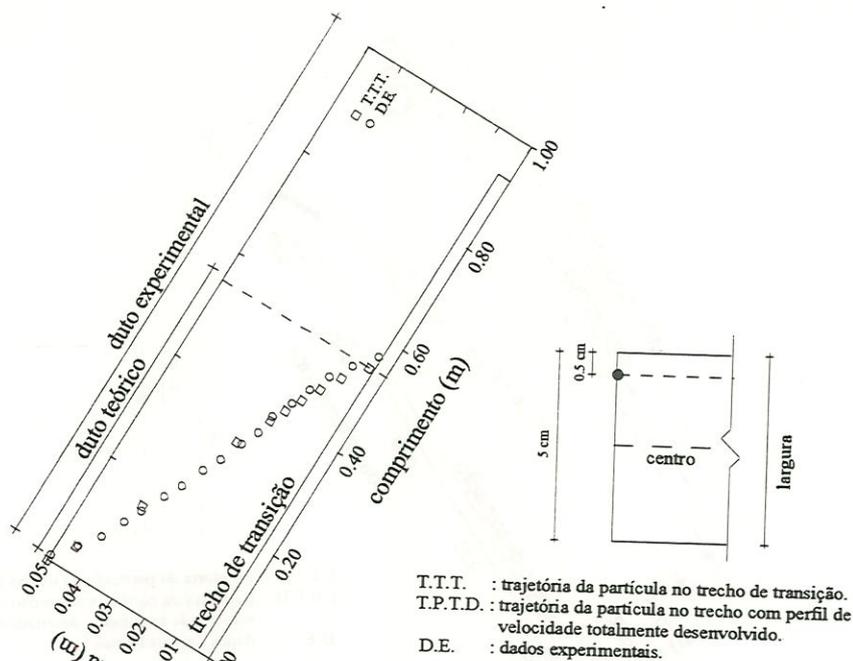


FIGURA B.21 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

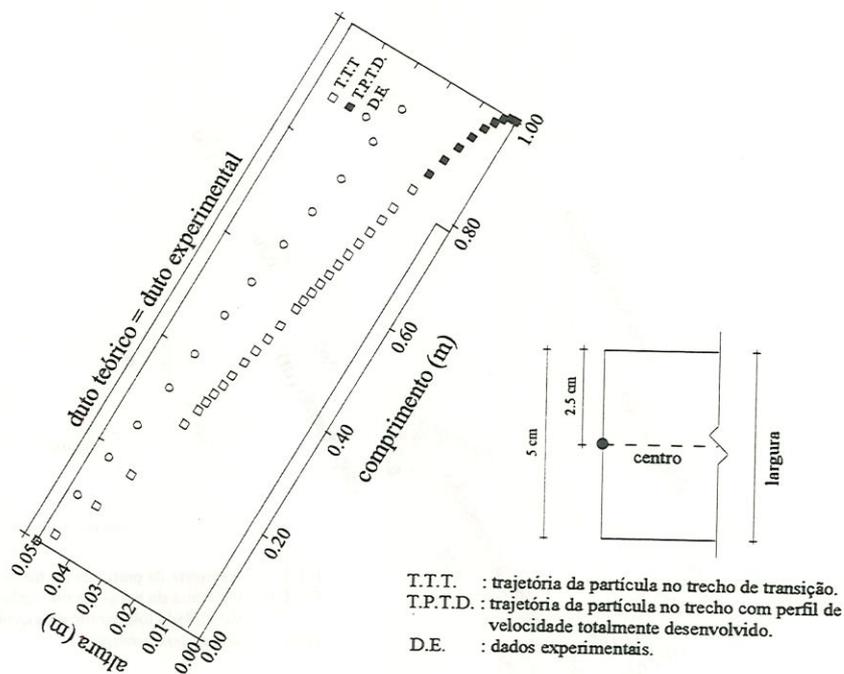


FIGURA B.22 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

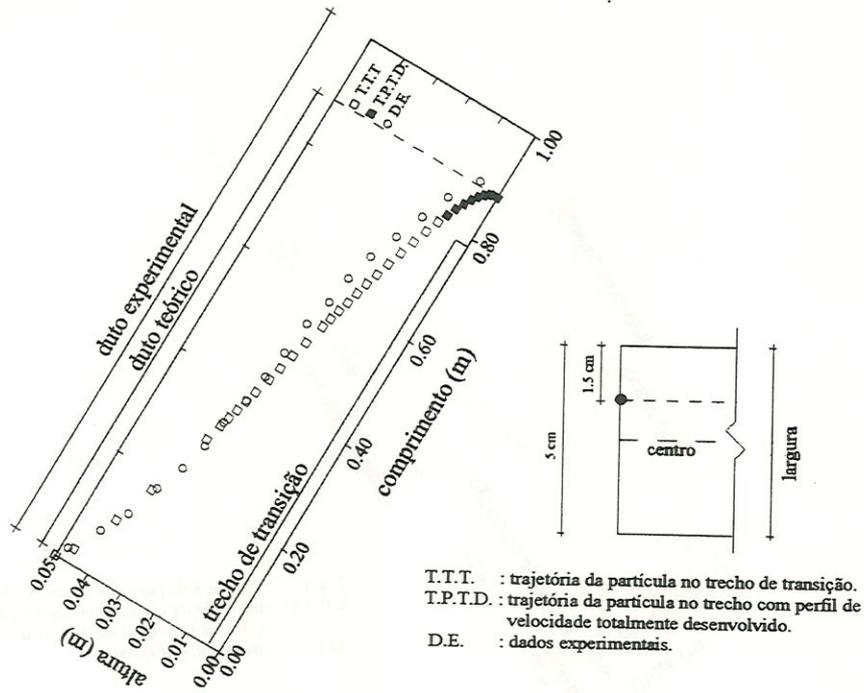


FIGURA B.23 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

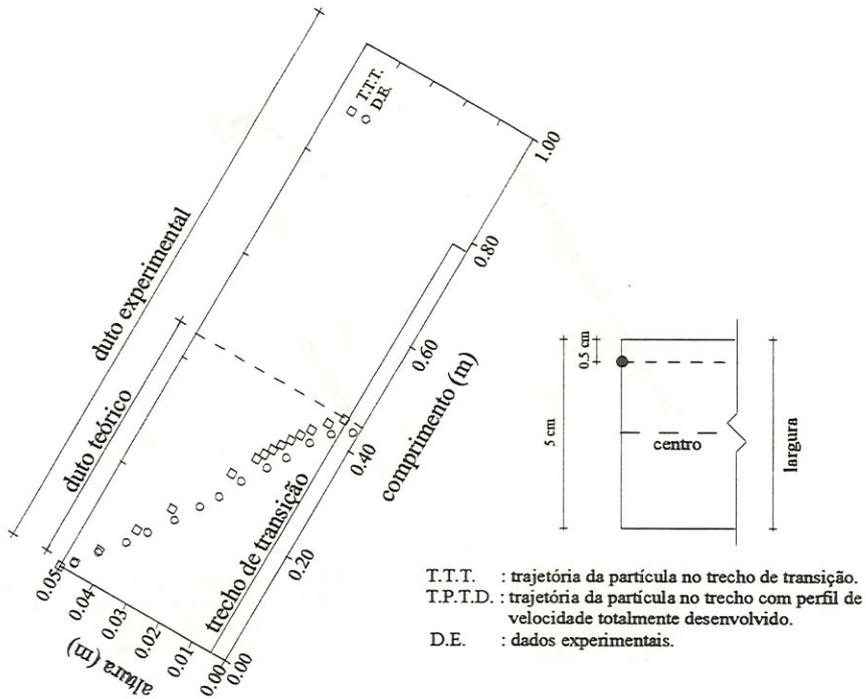


FIGURA B.24 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

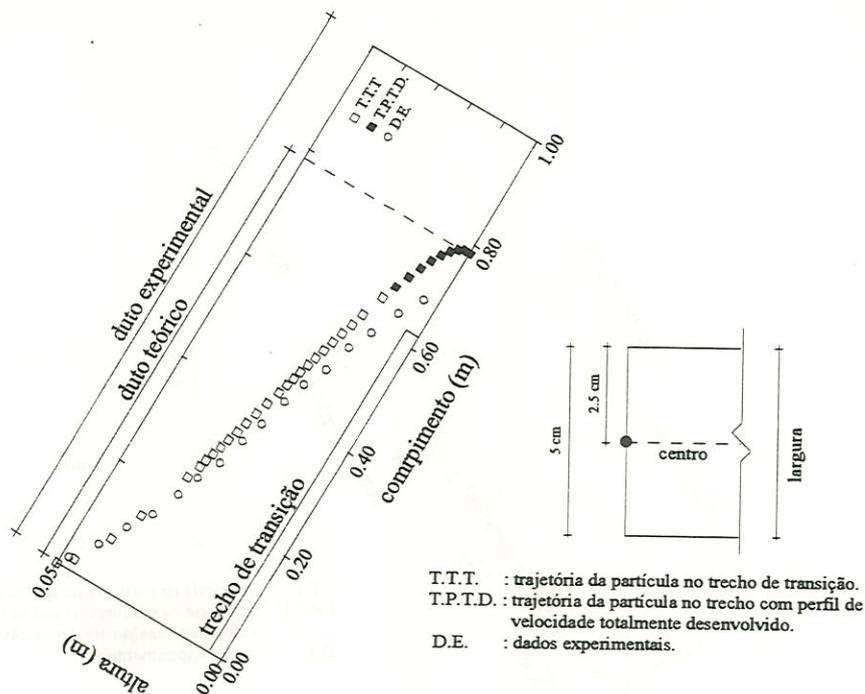


FIGURA B.25 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,62\text{ m}$
 $V_{em} = 20\text{ cm/min}$ $V_s = 3,32\text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

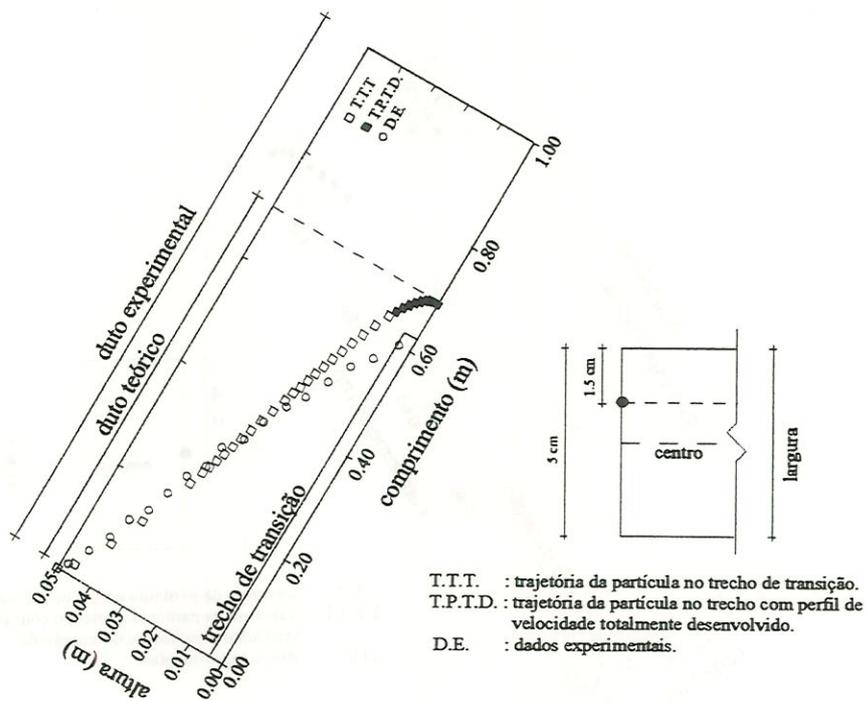


FIGURA B.26 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,62\text{ m}$
 $V_{em} = 20\text{ cm/min}$ $V_s = 3,32\text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

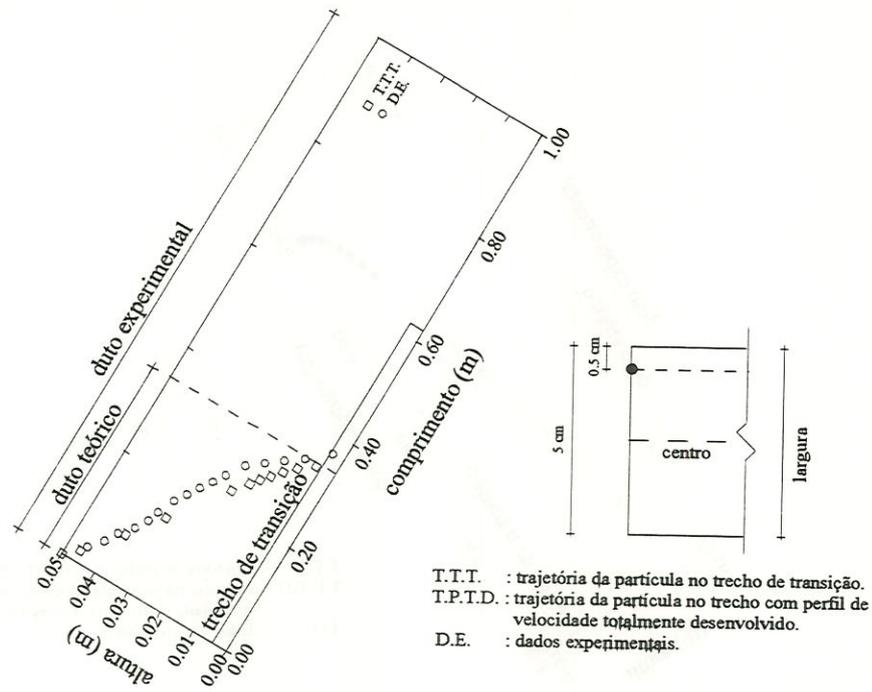


FIGURA B.27 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

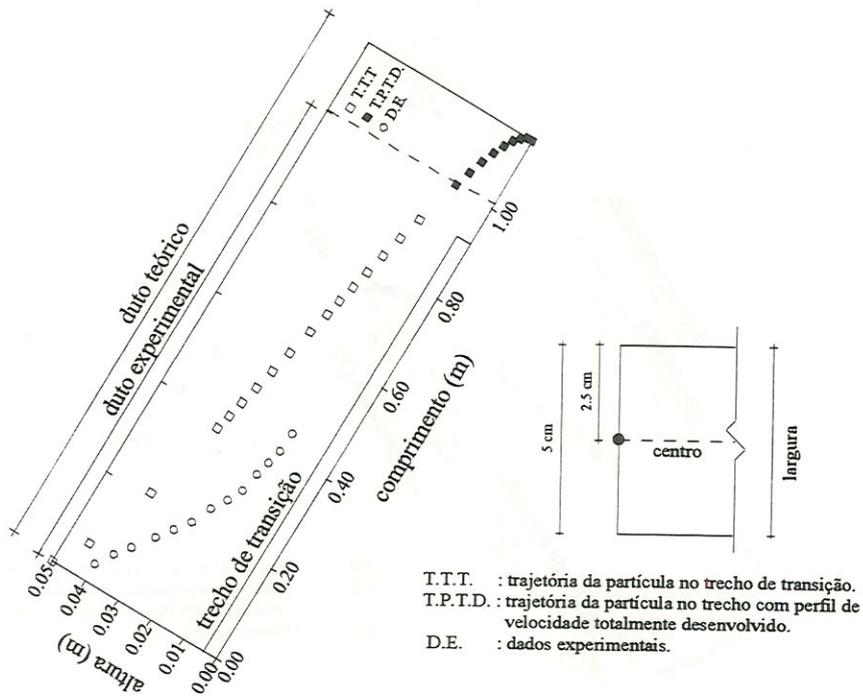


FIGURA B.28 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

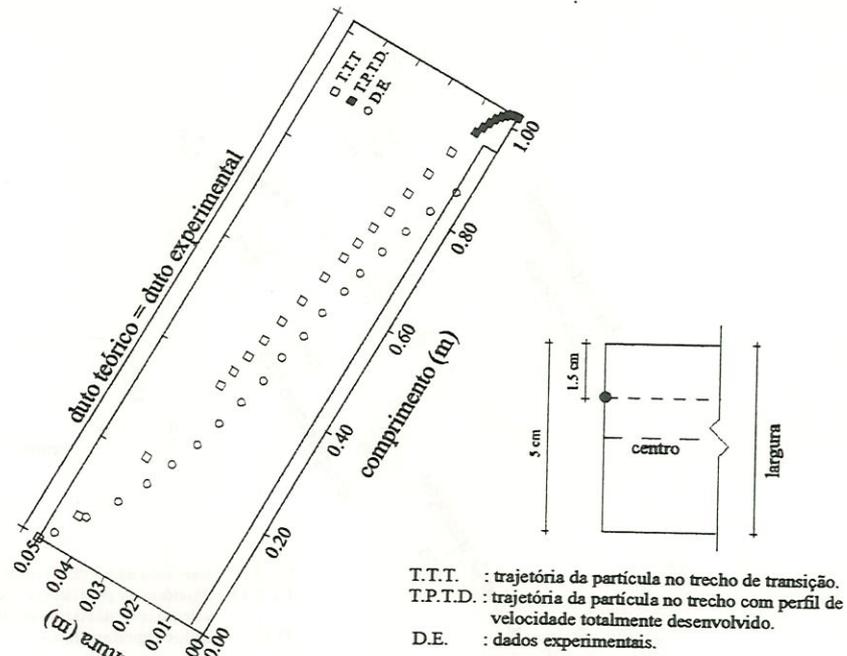


FIGURA B.29 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

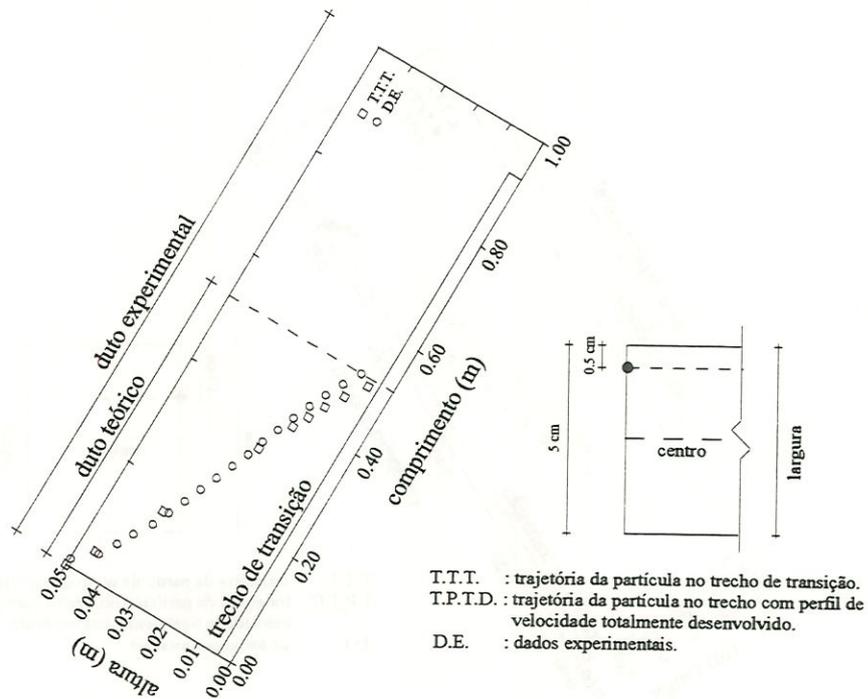


FIGURA B.30 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

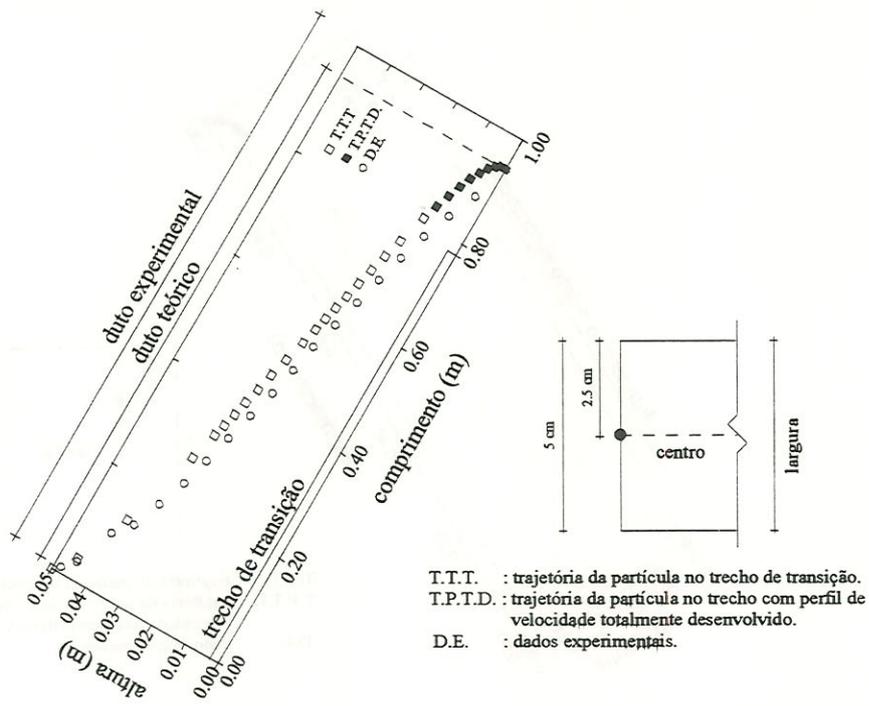


FIGURA B.31 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

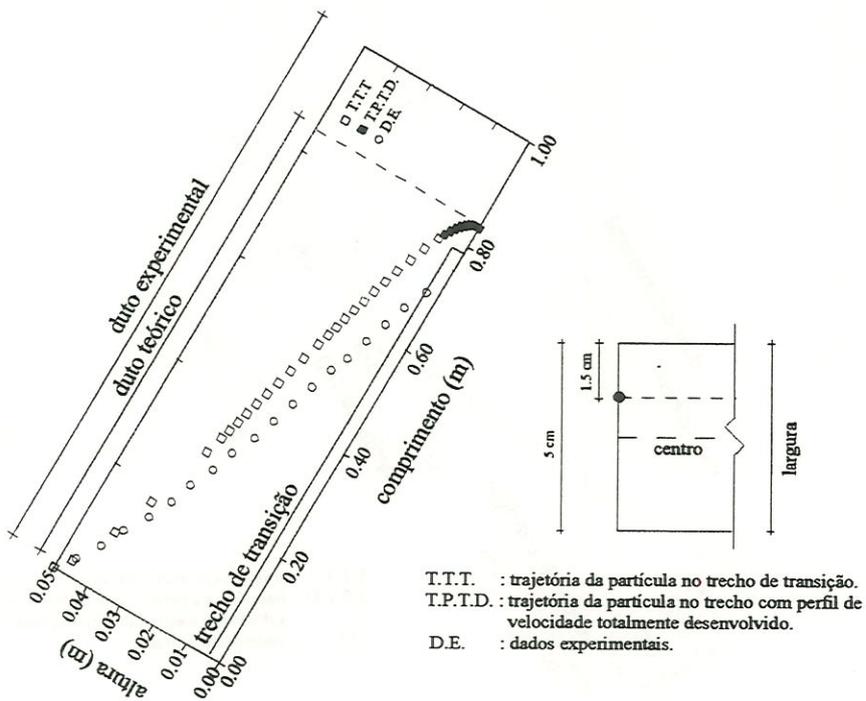


FIGURA B.32 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

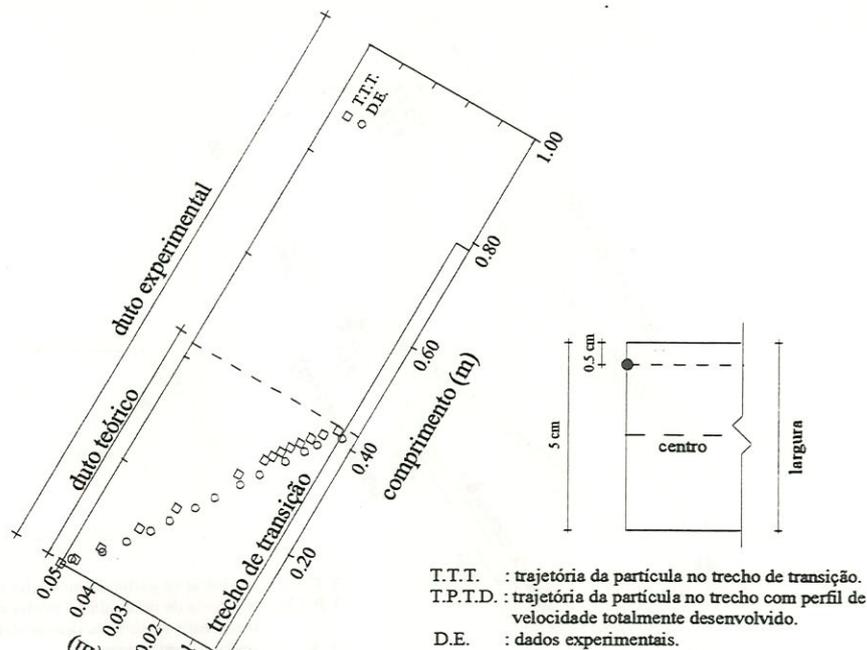


FIGURA B.33 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

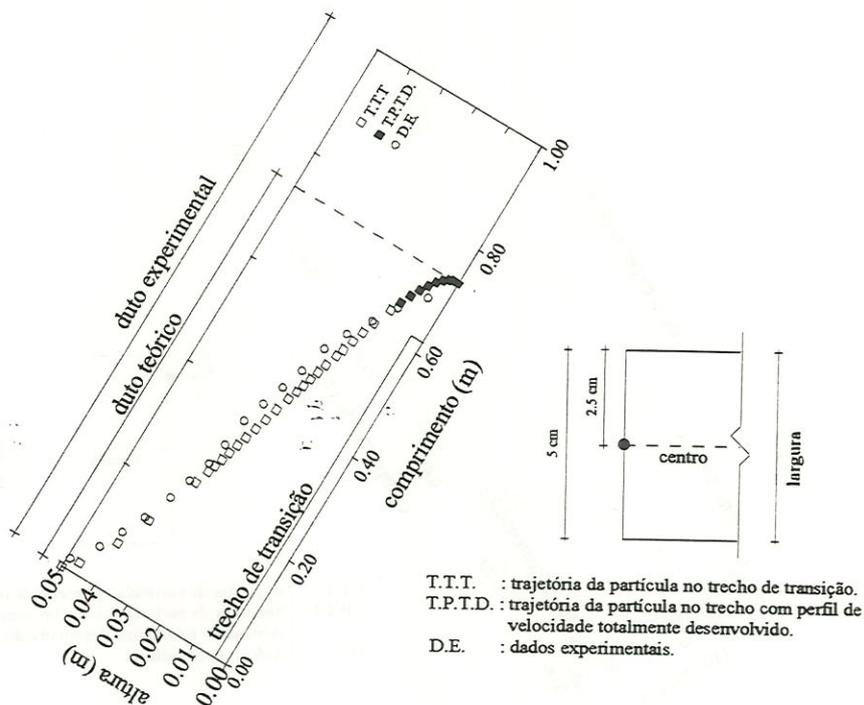


FIGURA B.34 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

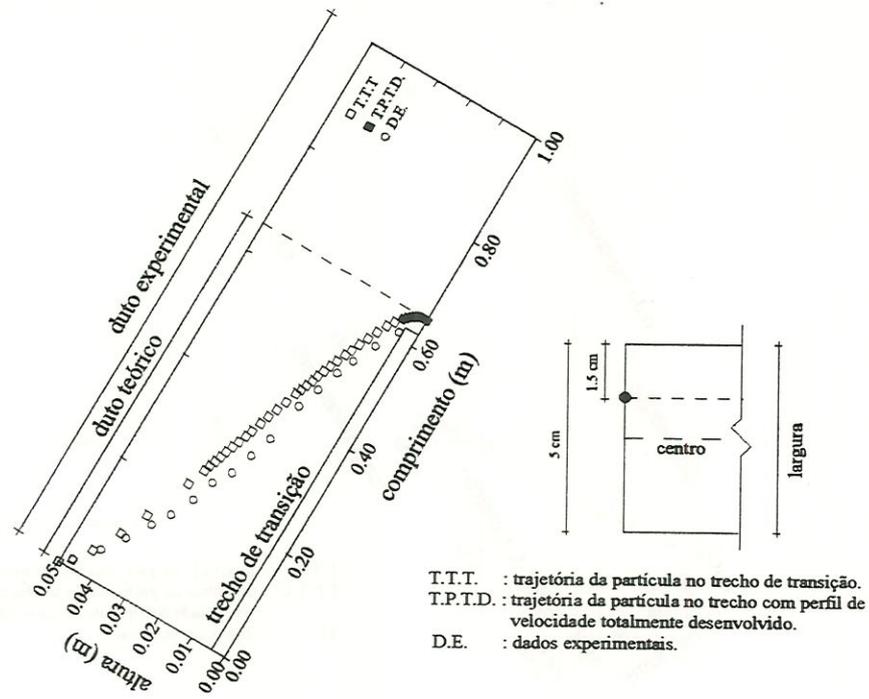


FIGURA B.35 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

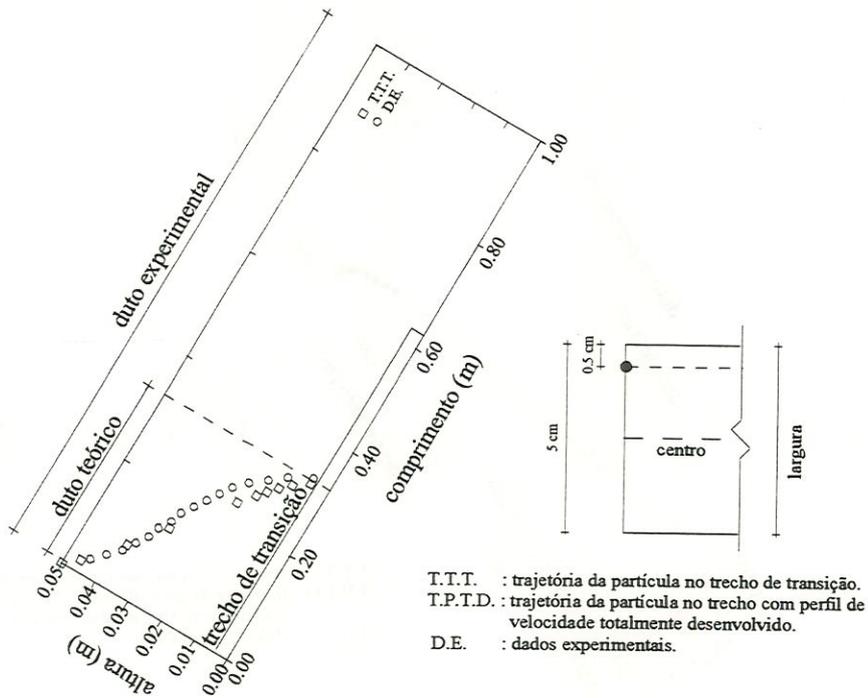


FIGURA B.36 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

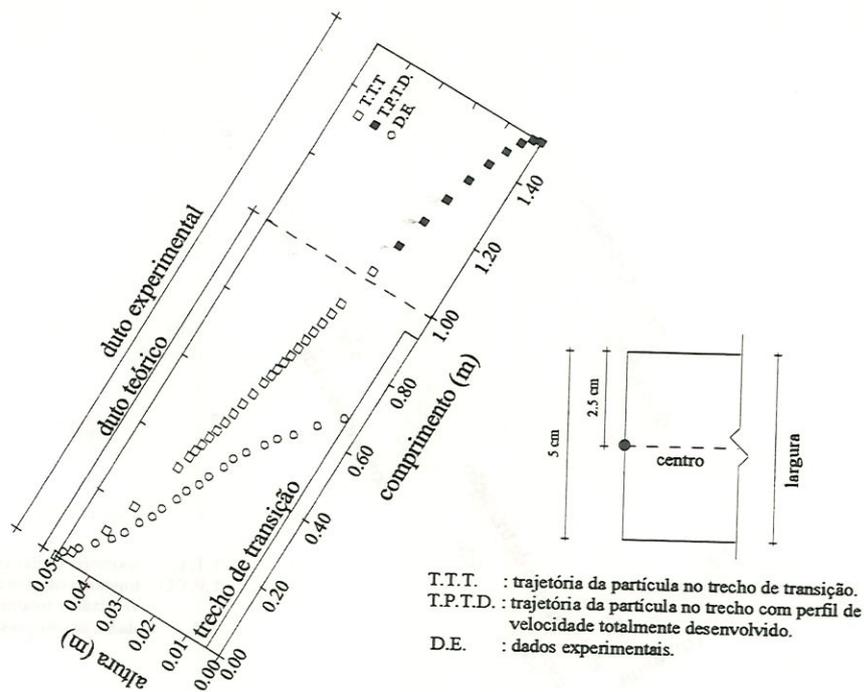


FIGURA B.37 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

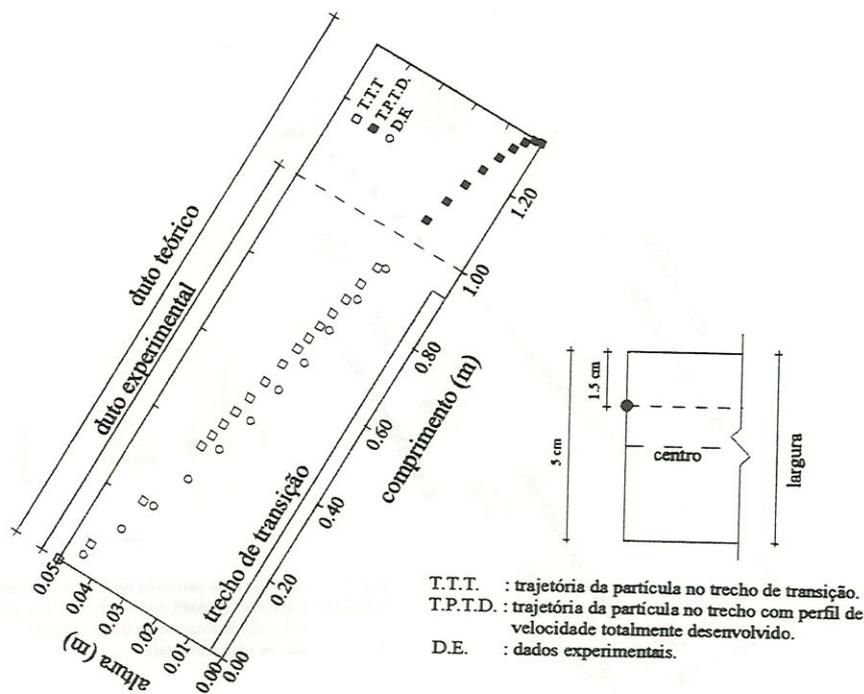


FIGURA B.38 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

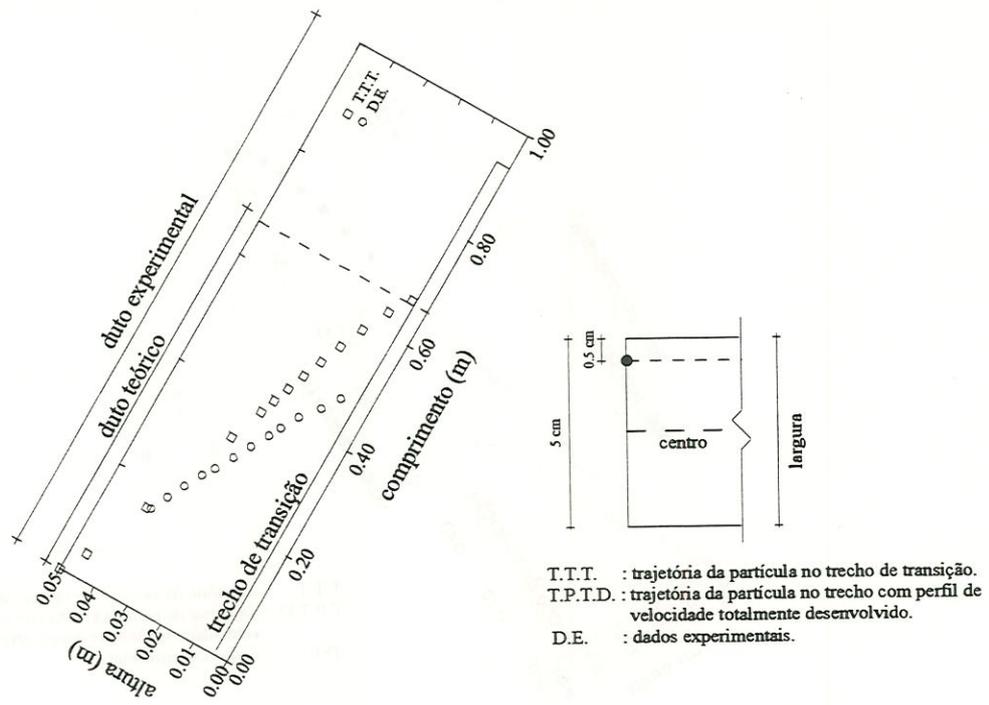


FIGURA B.39 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,93\text{ m}$
 $V_{em} = 30\text{ cm/min}$ $V_s = 2,72\text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

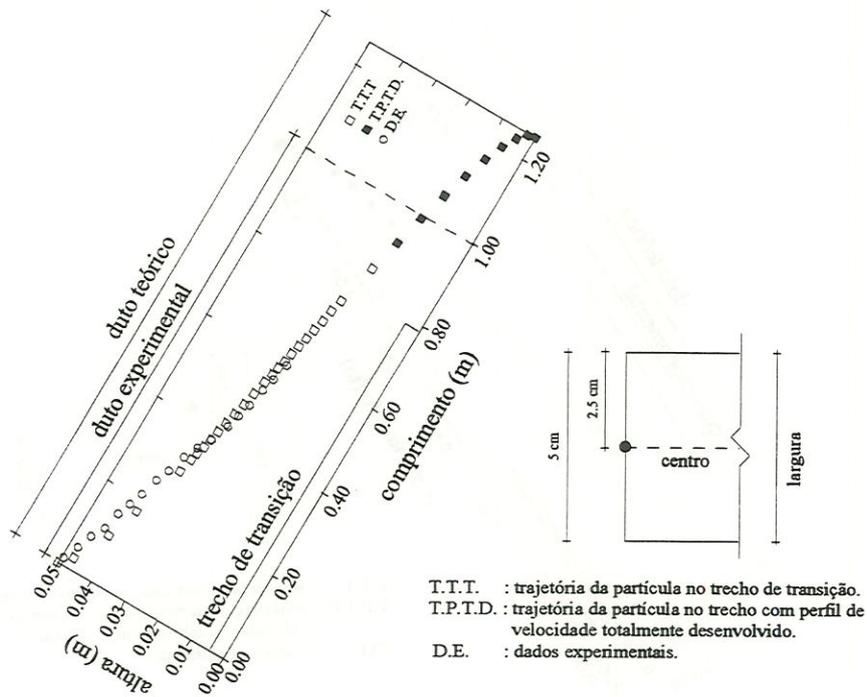


FIGURA B.40 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,78\text{ m}$
 $V_{em} = 25\text{ cm/min}$ $V_s = 2,72\text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

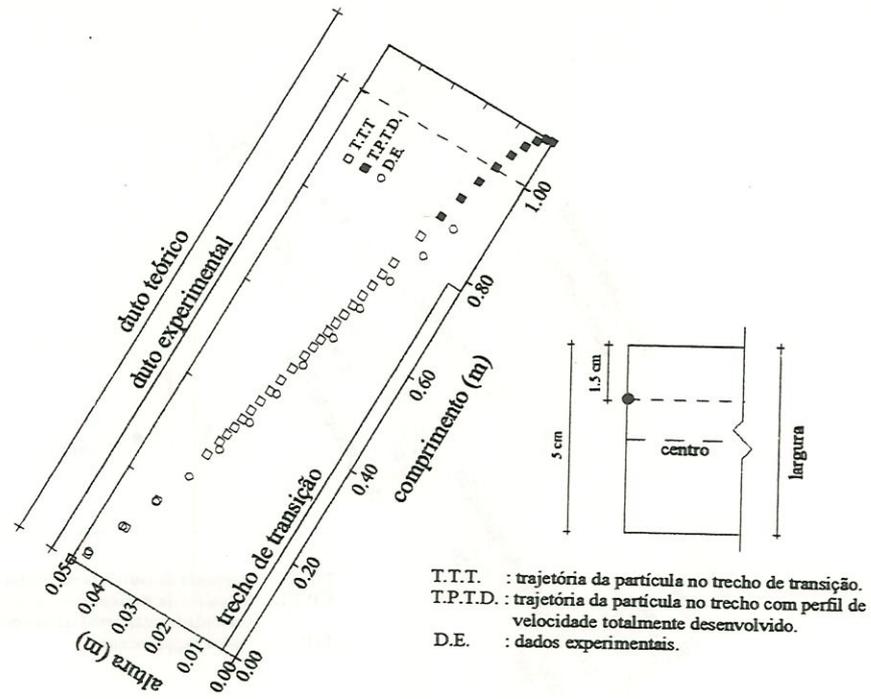


FIGURA B.41 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

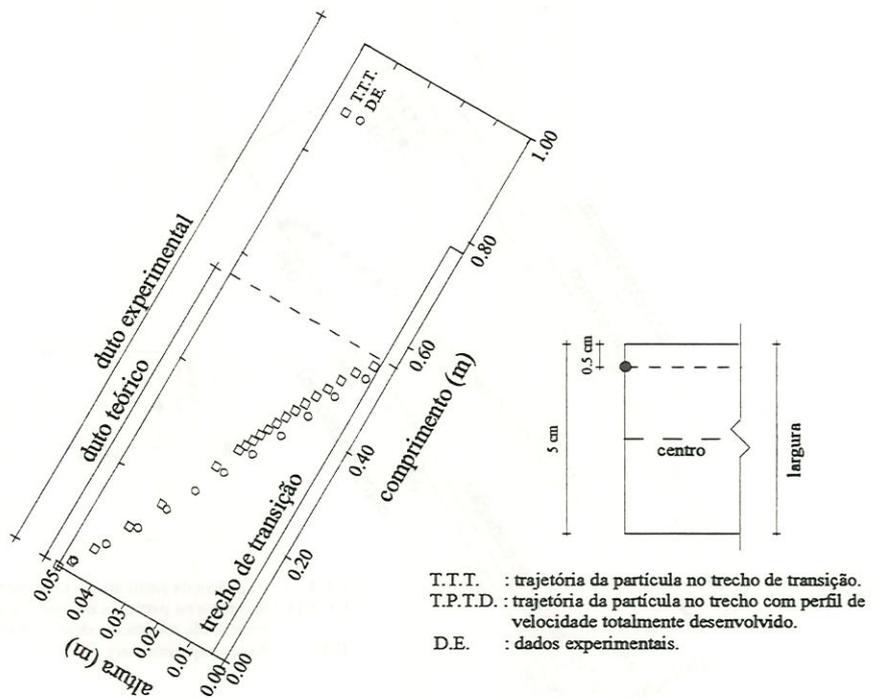


FIGURA B.42 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

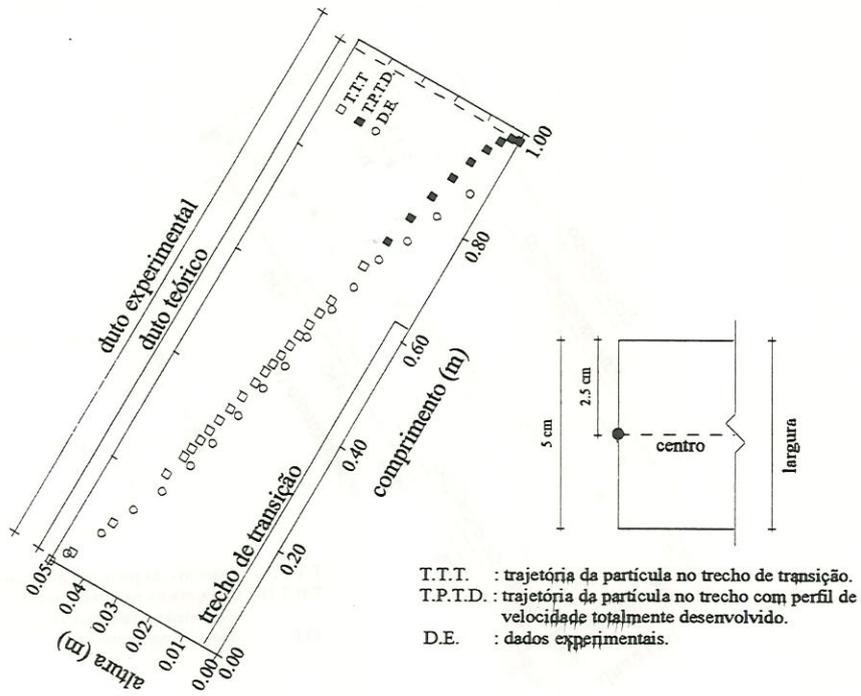


FIGURA B.43 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

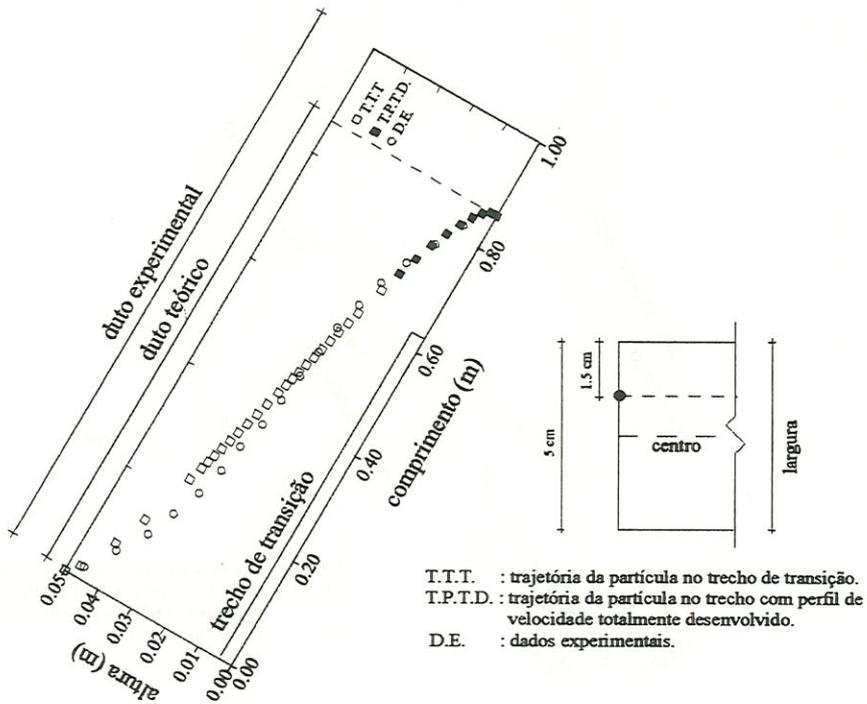


FIGURA B.44 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

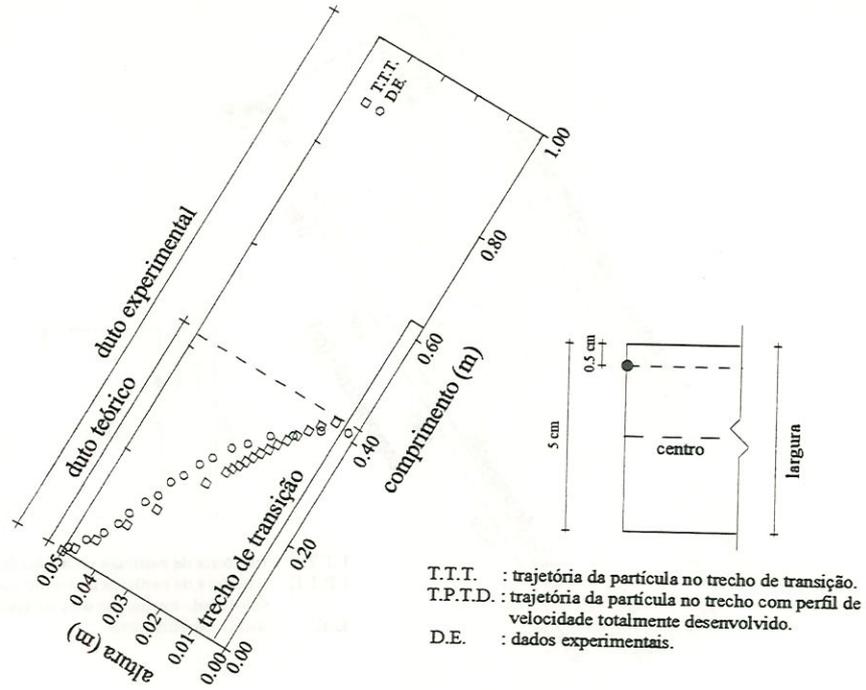


FIGURA B.45 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

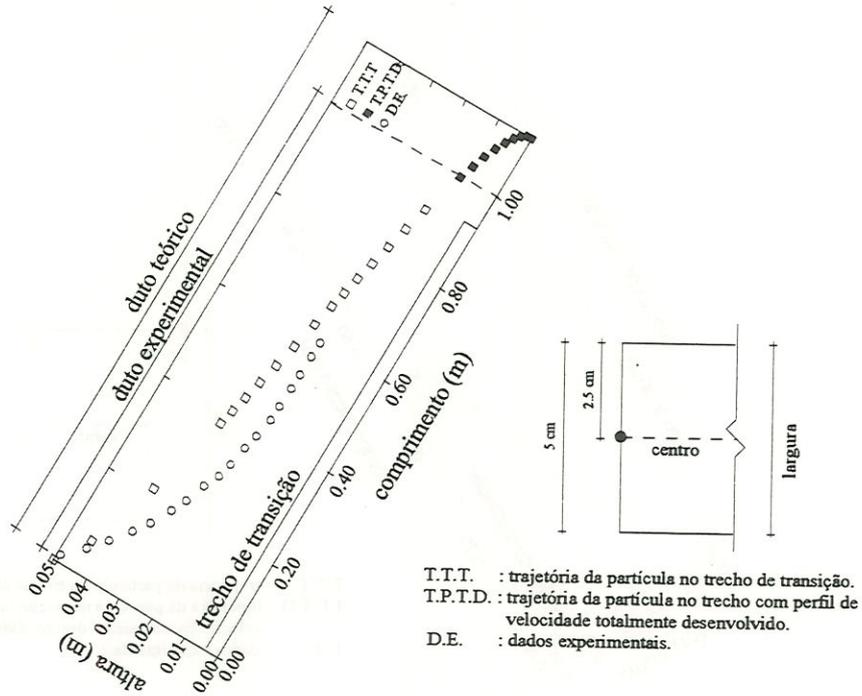


FIGURA B.46 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

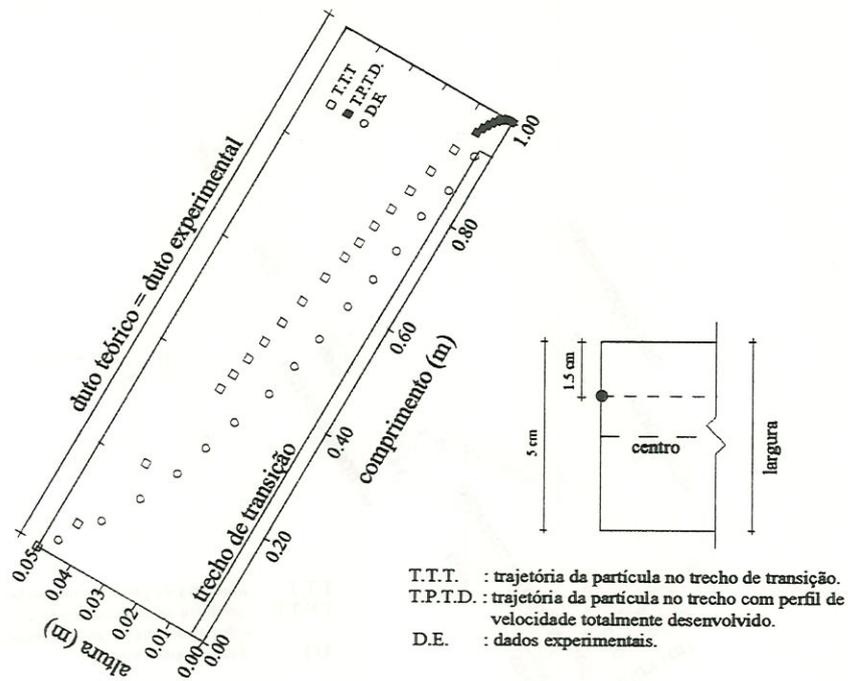


FIGURA B.47 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

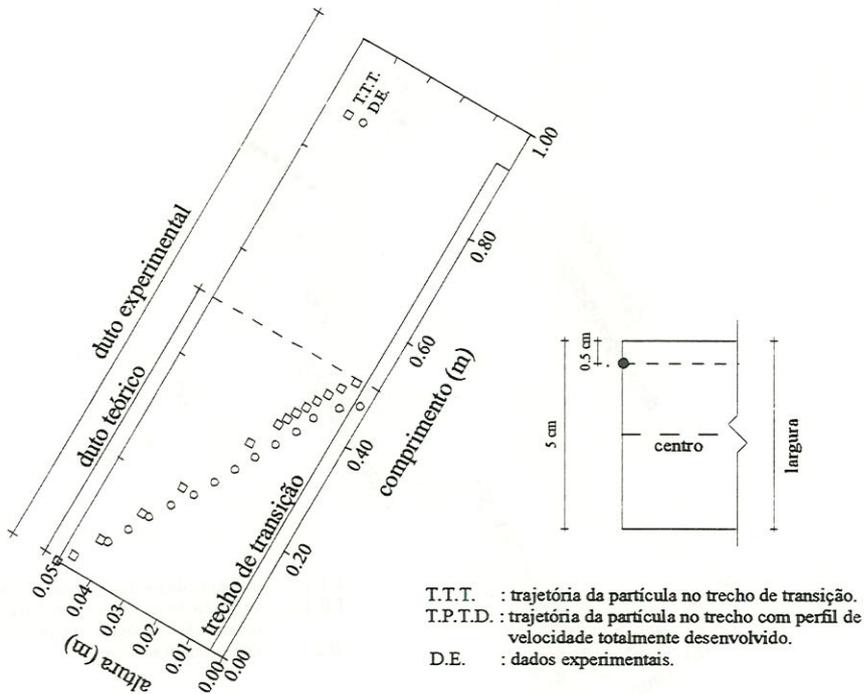


FIGURA B.48 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

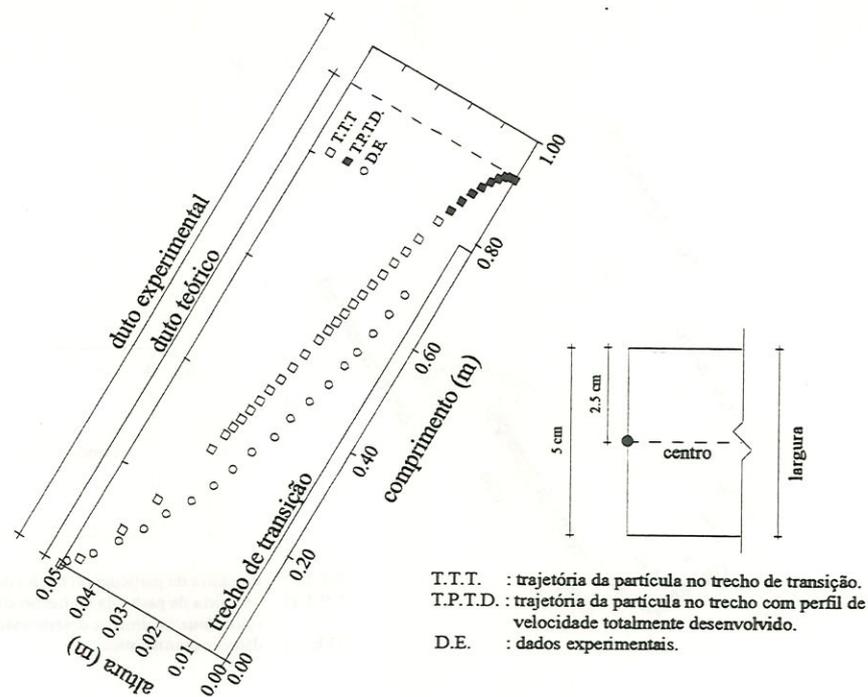


FIGURA B.49 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

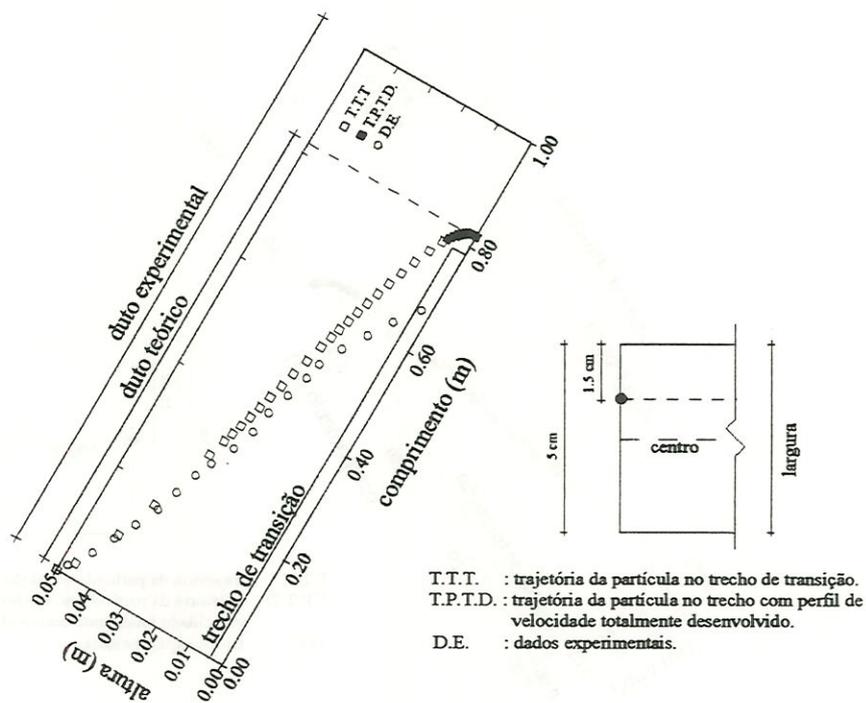


FIGURA B.50 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

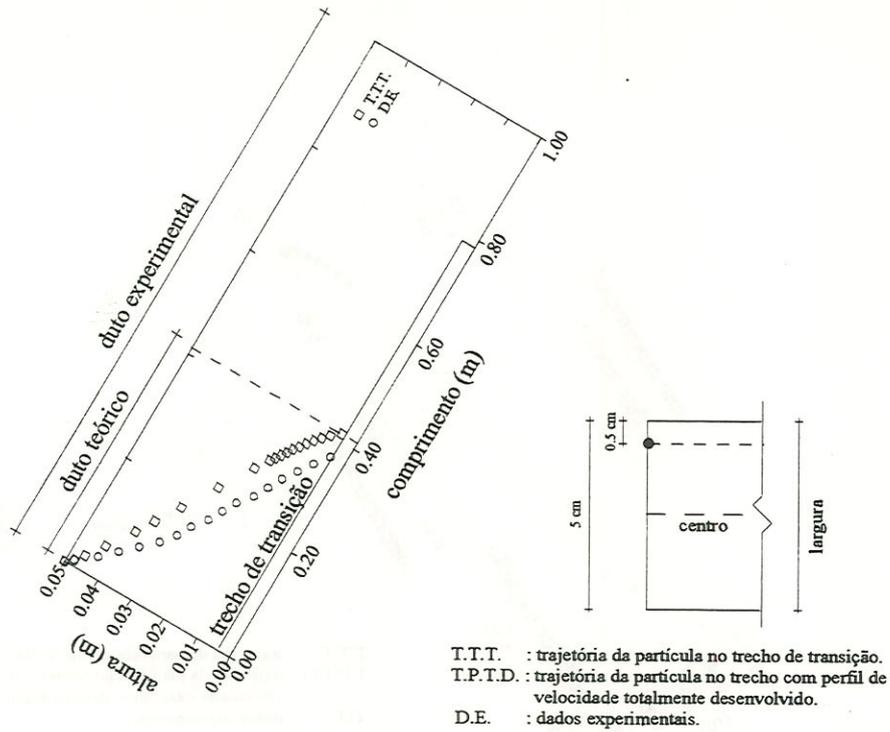


FIGURA B.51 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

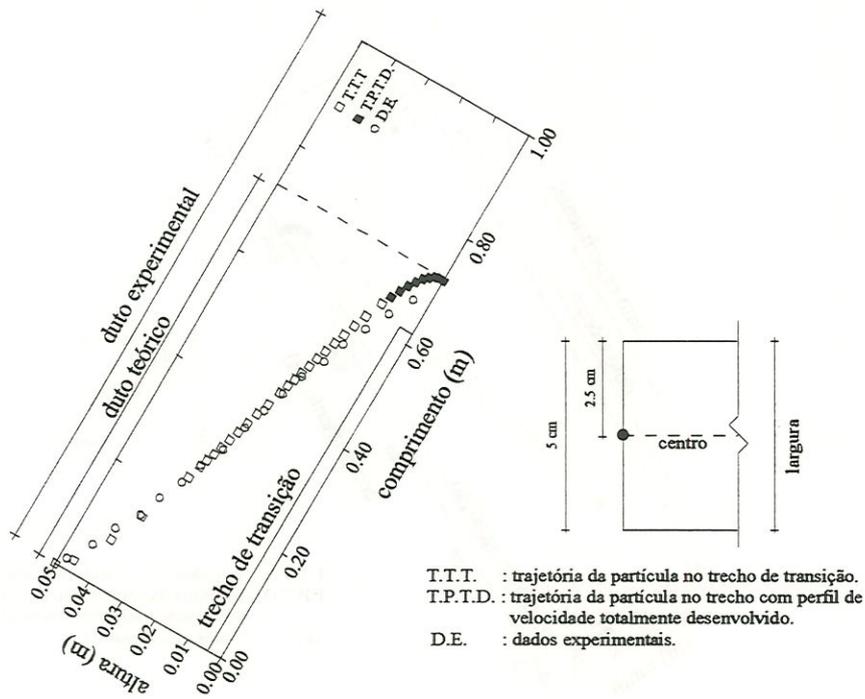


FIGURA B.52 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

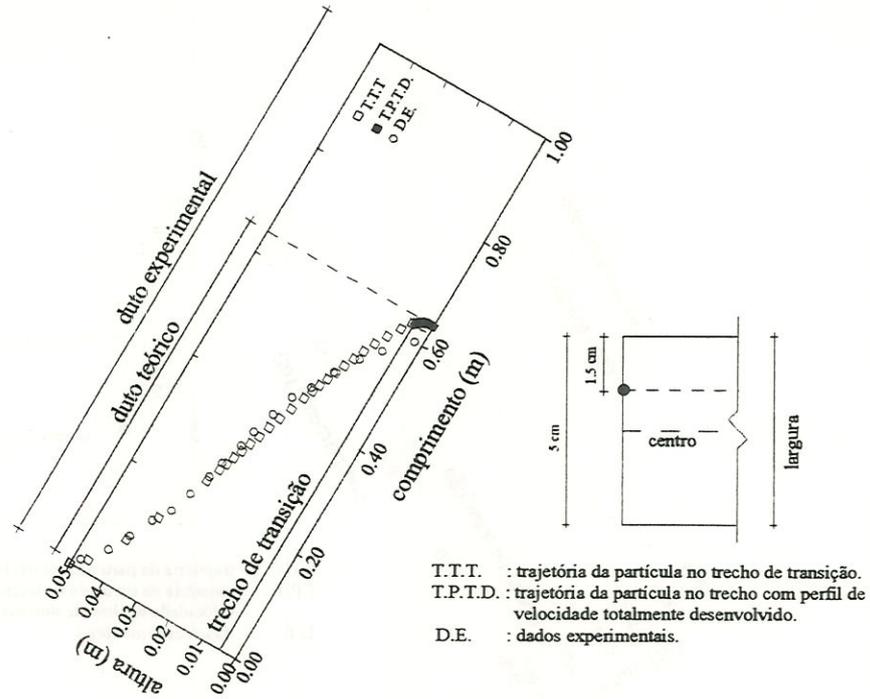


FIGURA B.53 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

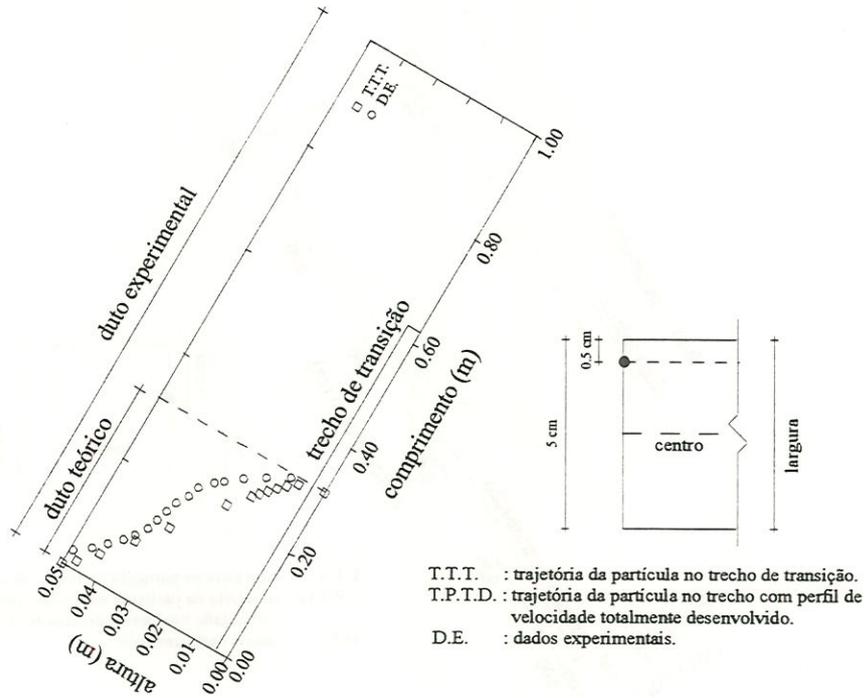


FIGURA B.54 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

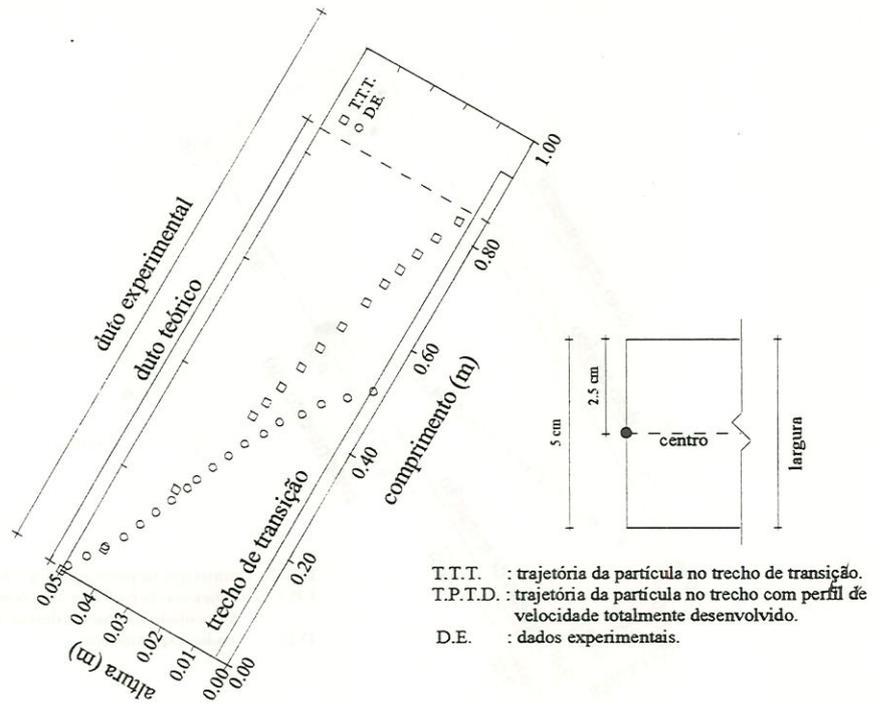


FIGURA B.55 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

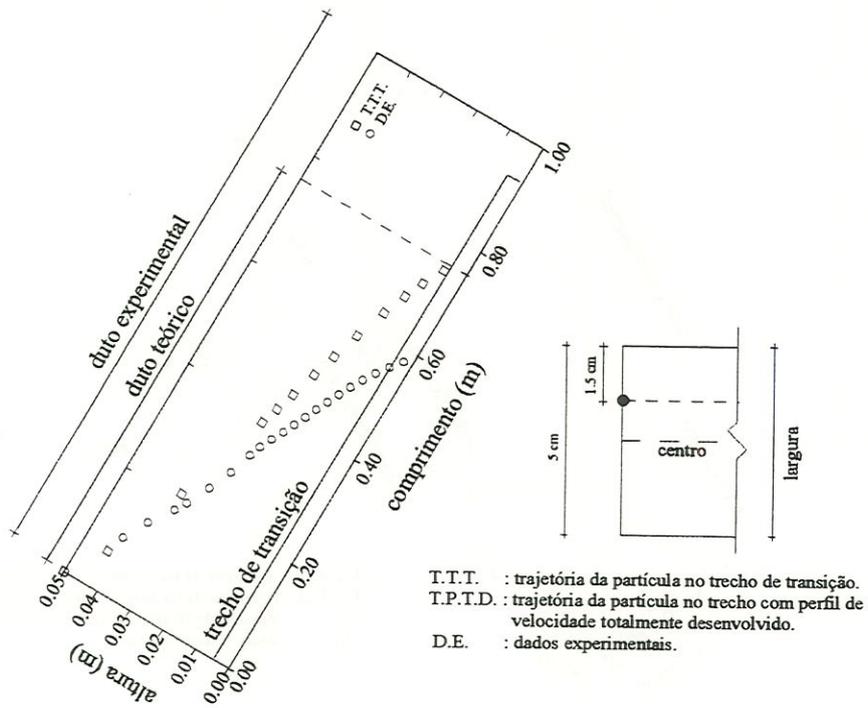


FIGURA B.56 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

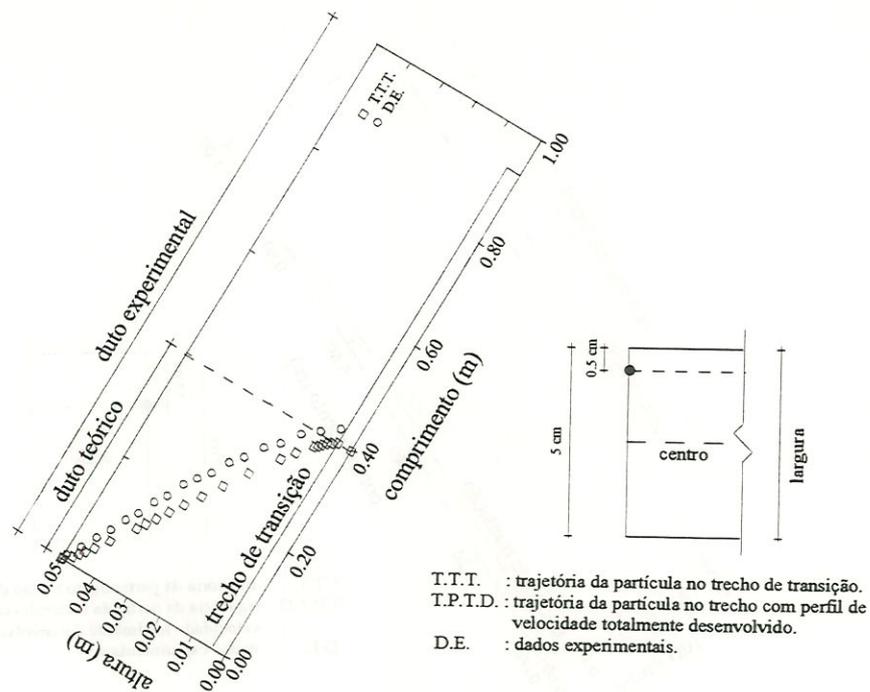


FIGURA B.57 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

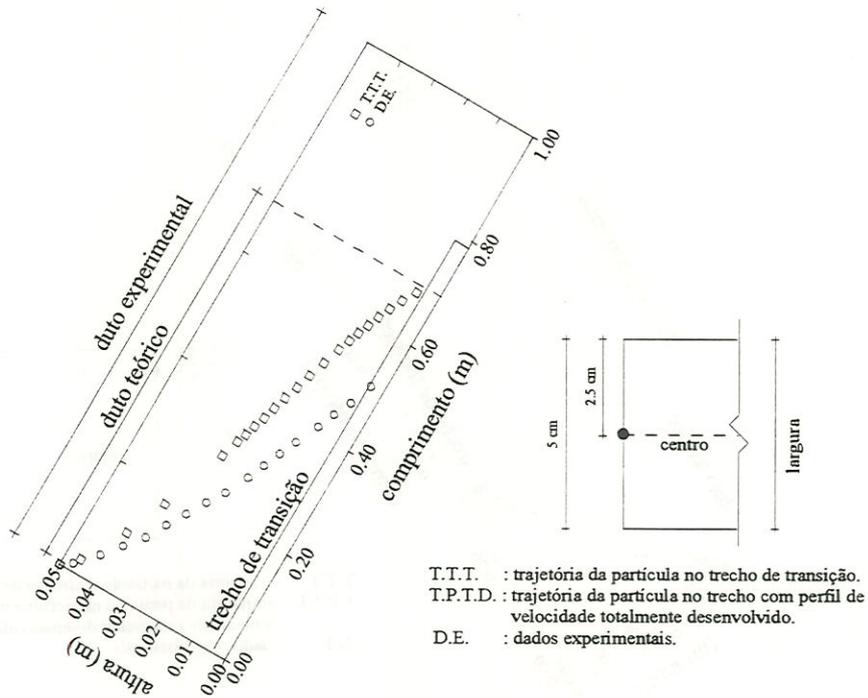


FIGURA B.58 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

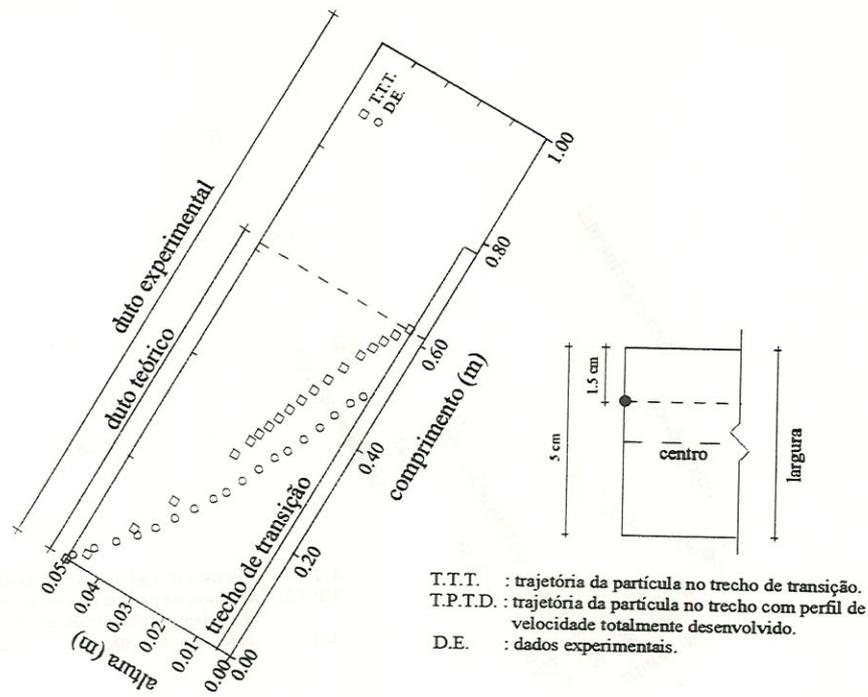


FIGURA B.59 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

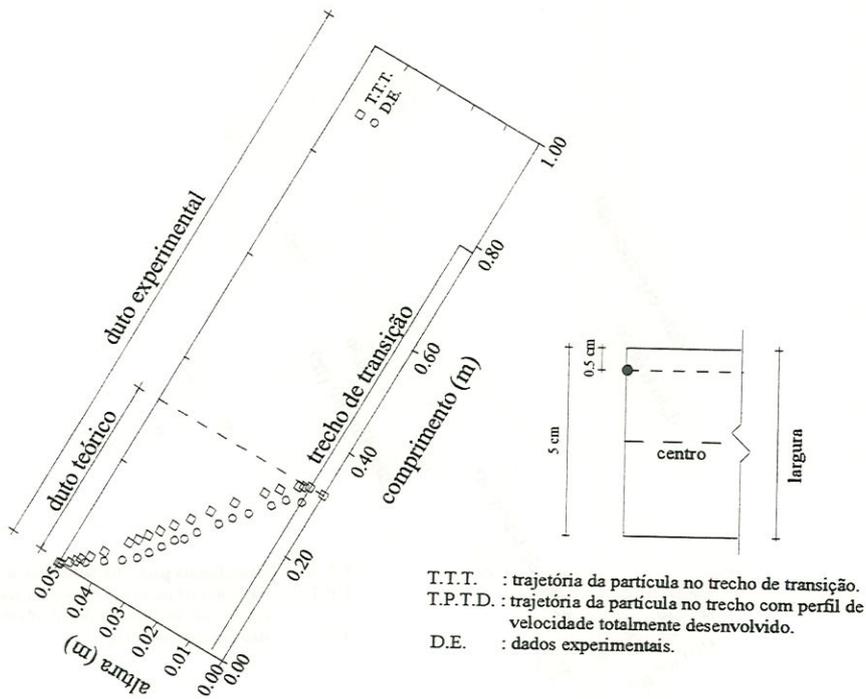


FIGURA B.60 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

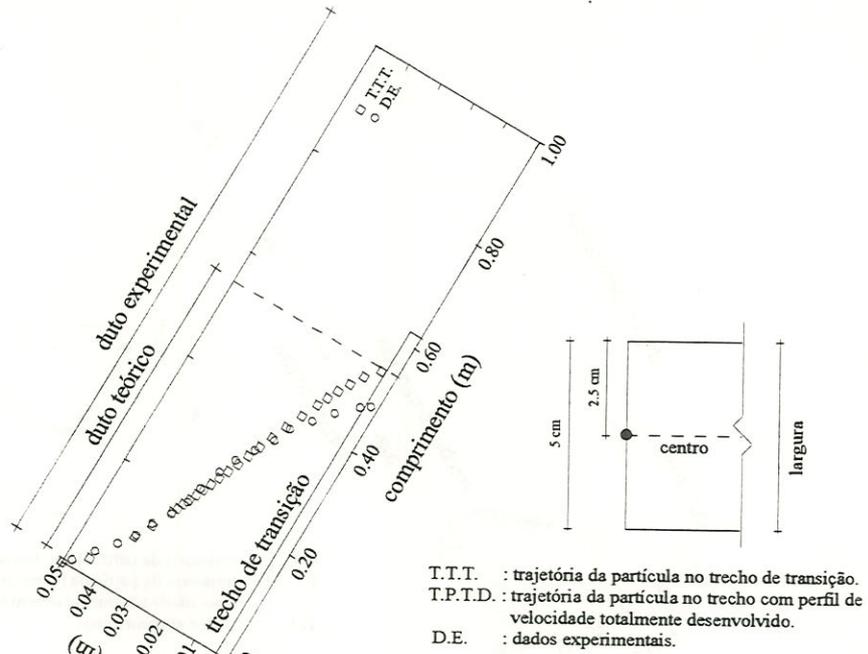


FIGURA B.61 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

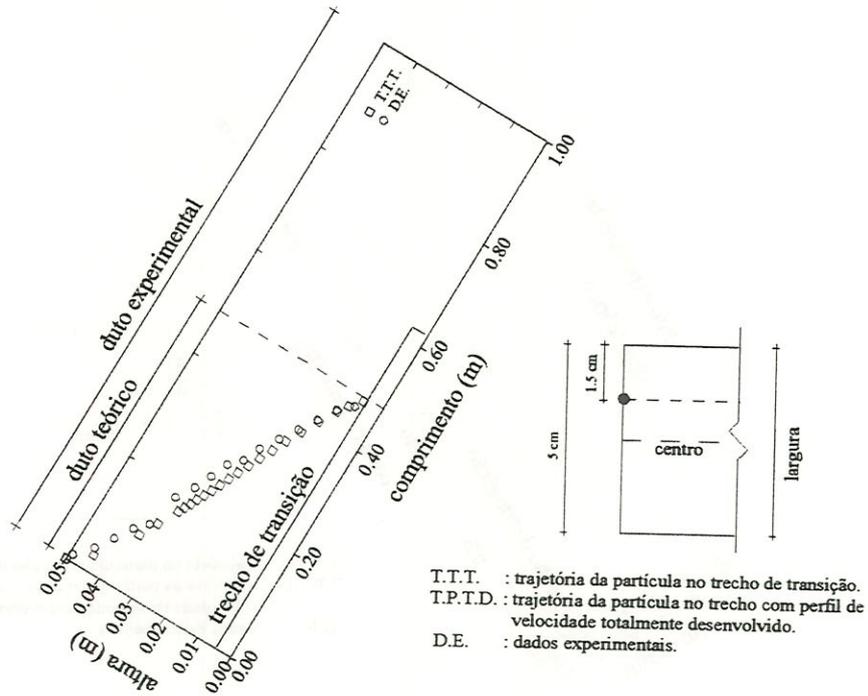


FIGURA B.62 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

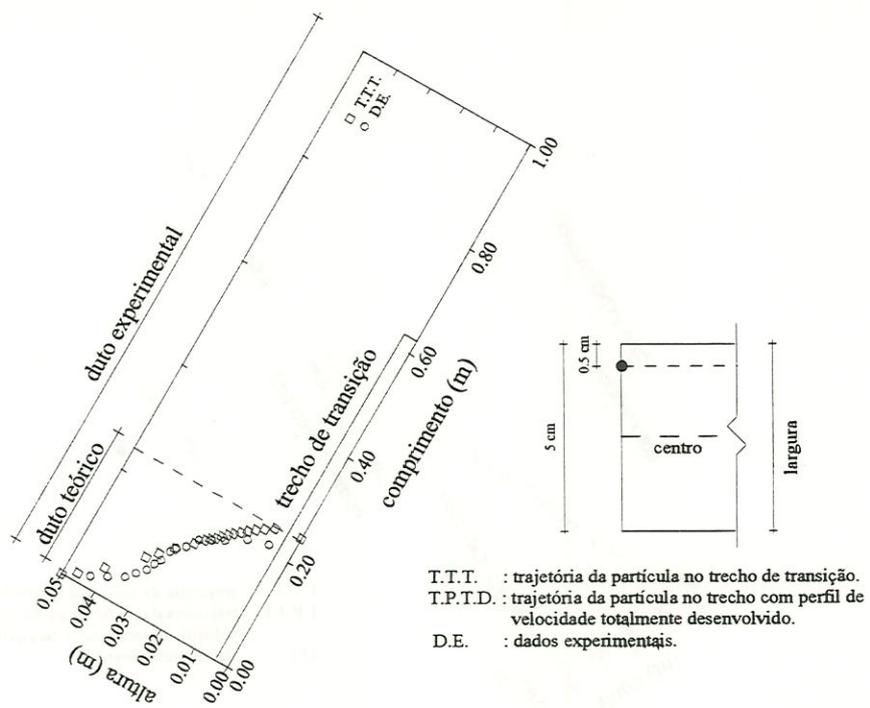


FIGURA B.63 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

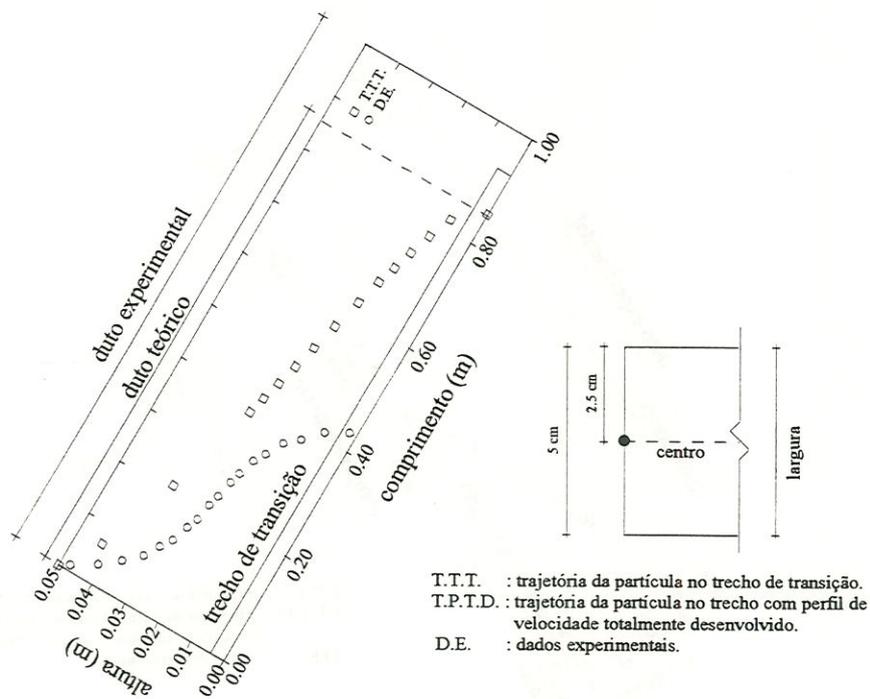


FIGURA B.64 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

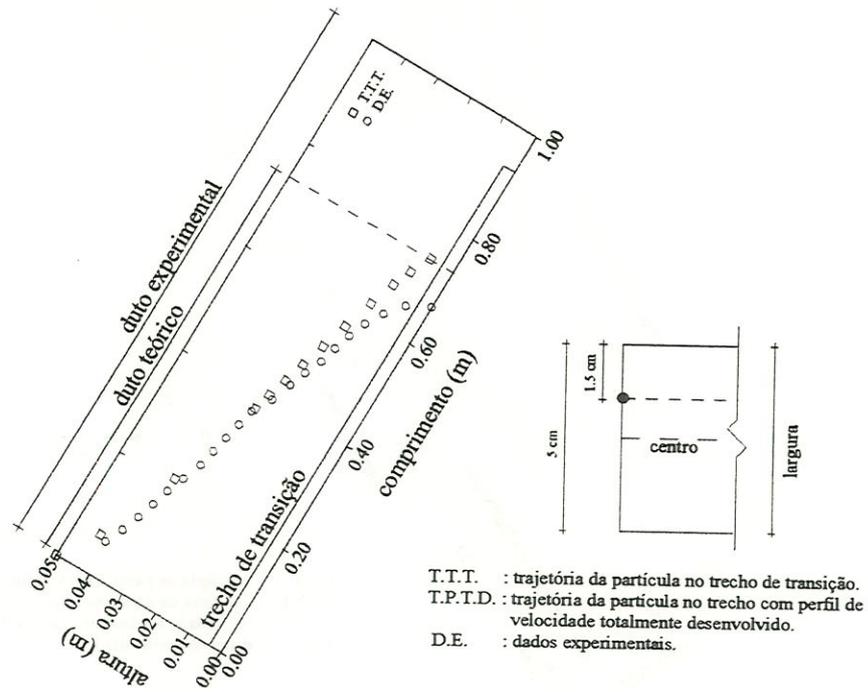


FIGURA B.65 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

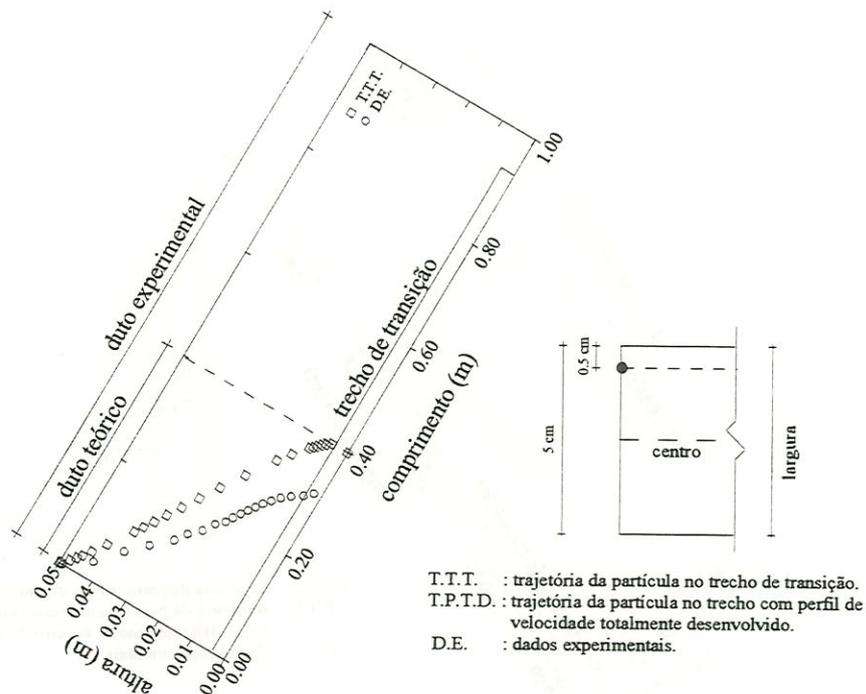


FIGURA B.66 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

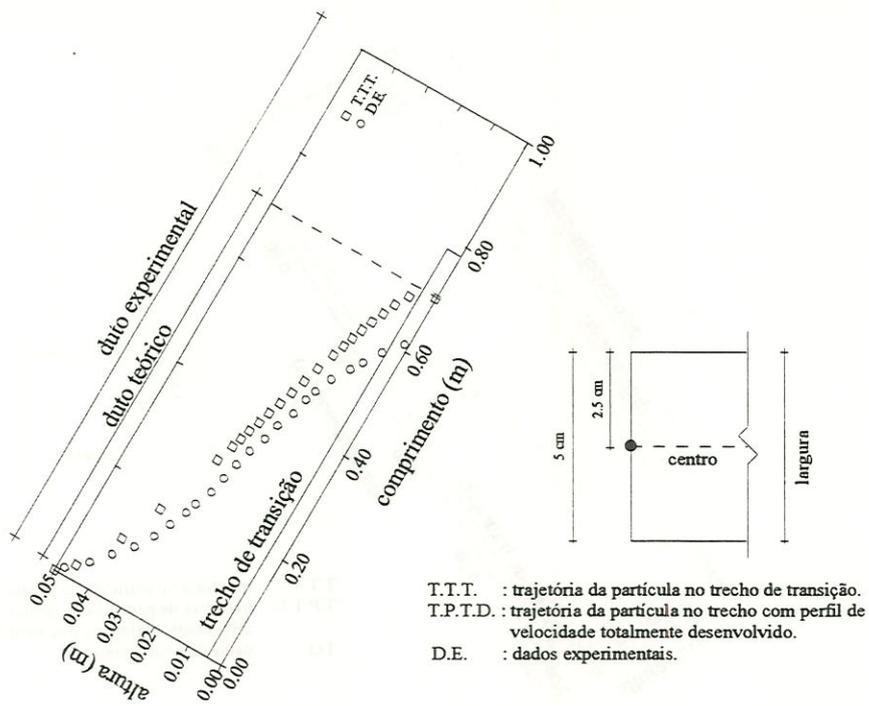


FIGURA B.67 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

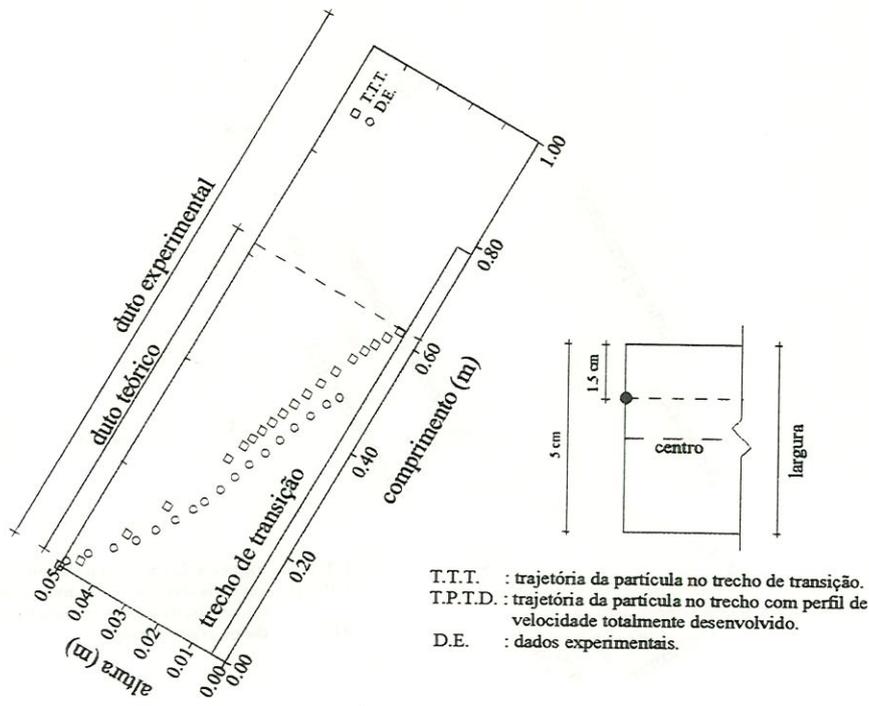


FIGURA B.68 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

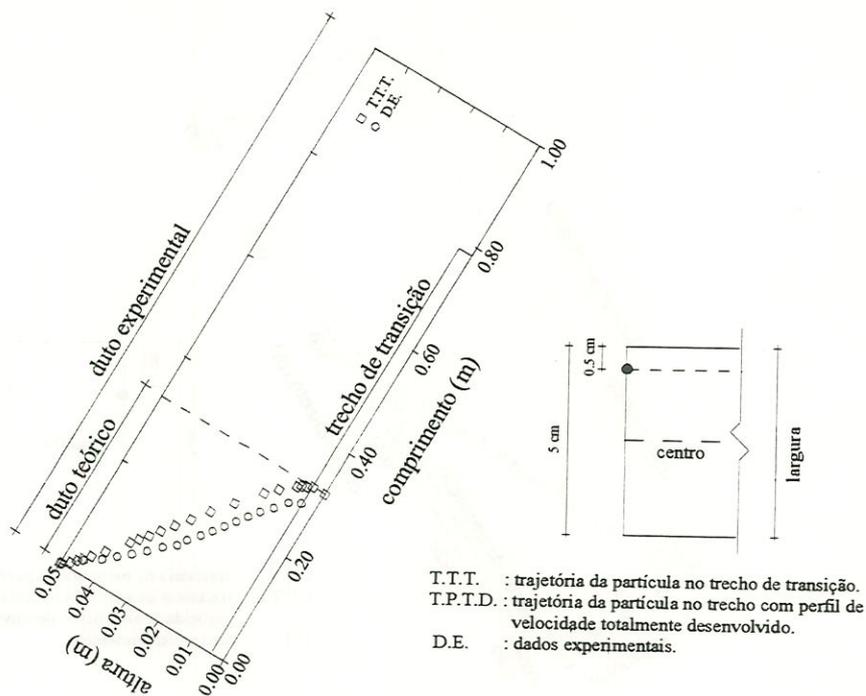


FIGURA B.69 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,78\text{ m}$
 $V_{em} = 25\text{ cm/min}$ $V_s = 4,48\text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

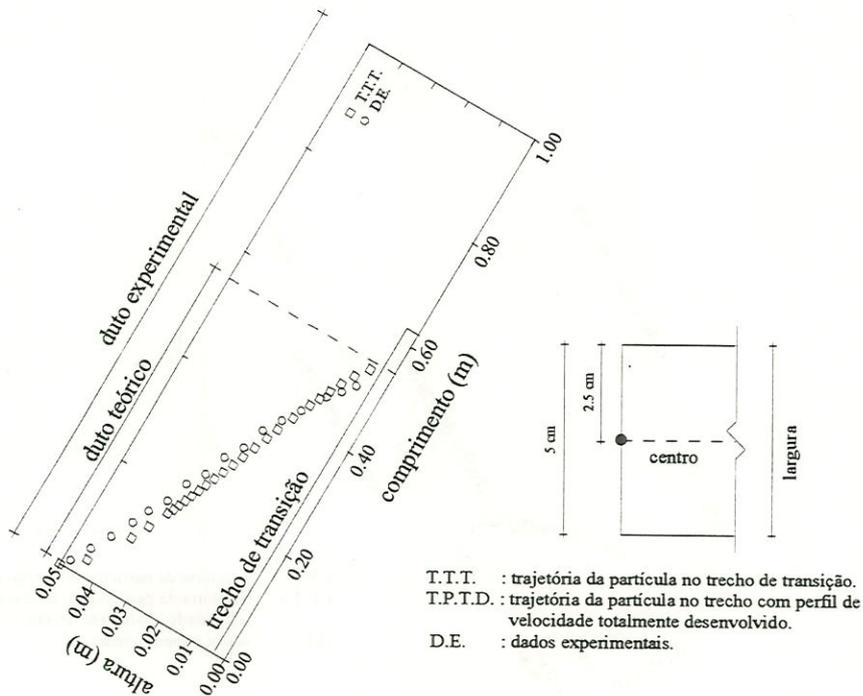


FIGURA B.70 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,62\text{ m}$
 $V_{em} = 20\text{ cm/min}$ $V_s = 4,48\text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

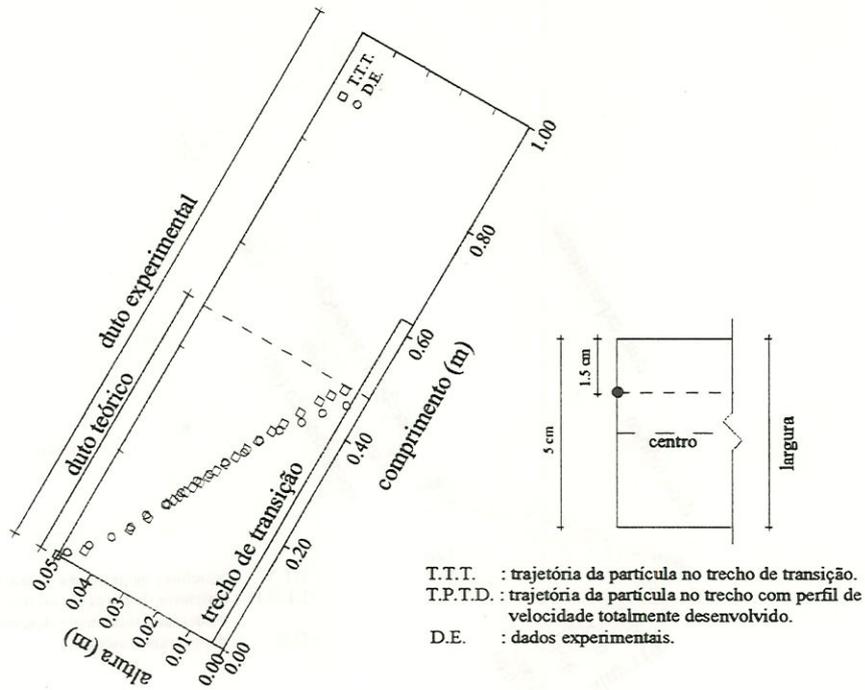


FIGURA B.71 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

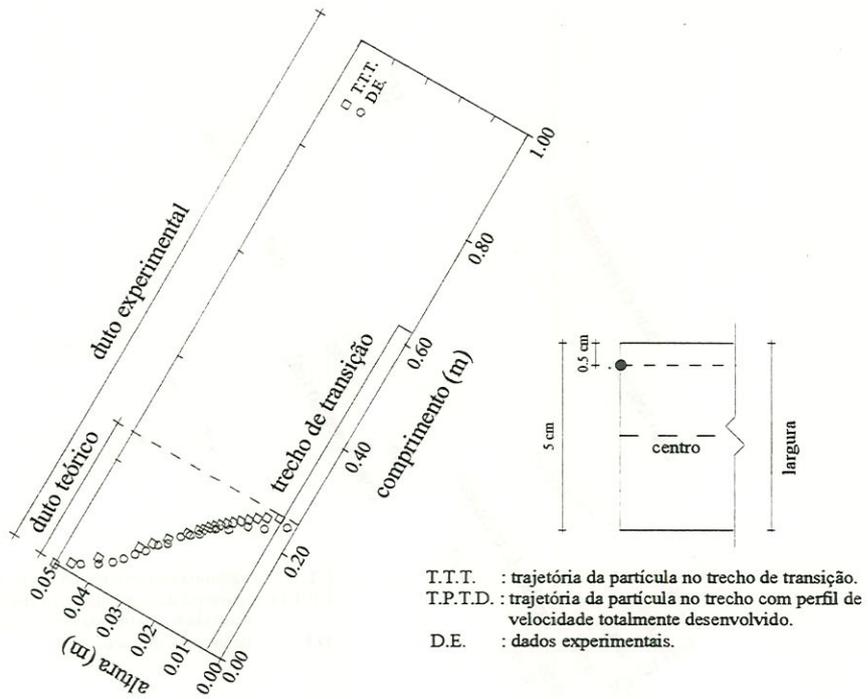


FIGURA B.72 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

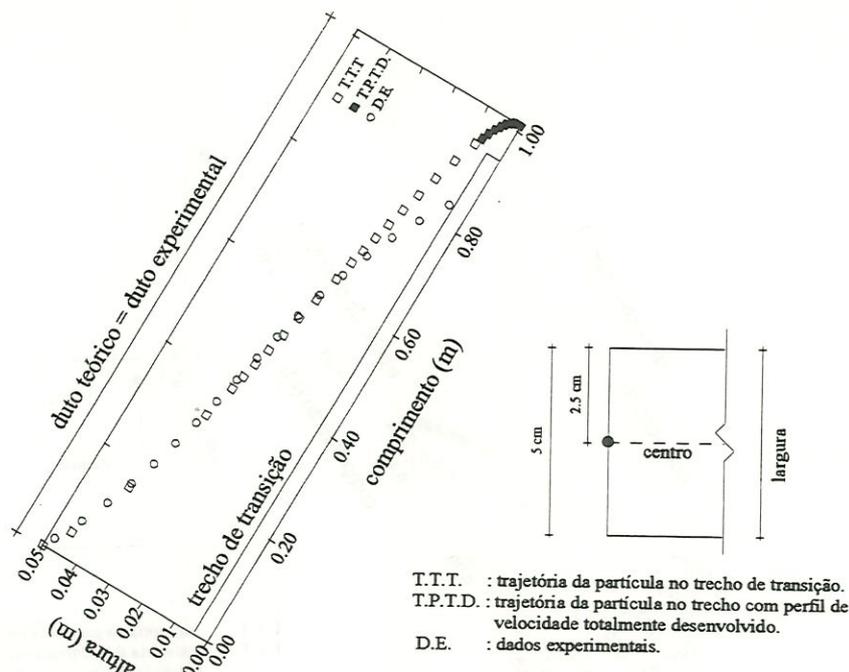


FIGURA B.73 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

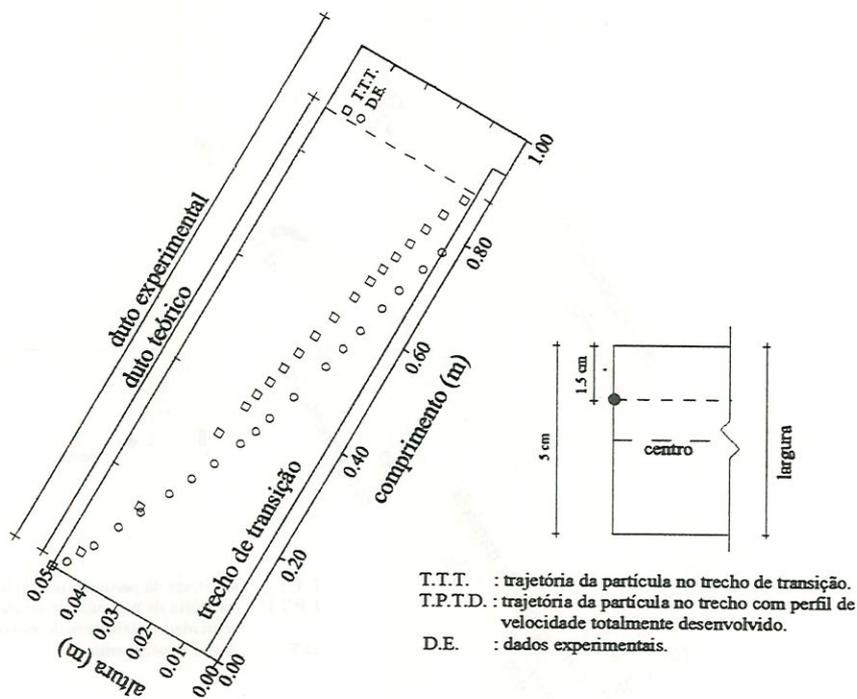


FIGURA B.74 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

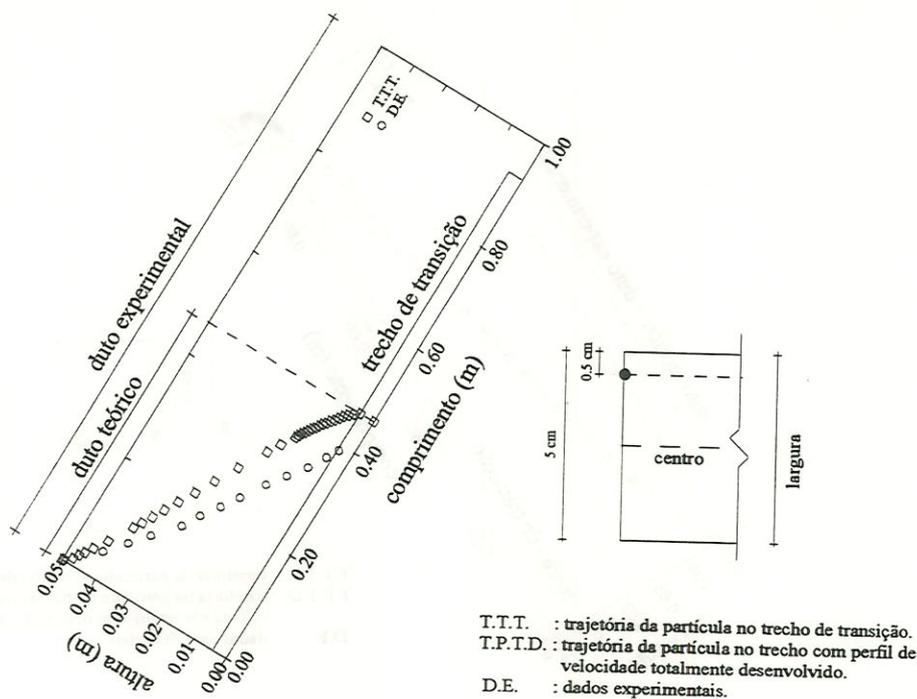


FIGURA B.75 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,93 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 248,26$

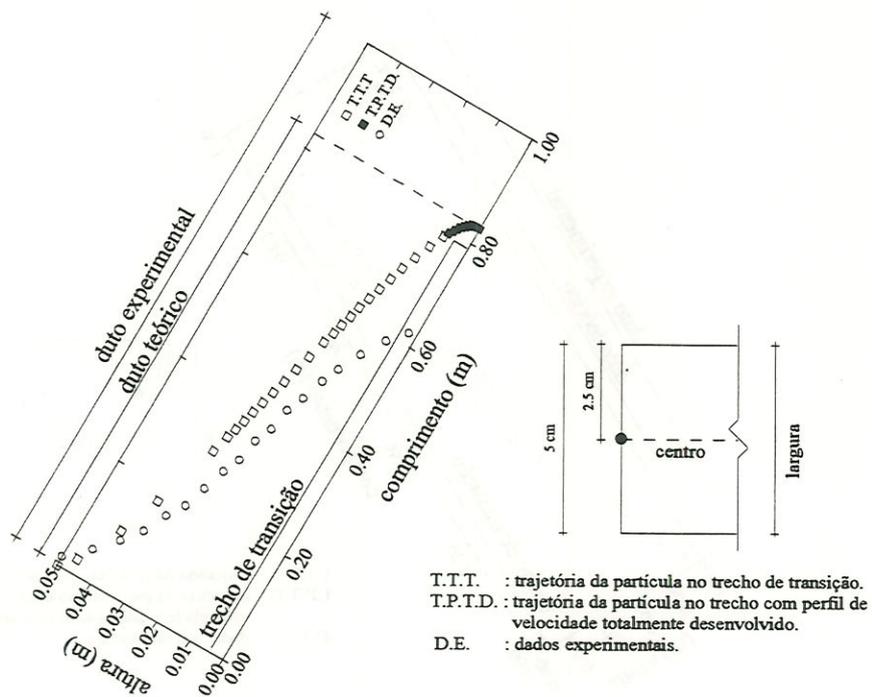


FIGURA B.76 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,78 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

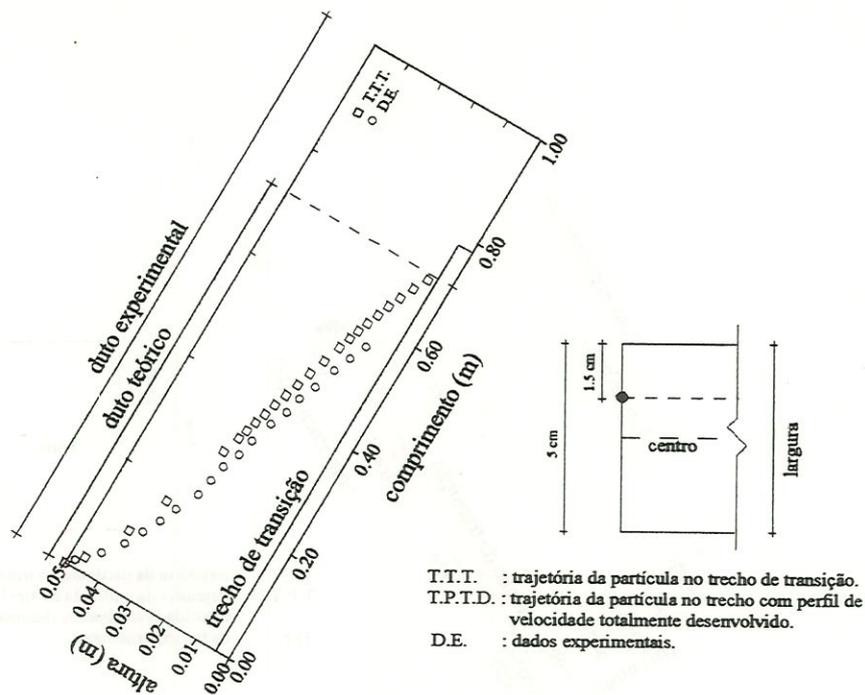


FIGURA B.77 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,78\text{ m}$
 $V_{em} = 25\text{ cm/min}$ $V_s = 3,93\text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

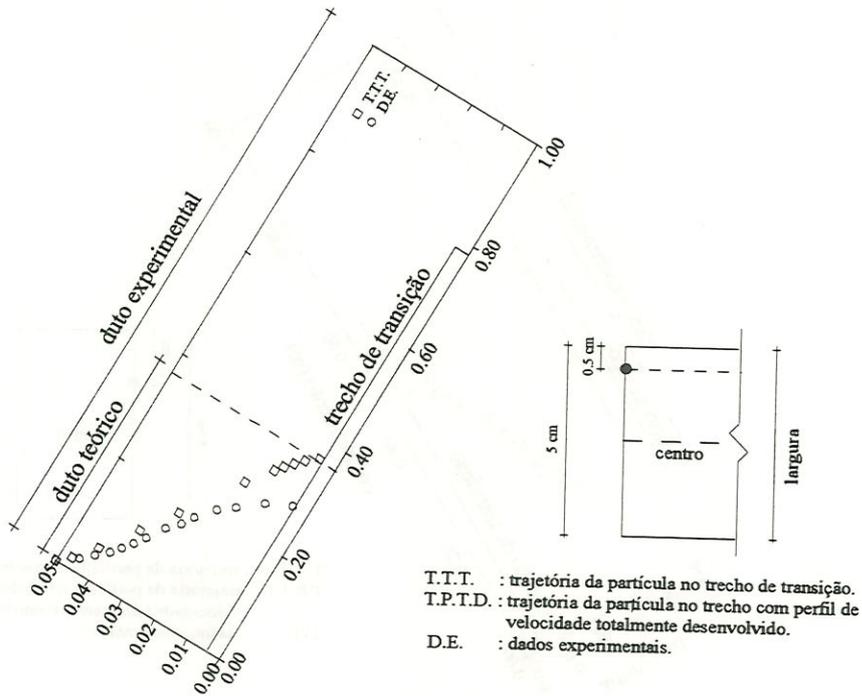


FIGURA B.78 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,05\text{ m}$ $De = 0,05\text{ m}$ $lr = 0,78\text{ m}$
 $V_{em} = 25\text{ cm/min}$ $V_s = 3,93\text{ cm/min}$ $Re = 207,05$

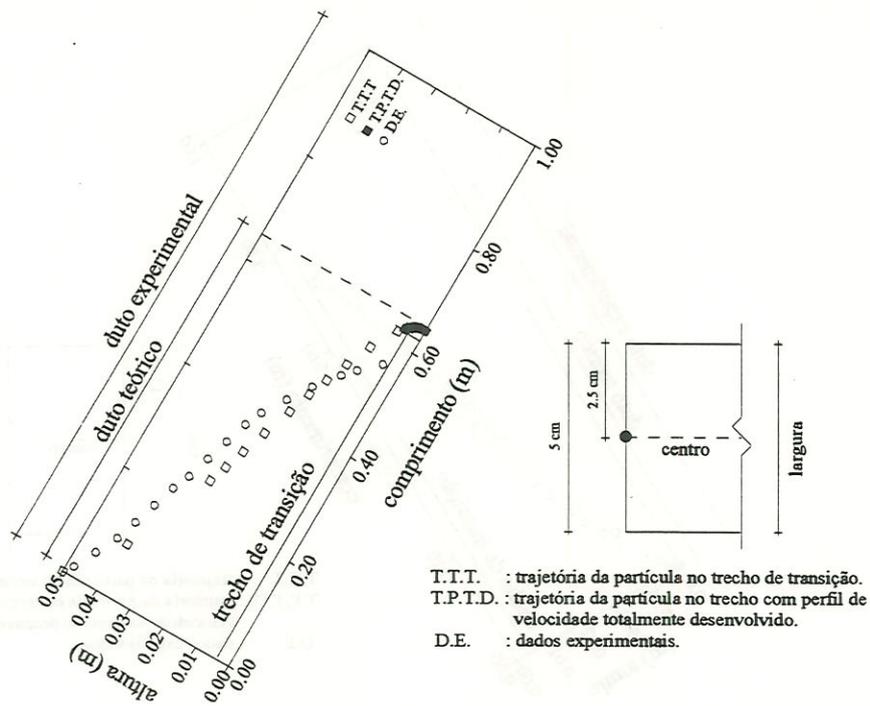


FIGURA B.79 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

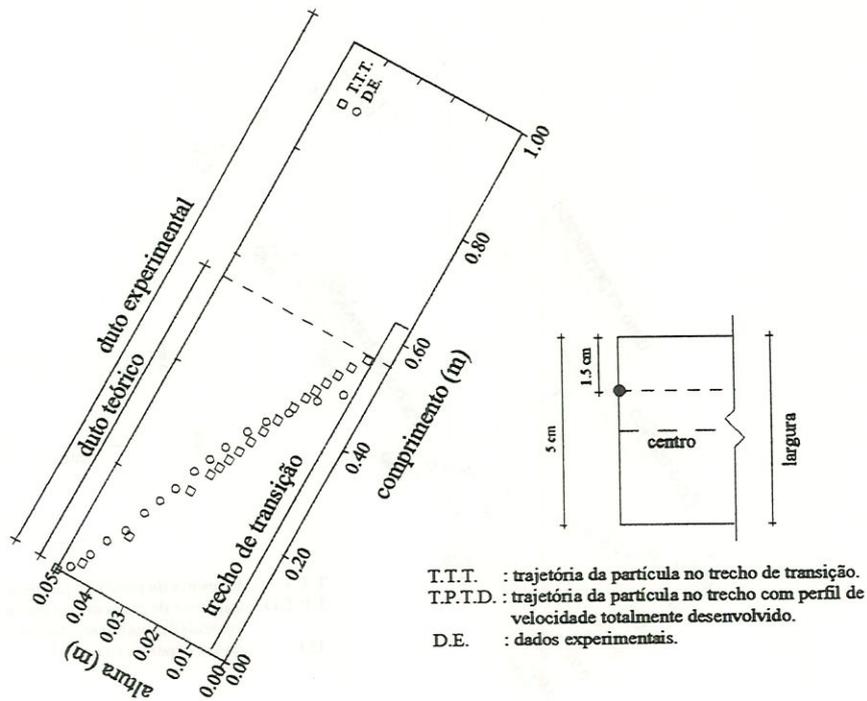


FIGURA B.80 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$

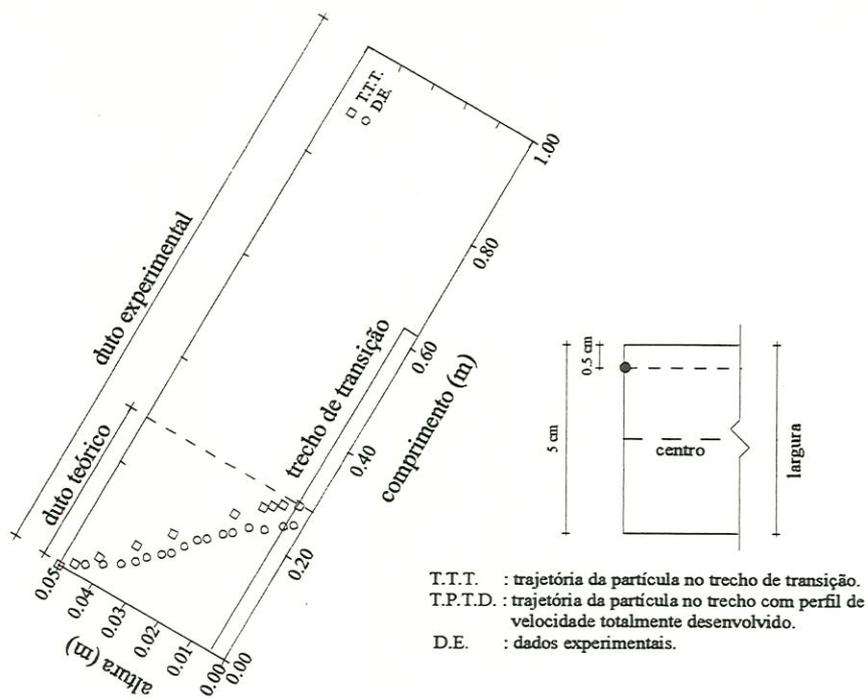


FIGURA B.81 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,05 \text{ m}$ $De = 0,05 \text{ m}$ $lr = 0,62 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 165,34$



HICKS B. - Toronto, Ontario, Canada
1900-1910
1900-1910

ANEXO C





Tabela C.1 - Descrição das Figuras do duto 5X10 cm²

Velocidade sedimentação cm/min	Velocidade escoamento cm/min	5 cm	3,5 cm	1,5 cm	1,0 cm
(1) 2,24	30	Figura C.1	Figura C.2	Figura C.3	Figura C.4
	25	Figura C.5	Figura C.6	Figura C.7	Figura C.8
	20	Figura C.9	Figura C.10	Figura C.11	Figura C.12
(2) 5,20	30	Figura C.13	Figura C.14	Figura C.15	Figura C.16
	25	Figura C.17	Figura C.18	Figura C.19	Figura C.20
	20	Figura C.21	Figura C.22	Figura C.23	Figura C.24
(3) 3,32	30	Figura C.25	Figura C.26	Figura C.27	Figura C.28
	25	Figura C.29	Figura C.30	Figura C.31	Figura C.32
	20	Figura C.33	Figura C.34	Figura C.35	Figura C.36
(4) 3,50	30	Figura C.37	Figura C.38	Figura C.39	Figura C.40
	25	Figura C.41	Figura C.42	Figura C.43	Figura C.44
	20	Figura C.45	Figura C.46	Figura C.47	Figura C.48
(5) 2,72	30	Figura C.49	Figura C.50	Figura C.51	Figura C.52
	25	Figura C.53	Figura C.54	Figura C.55	Figura C.56
	20	Figura C.57	Figura C.58	Figura C.59	Figura C.60
(6) 3,56	30	Figura C.61	Figura C.62	Figura C.63	Figura C.64
	25	Figura C.65	Figura C.66	Figura C.67	Figura C.68
	20	Figura C.69	Figura C.70	Figura C.71	Figura C.72
(7) 4,52	30	Figura C.73	Figura C.74	Figura C.75	Figura C.76
	25	Figura C.77	Figura C.78	Figura C.79	Figura C.80
	20	Figura C.81	Figura C.82	Figura C.83	Figura C.84
(8) 4,48	30	Figura C.85	Figura C.86	Figura C.87	Figura C.88
	25	Figura C.89	Figura C.90	Figura C.91	Figura C.92
	20	Figura C.93	Figura C.94	Figura C.95	Figura C.96
(9) 3,93	30	Figura C.97	Figura C.98	Figura C.99	Figura C.100
	25	Figura C.101	Figura C.102	Figura C.103	Figura C.104
	20	Figura C.105	Figura C.106	Figura C.107	Figura C.108

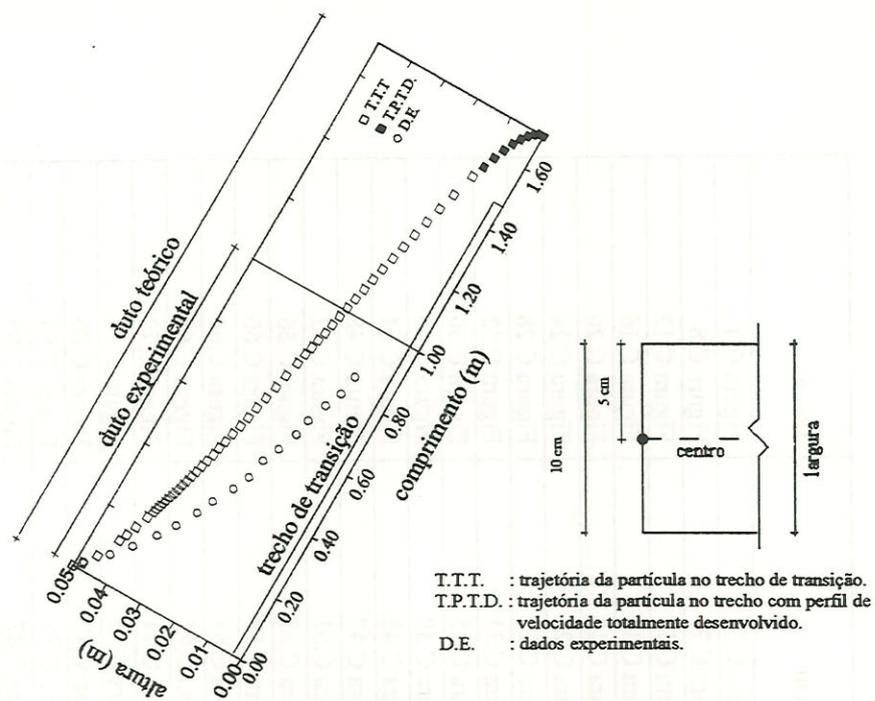


FIGURA C.1 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

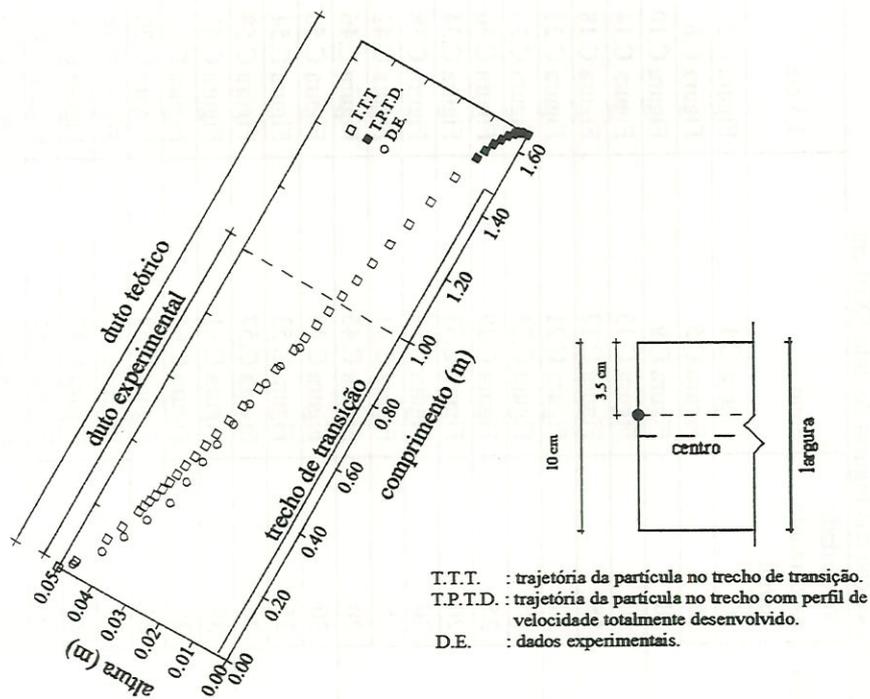


FIGURA C.2 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

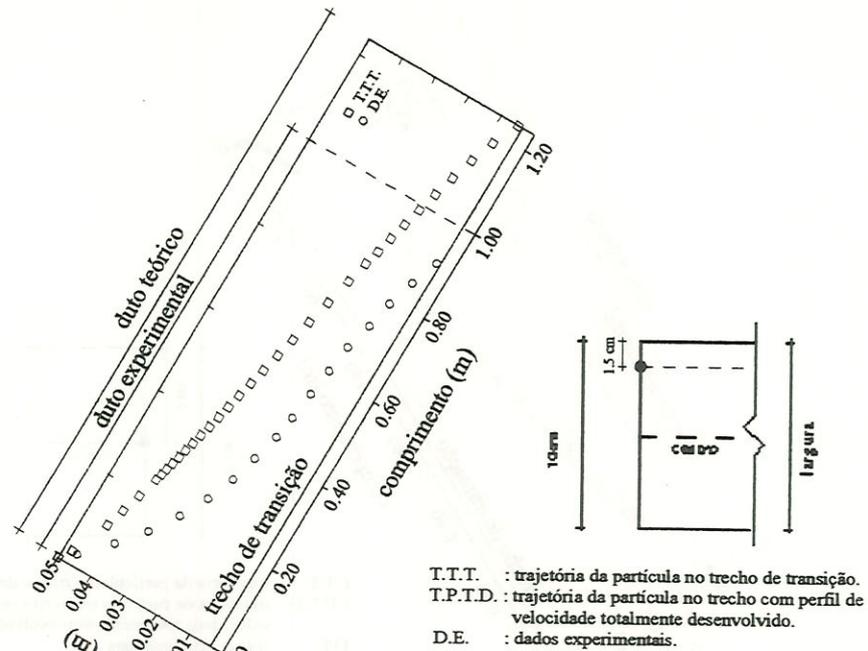


FIGURA C.3 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

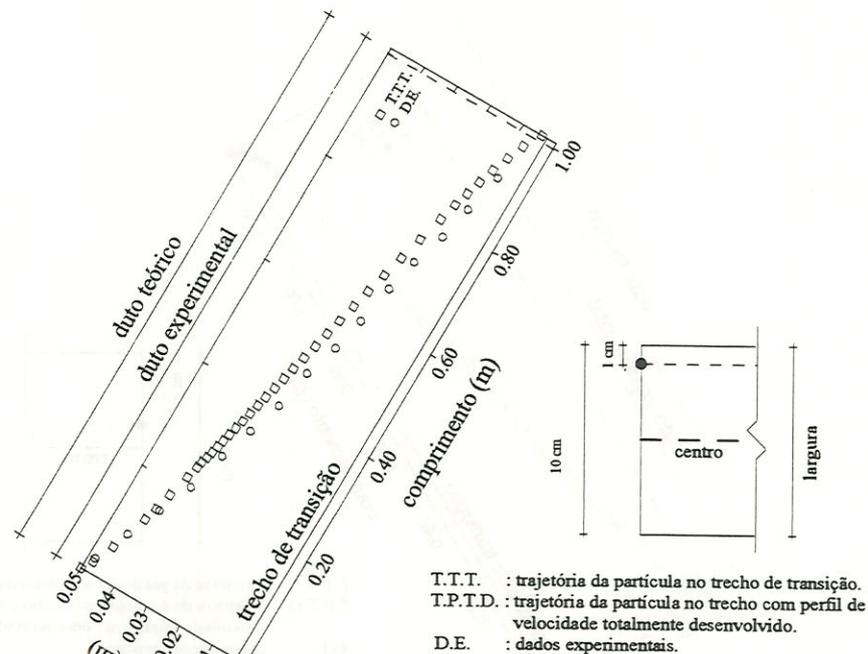


FIGURA C.4 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

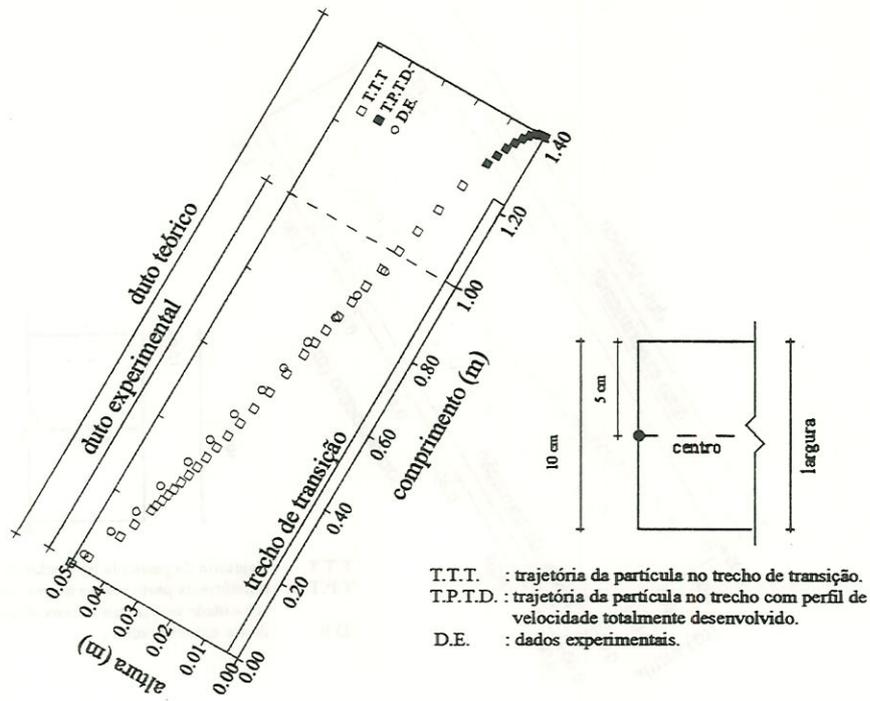


FIGURA C.5 – Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

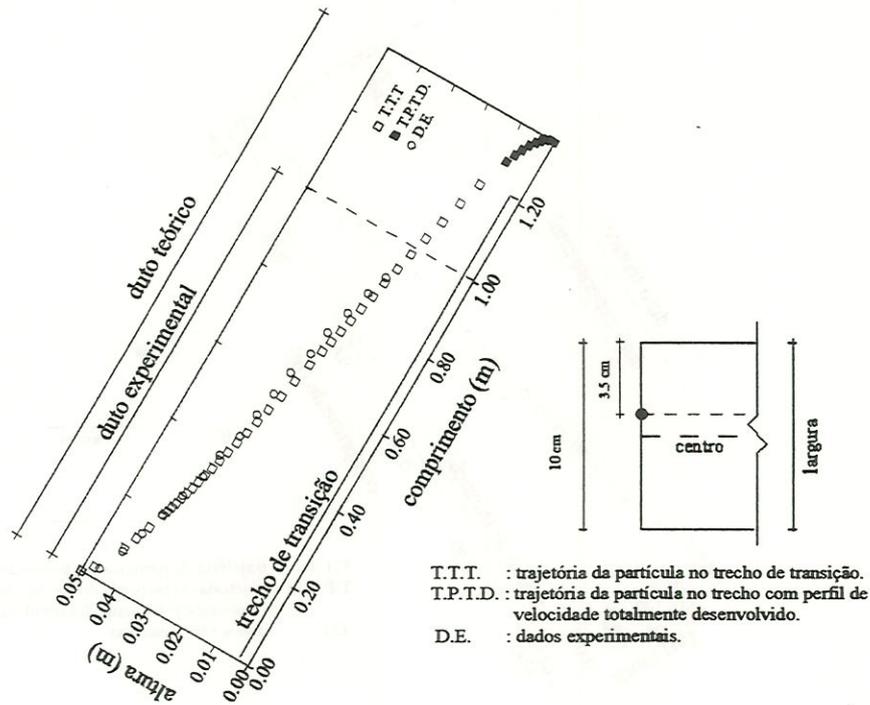


FIGURA C.6 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

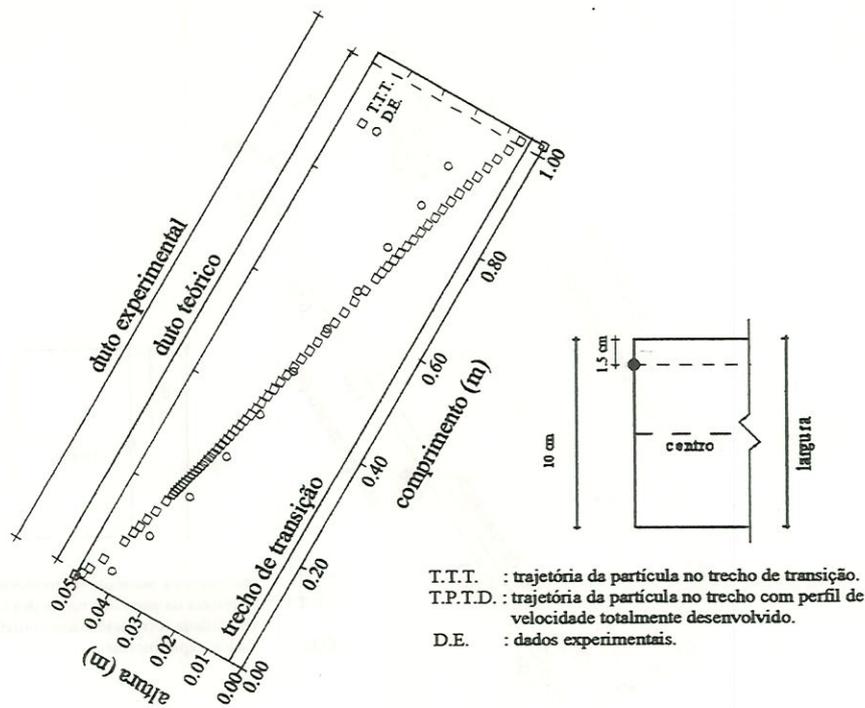


FIGURA C.7 - Trajetória da partícula 1

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

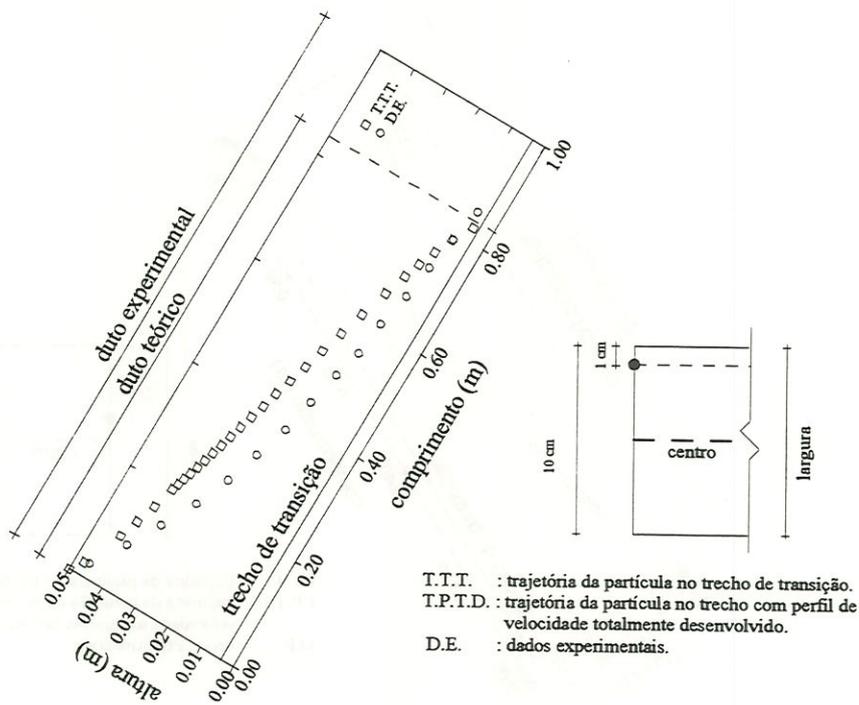


FIGURA C.8 - Trajetória da partícula 1

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

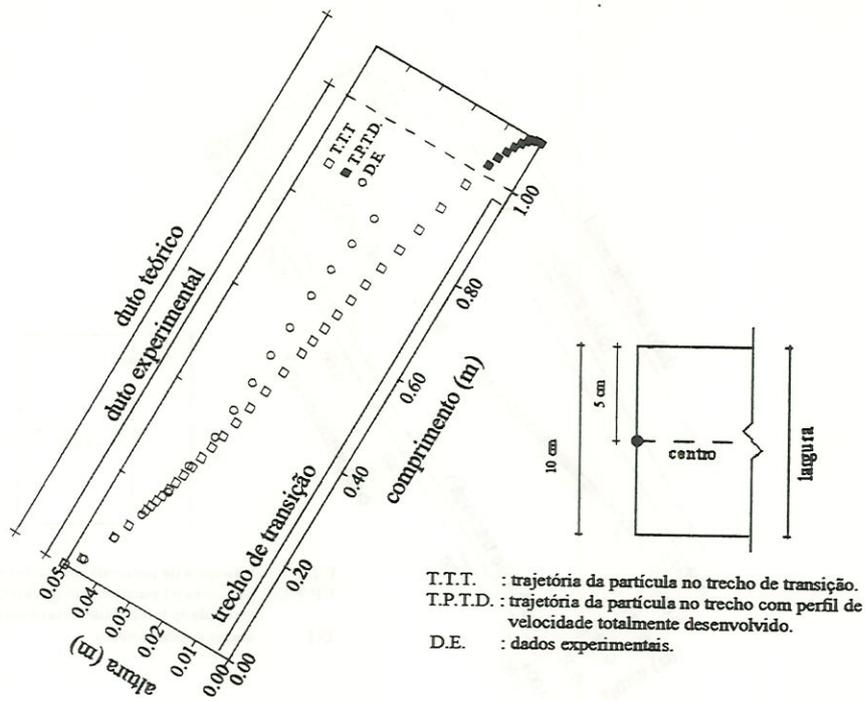


FIGURA C.9 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

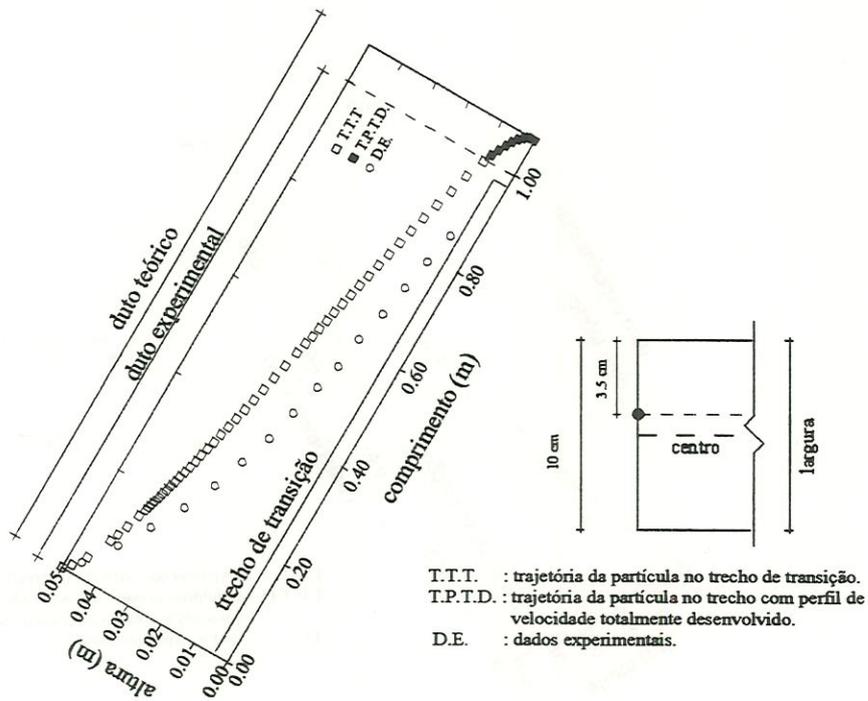


FIGURA C.10 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

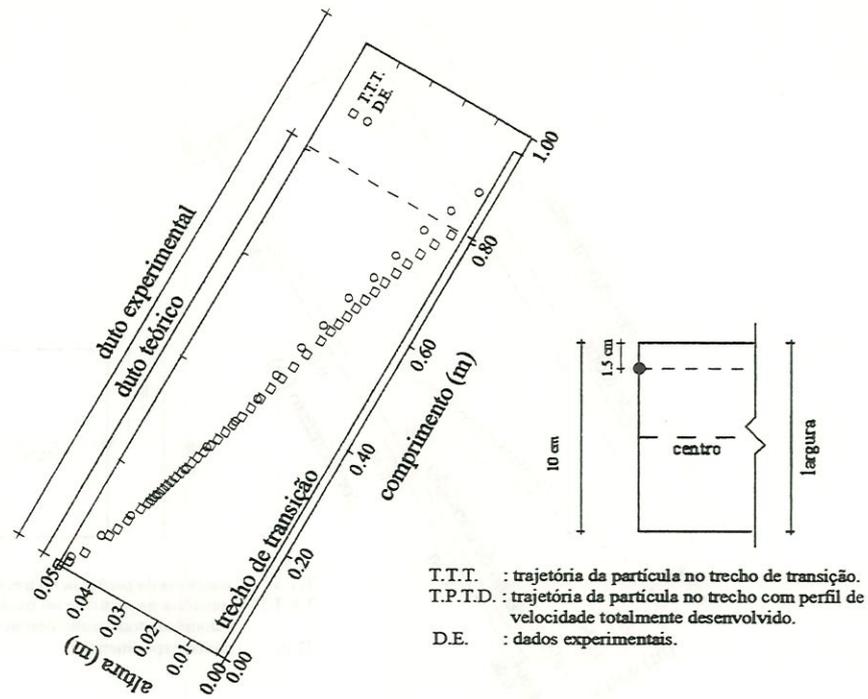


FIGURA C.11 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

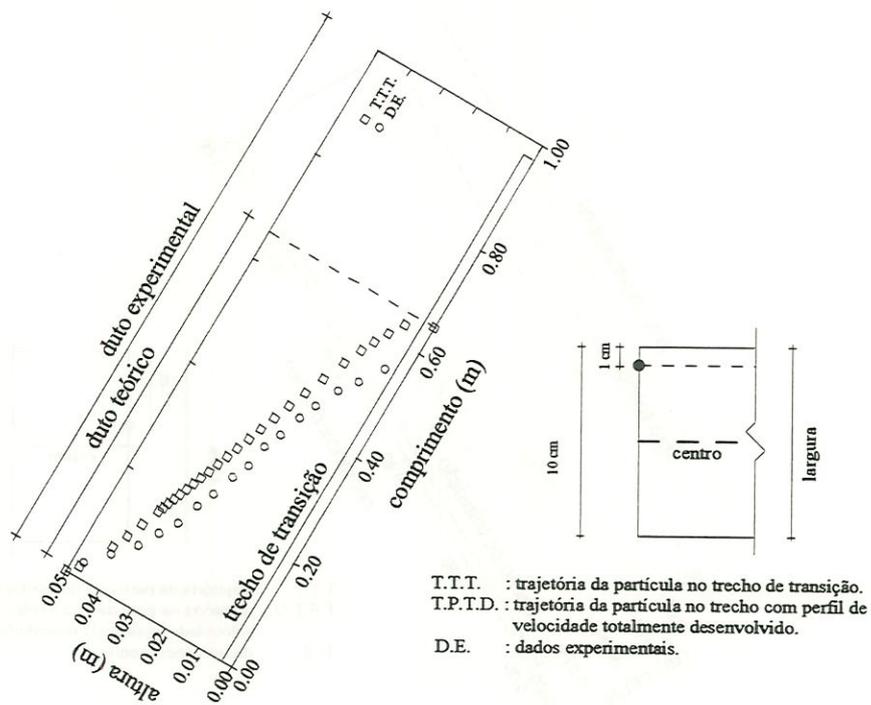


FIGURA C.12 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

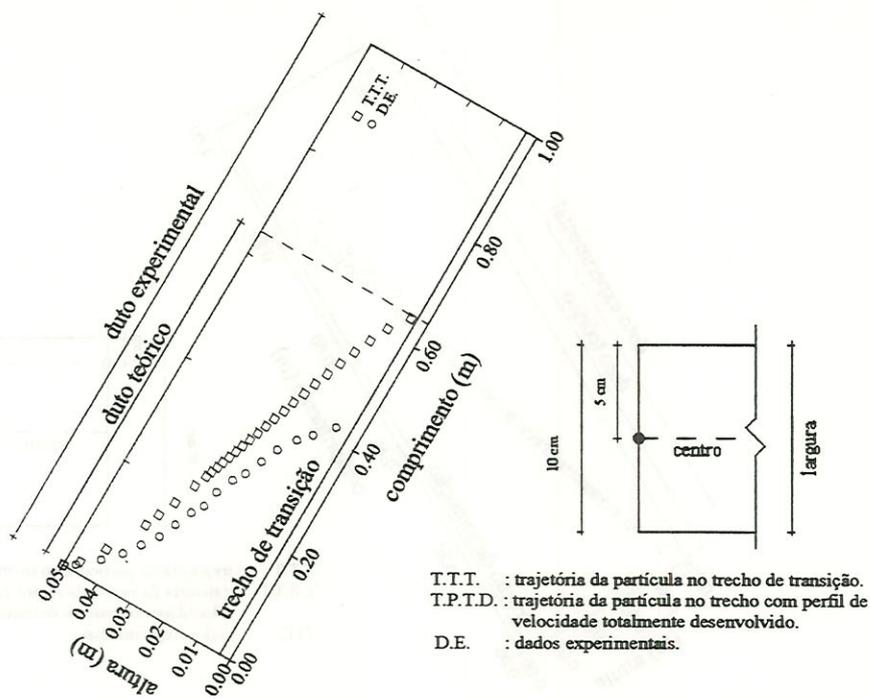


FIGURA C.13 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

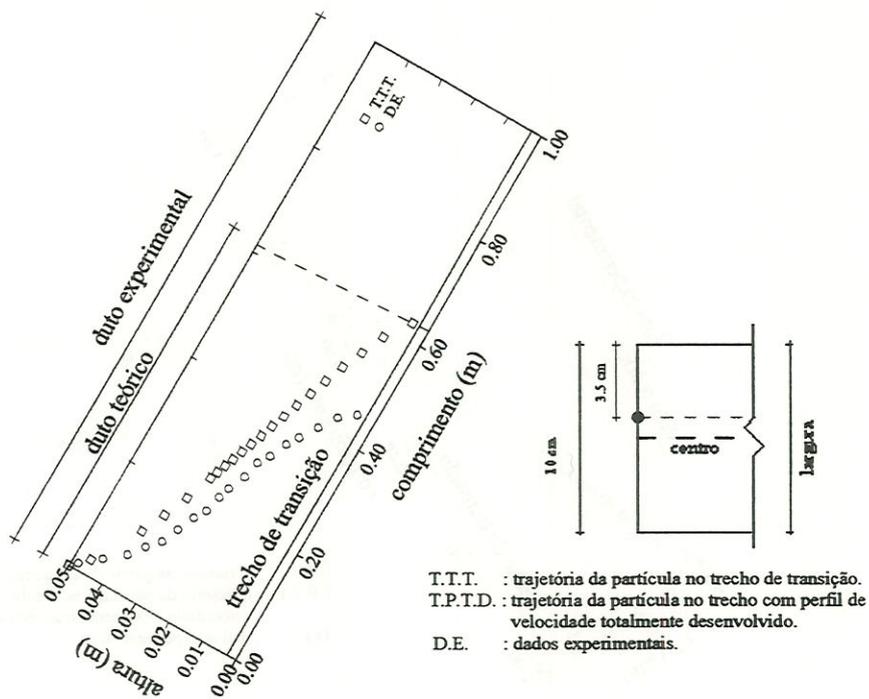


FIGURA C.14 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

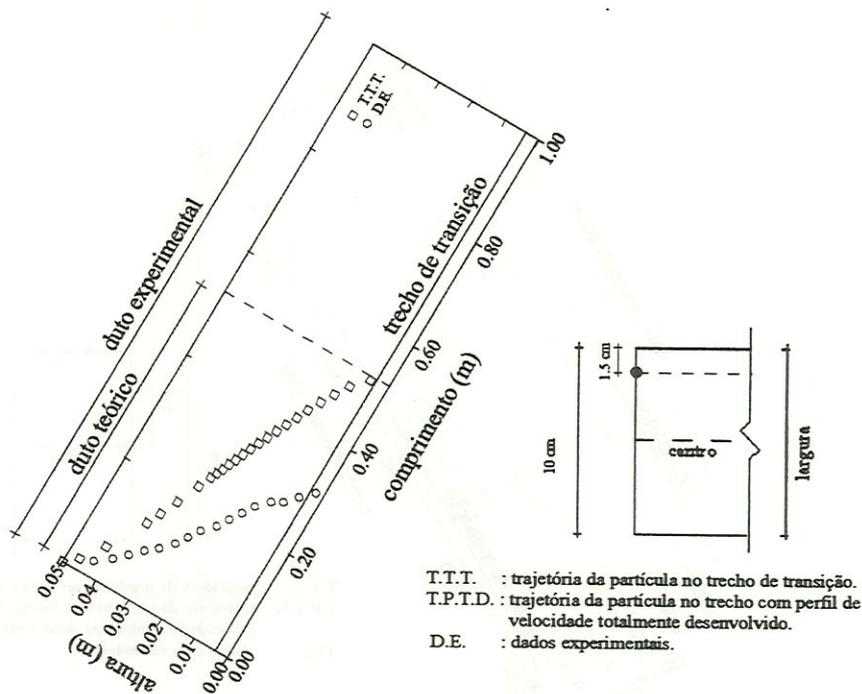


FIGURA C.15 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

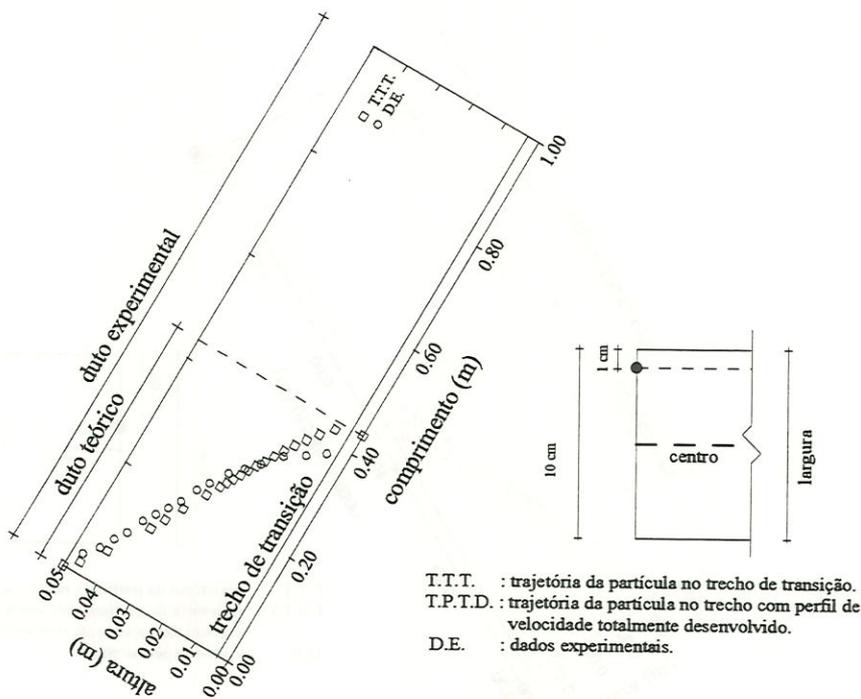


FIGURA C.16 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

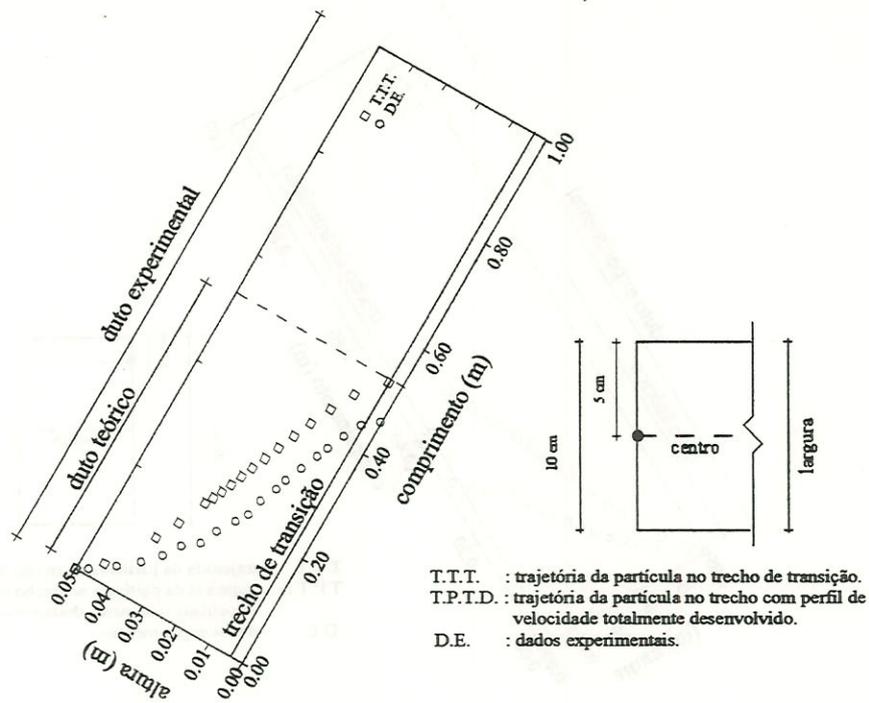


FIGURA C.17 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

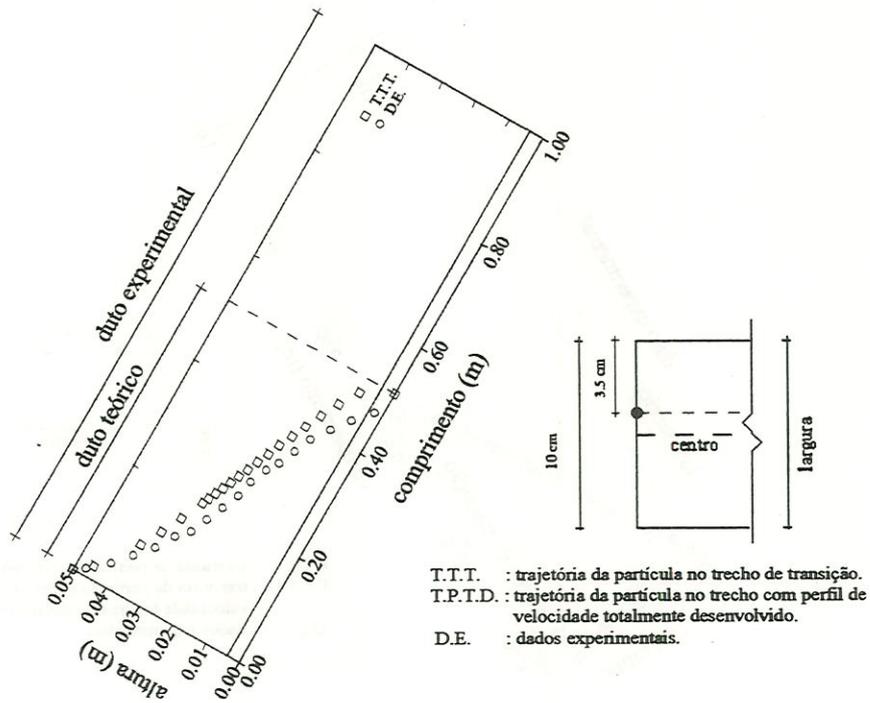


FIGURA C.18 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

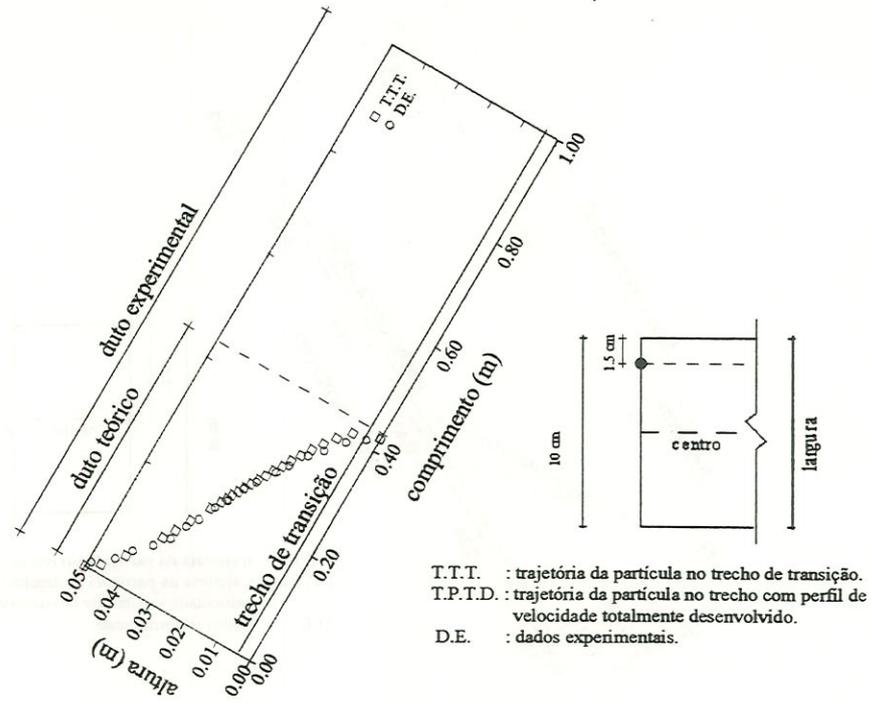


FIGURA C.19 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

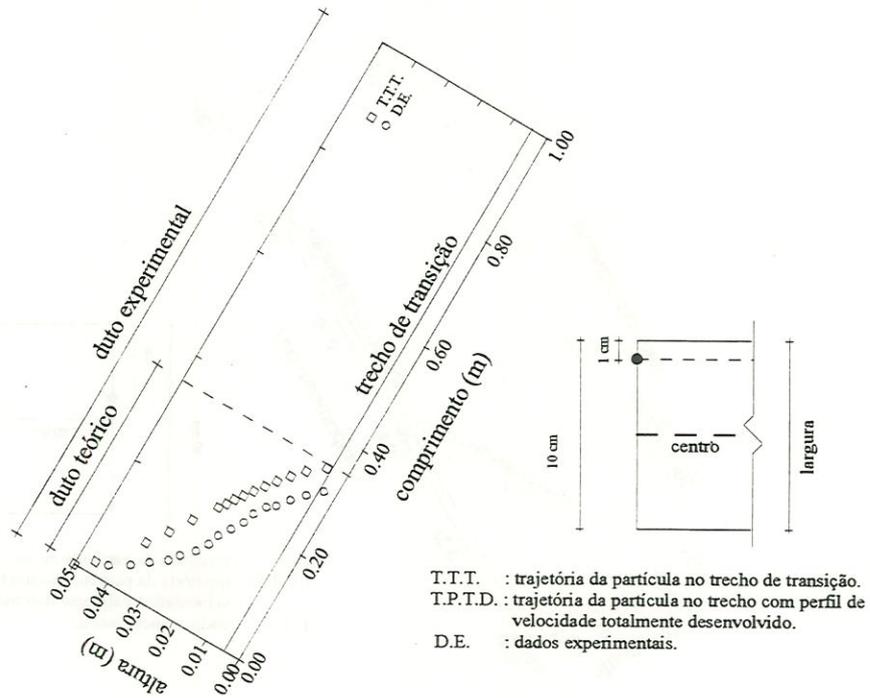


FIGURA C.20 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,2 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

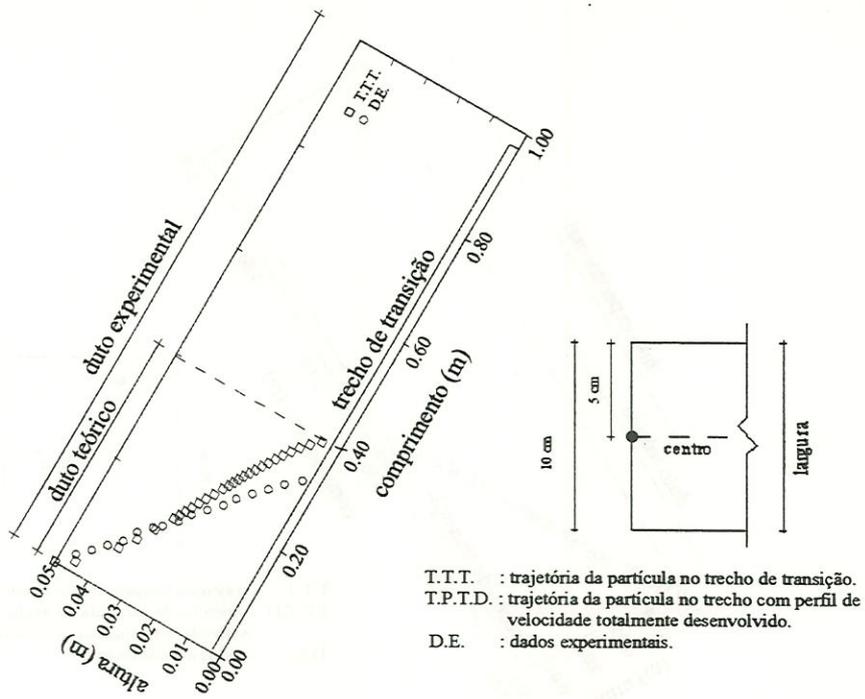


FIGURA C.21 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,2 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

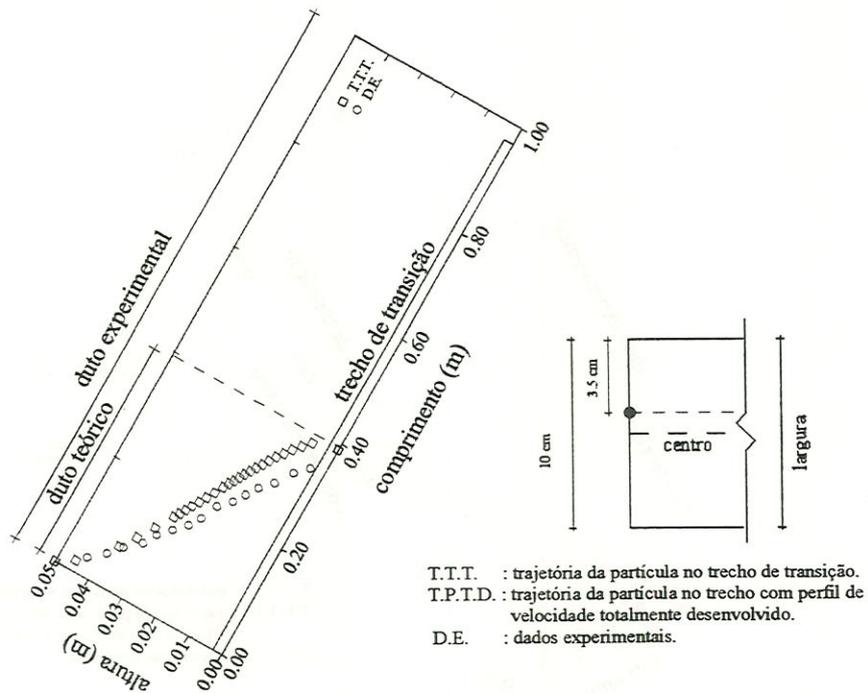


FIGURA C.22 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

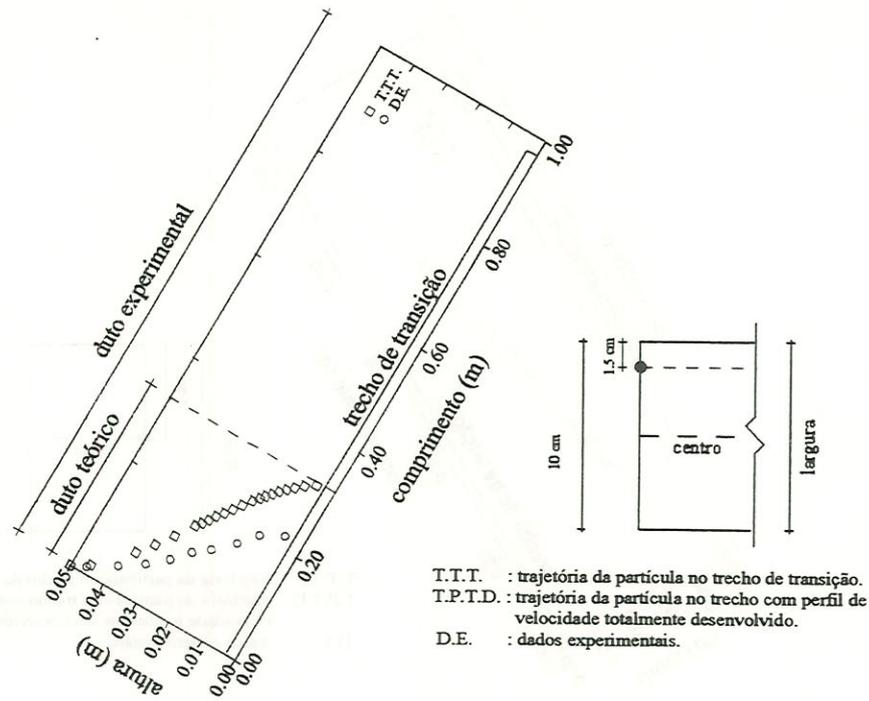


FIGURA C.23 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 0,97$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 5,2$ cm/min $Re = 220,46$

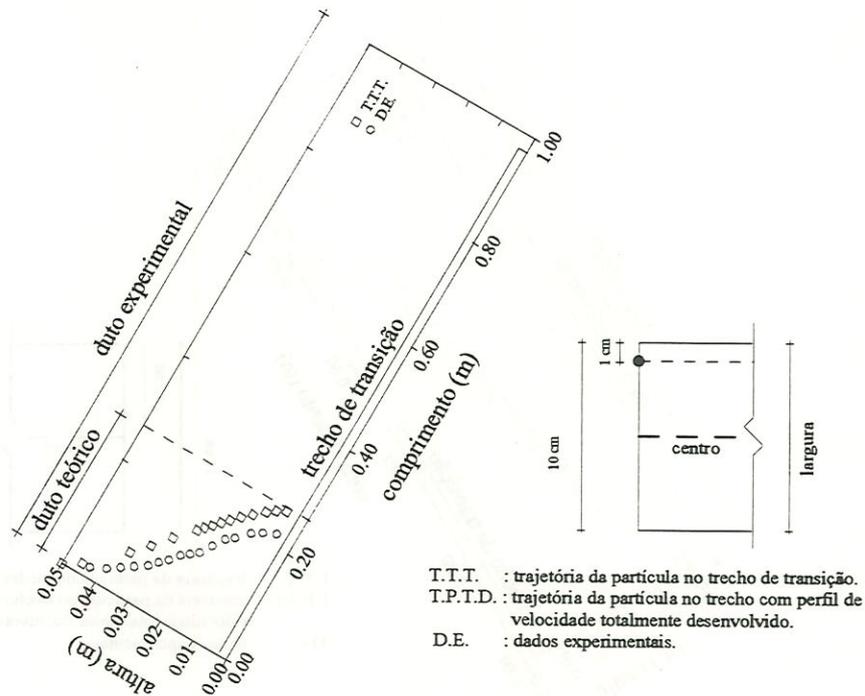


FIGURA C.24 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 0,97$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 5,20$ cm/min $Re = 220,46$

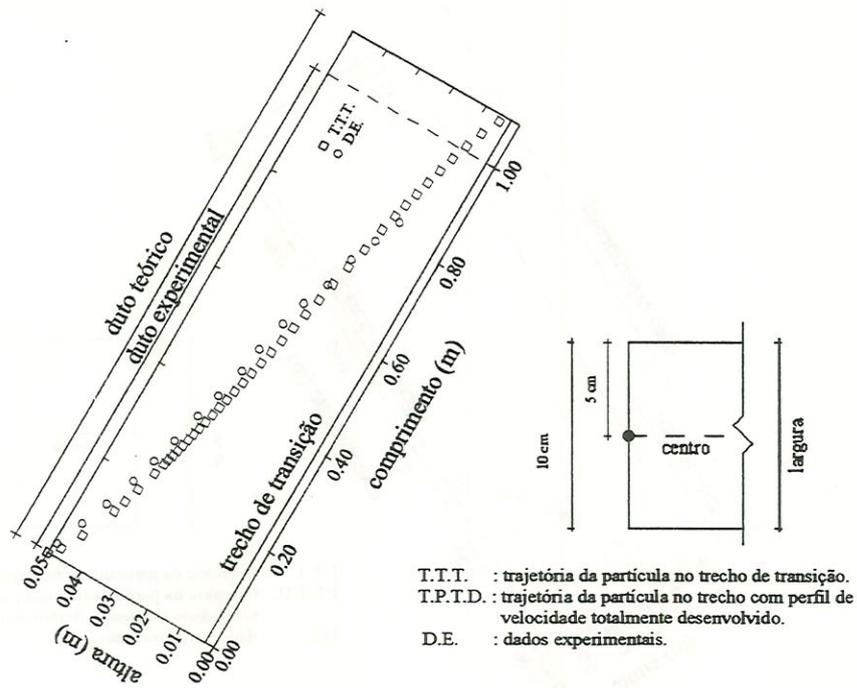


FIGURA C.25 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

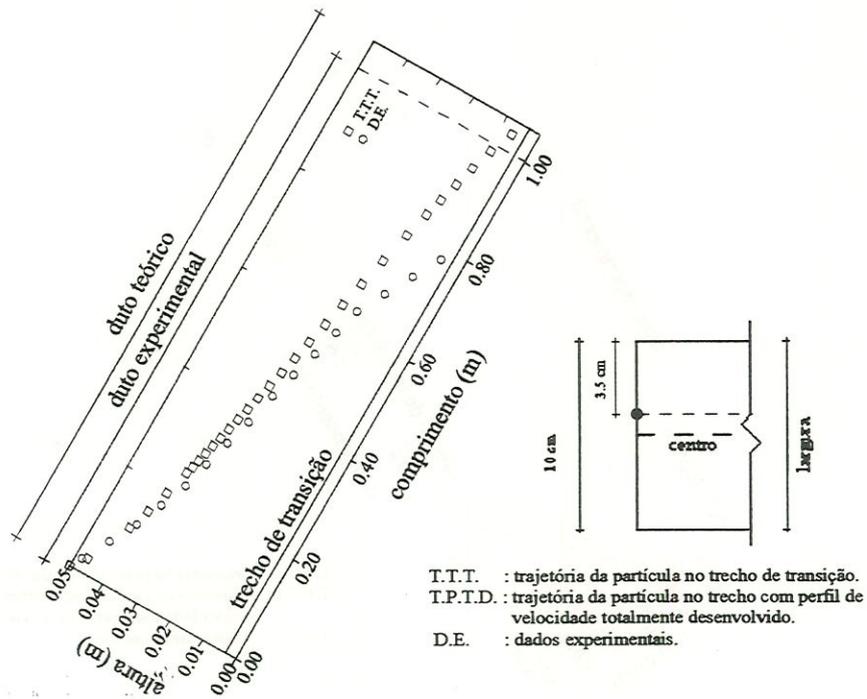


FIGURA C.26 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

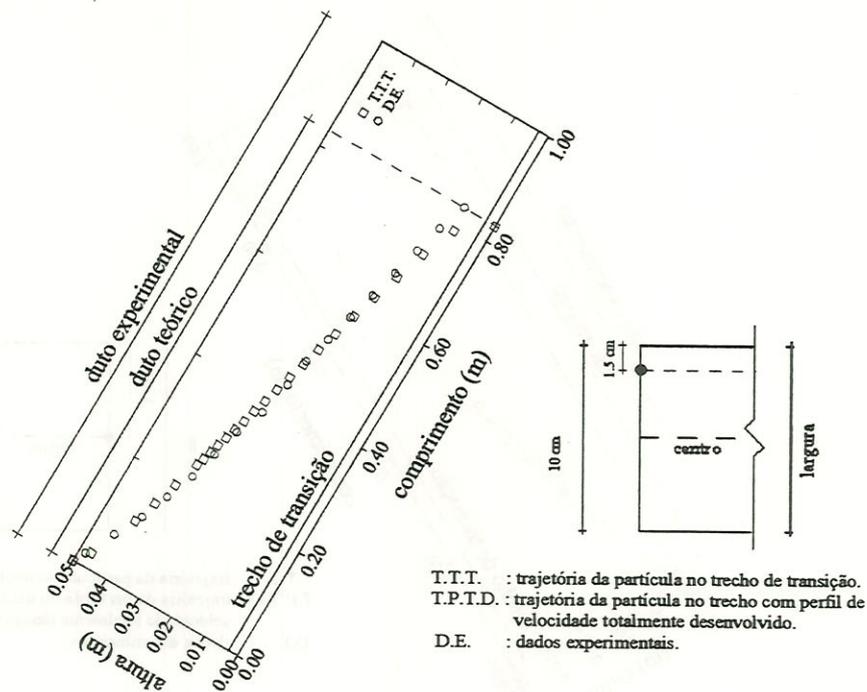


FIGURA C.27 - Trajetória da partícula 3

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

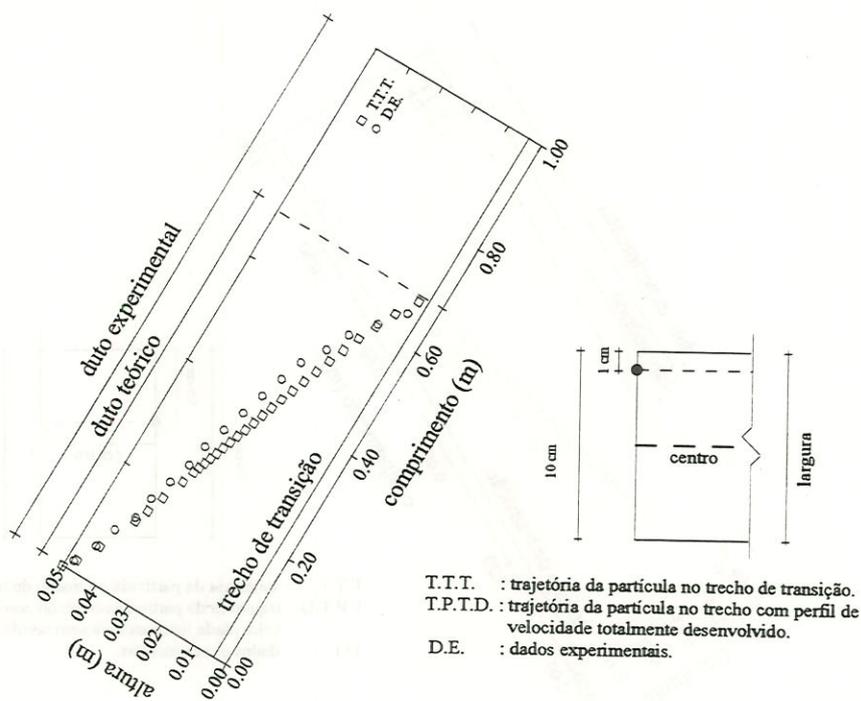


FIGURA C.28 - Trajetória da partícula 3

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

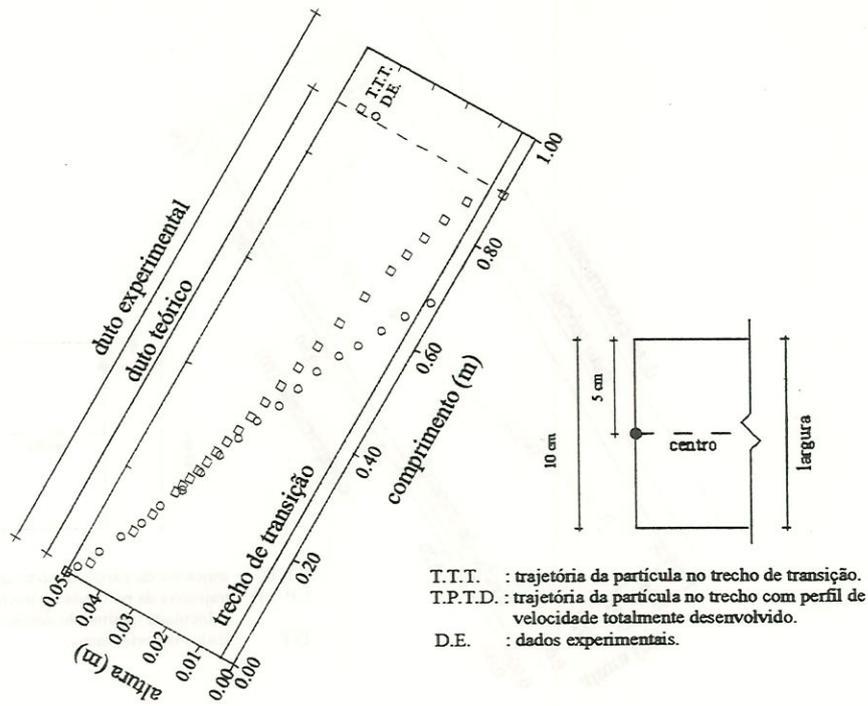


FIGURA C.29 - Trajetória da partícula 3

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

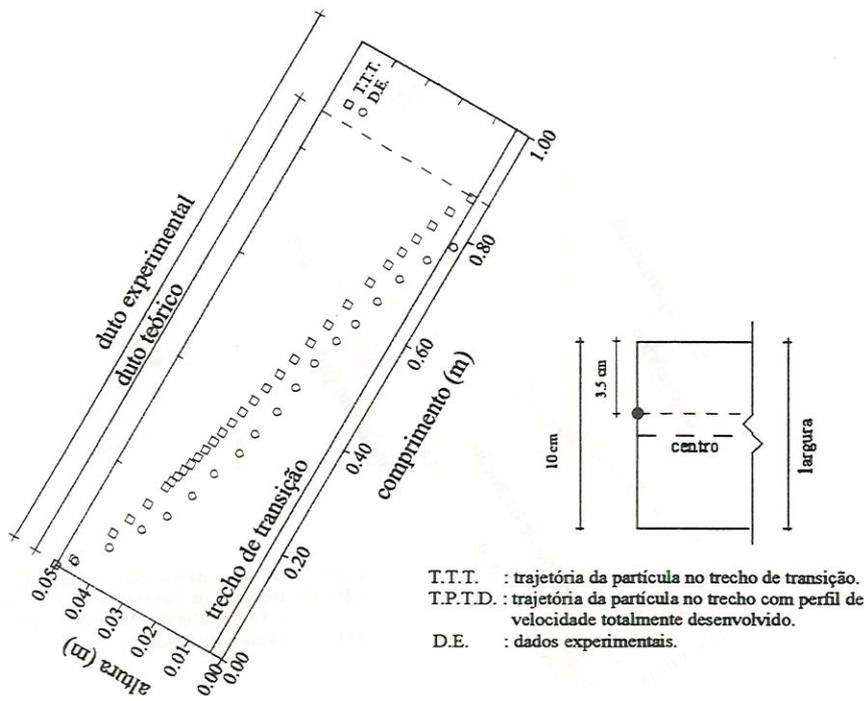


FIGURA C.30 - Trajetória da partícula 3

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

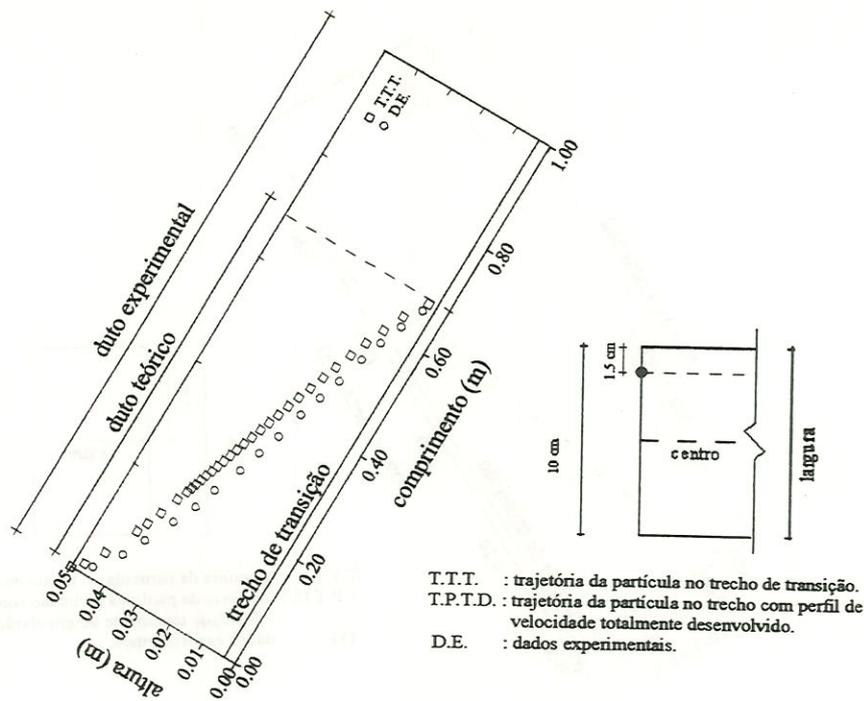


FIGURA C.31 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

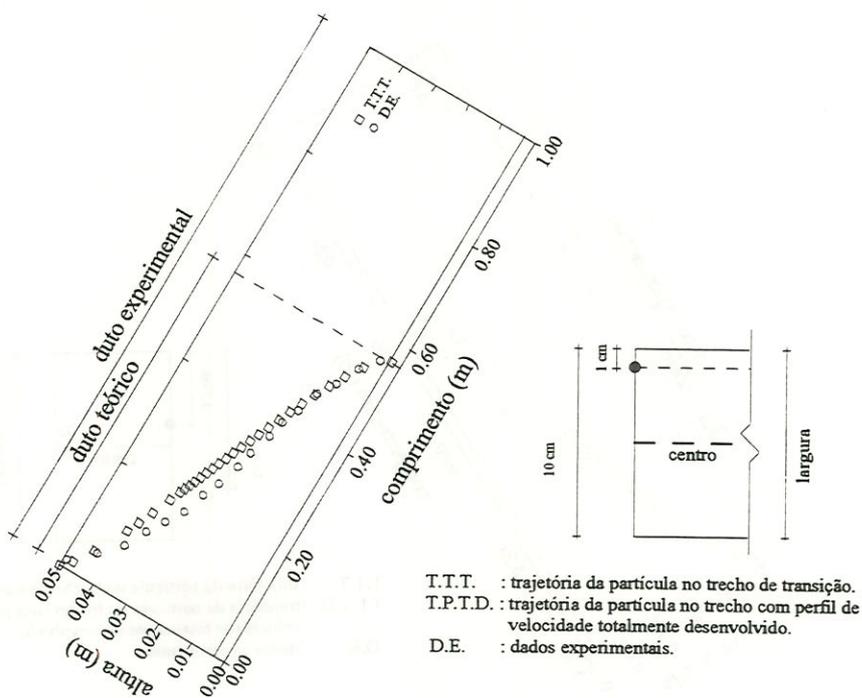


FIGURA C.32 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

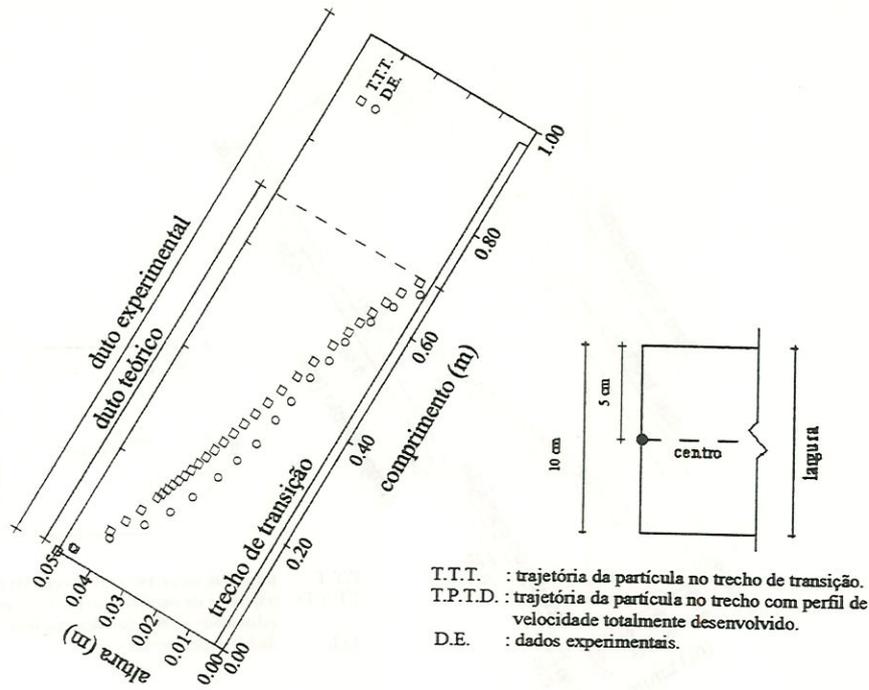


FIGURA C.33 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

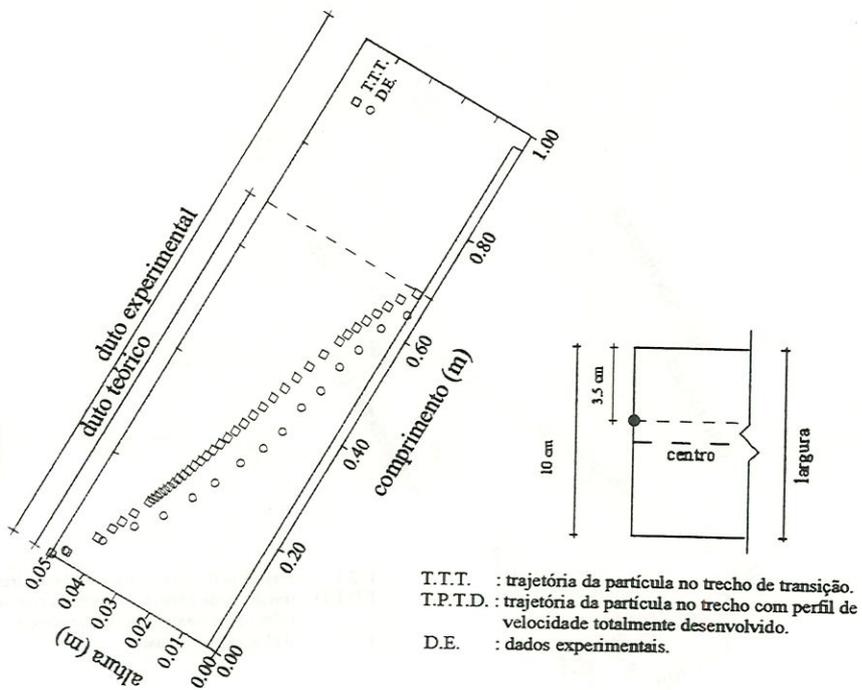


FIGURA C.34 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

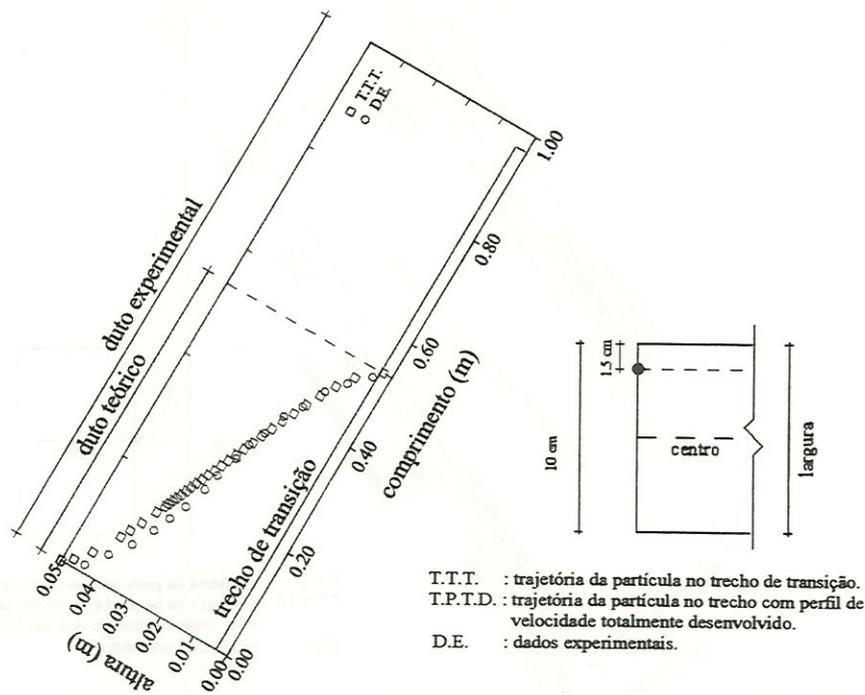


FIGURA C.35 - Trajetória da partícula 3

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

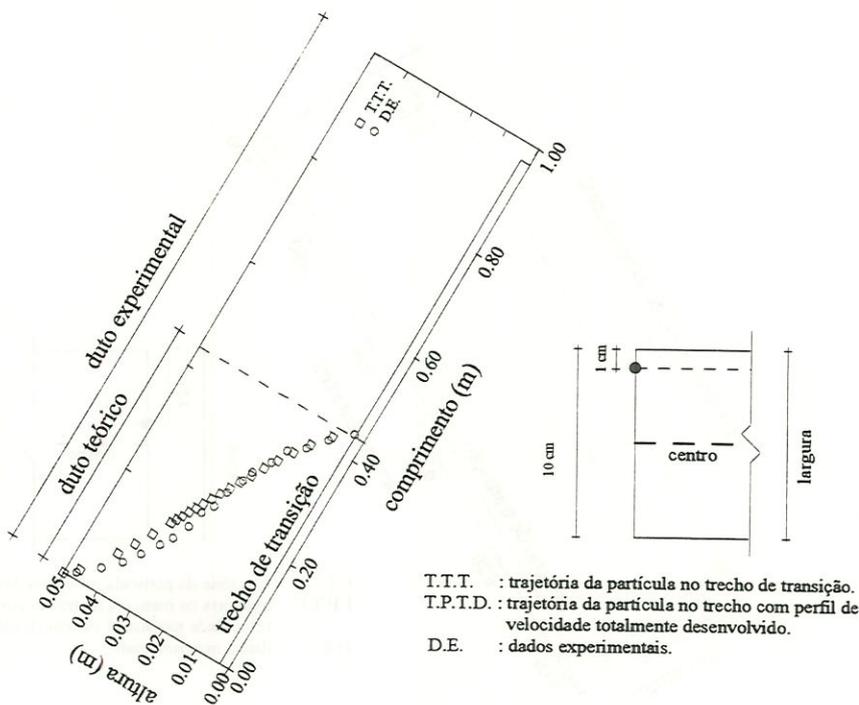


FIGURA C.36 - Trajetória da partícula 3

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

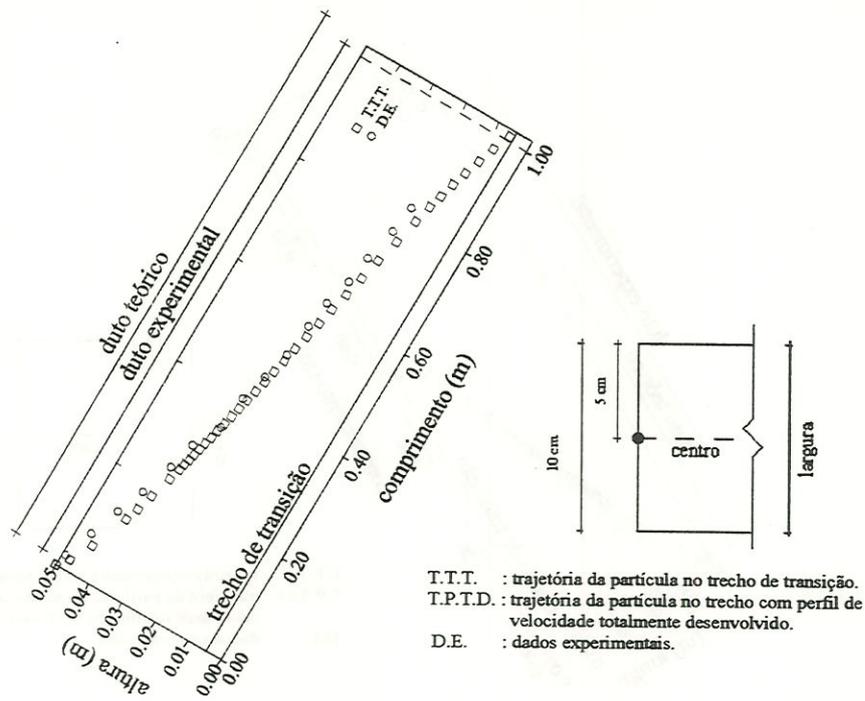


FIGURA C.37 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 1,46$ m
 $V_{em} = 30$ cm/min $V_s = 3,50$ cm/min $Re = 331,02$

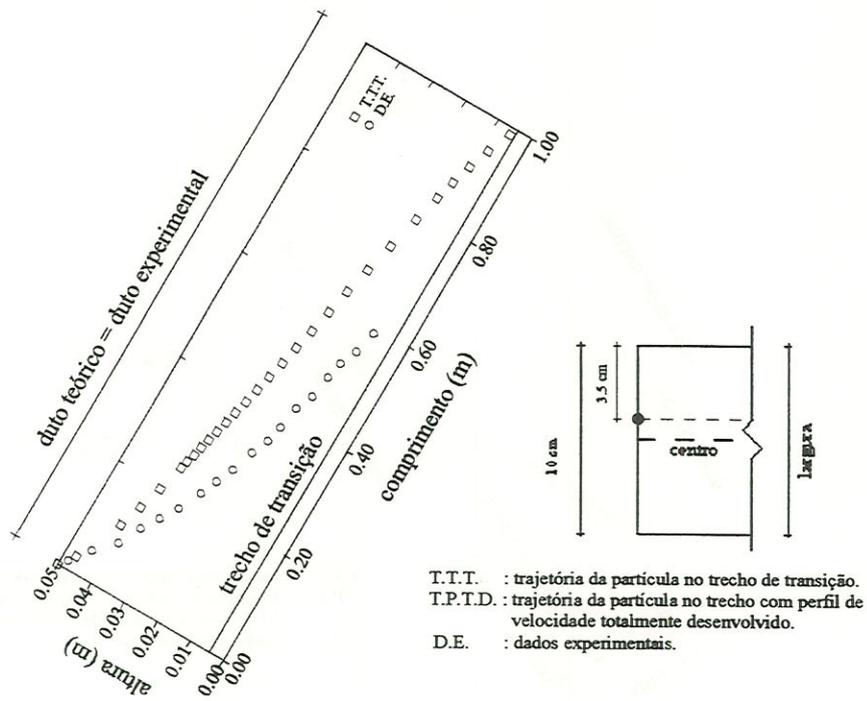


FIGURA C.38 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 1,46$ m
 $V_{em} = 30$ cm/min $V_s = 3,50$ cm/min $Re = 331,02$

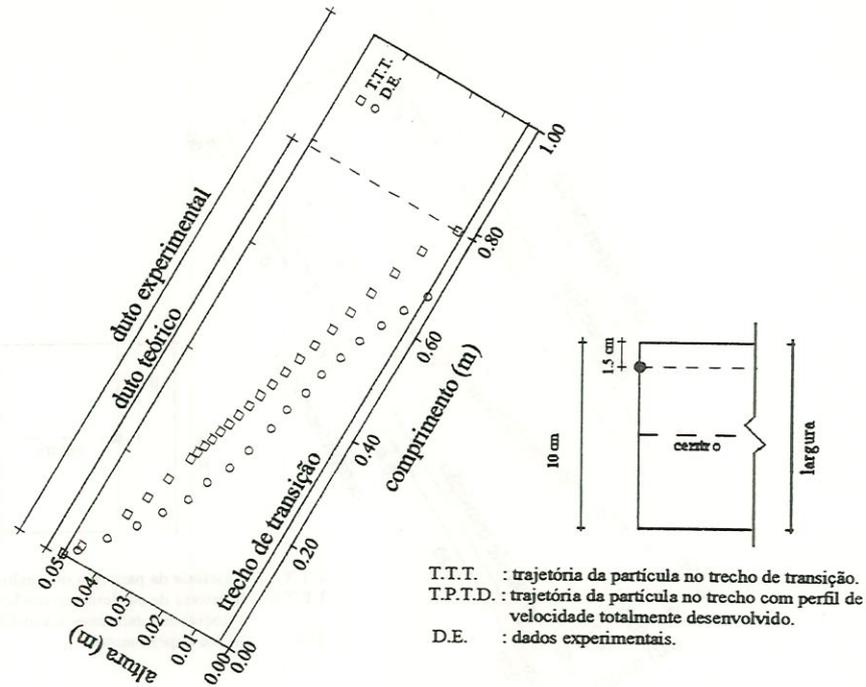


FIGURA C.39 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

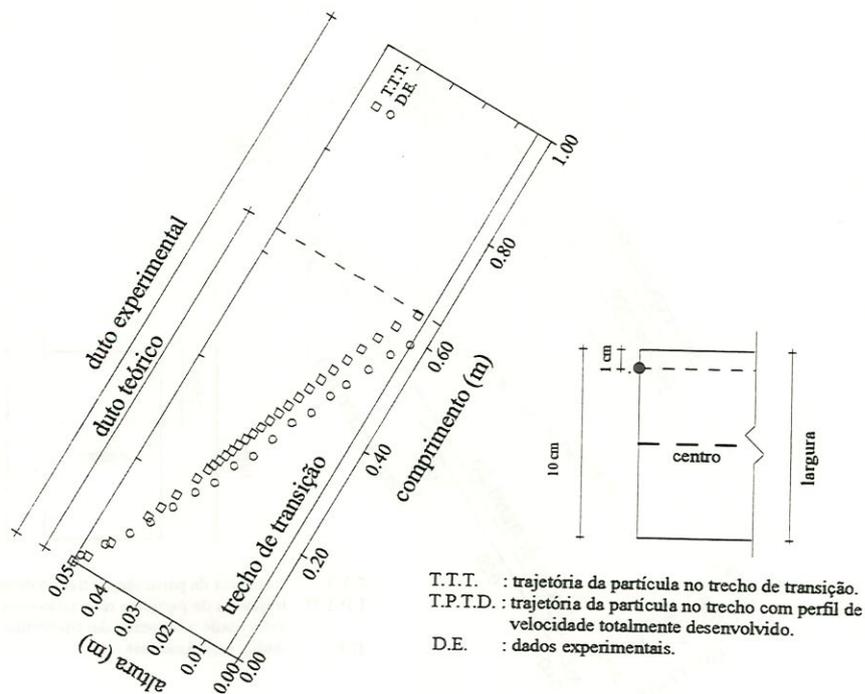


FIGURA C.40 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

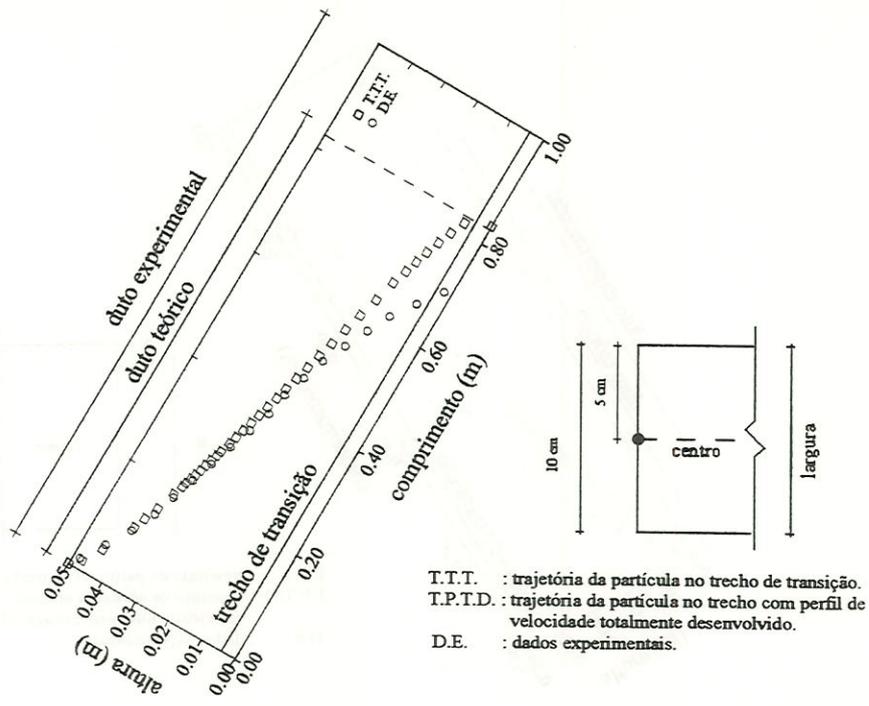


FIGURA C.41 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

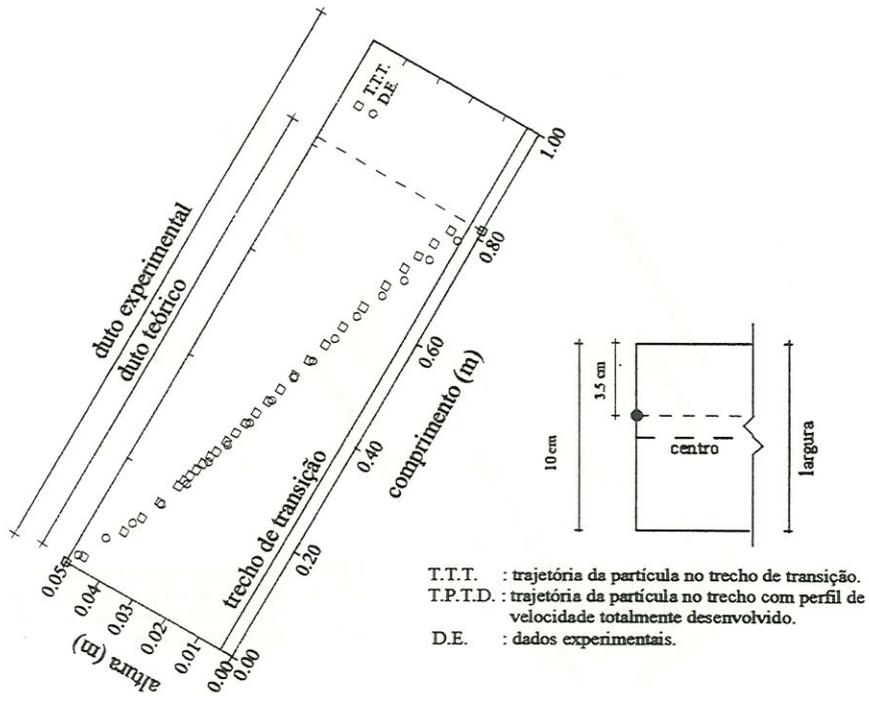


FIGURA C.42 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

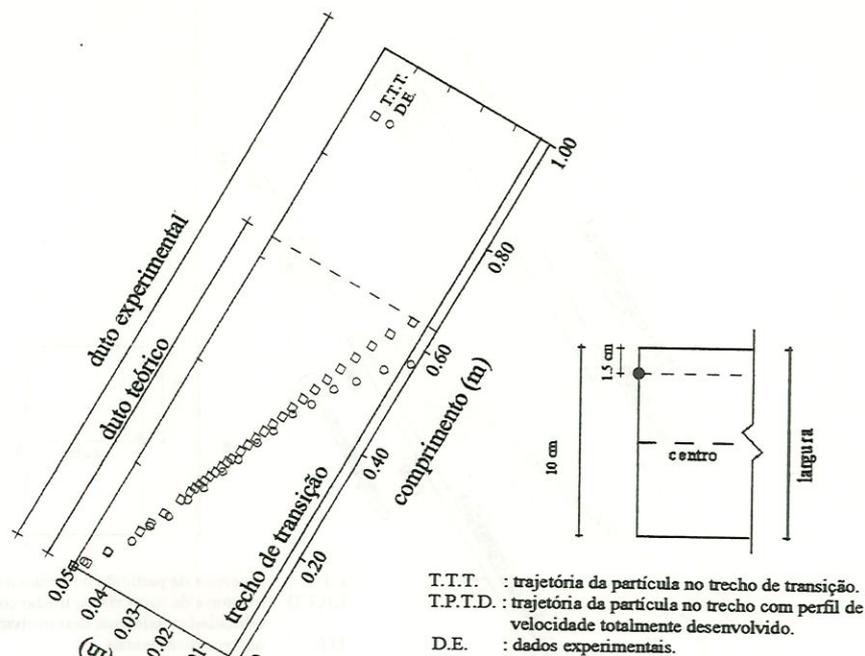


FIGURA C.43 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

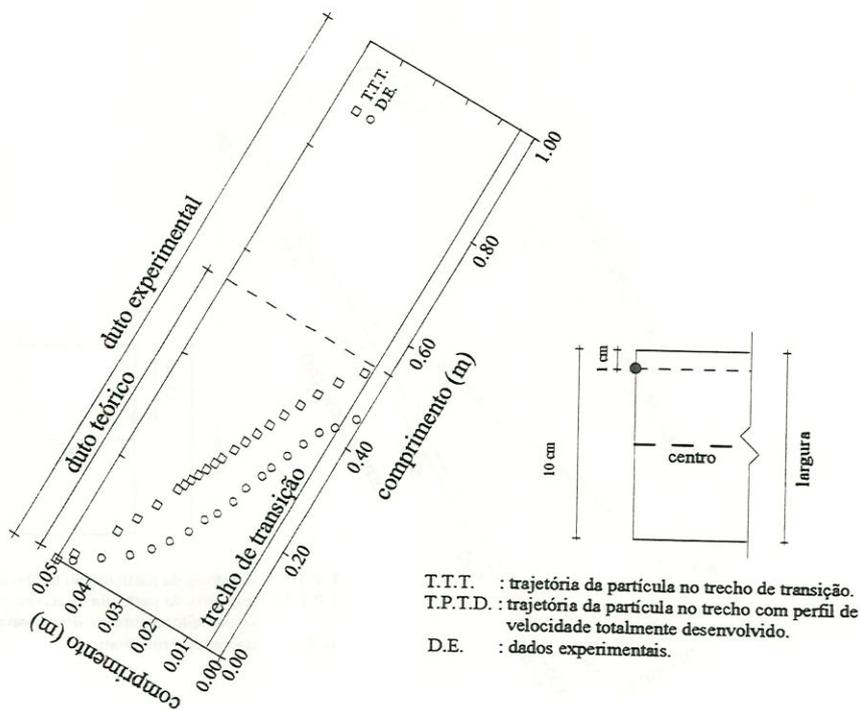


FIGURA C.44 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

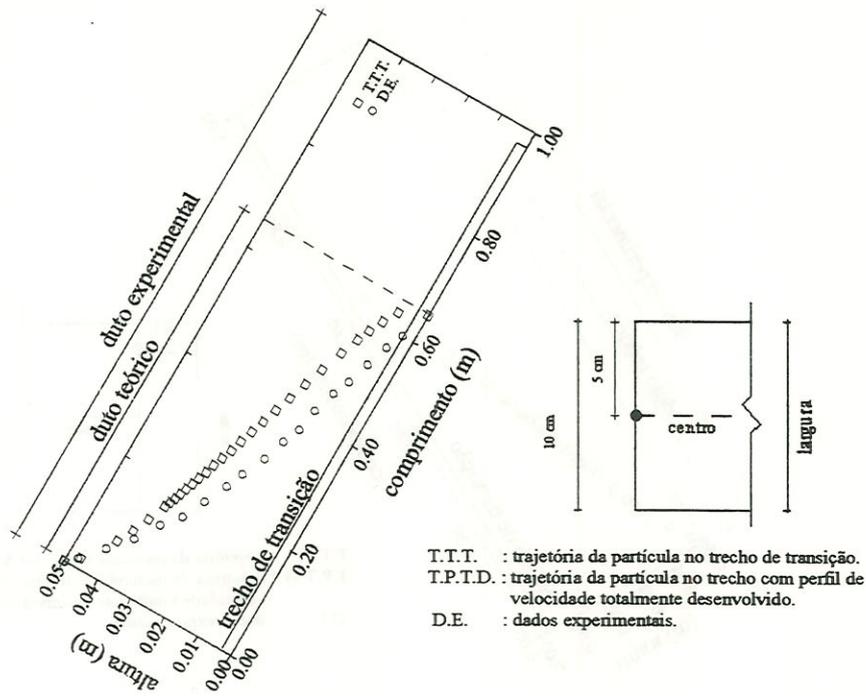


FIGURA C.45 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

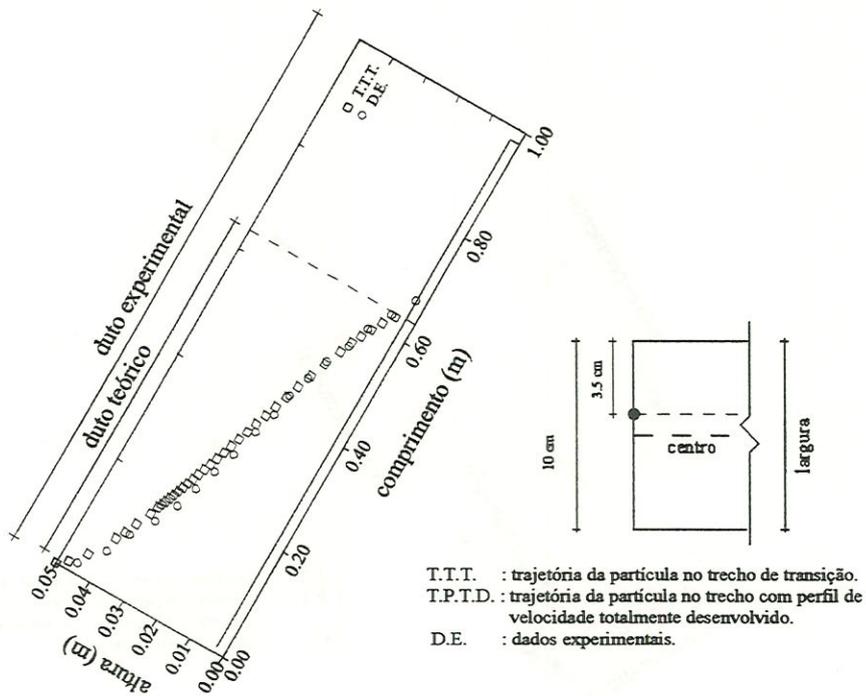


FIGURA C.46 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

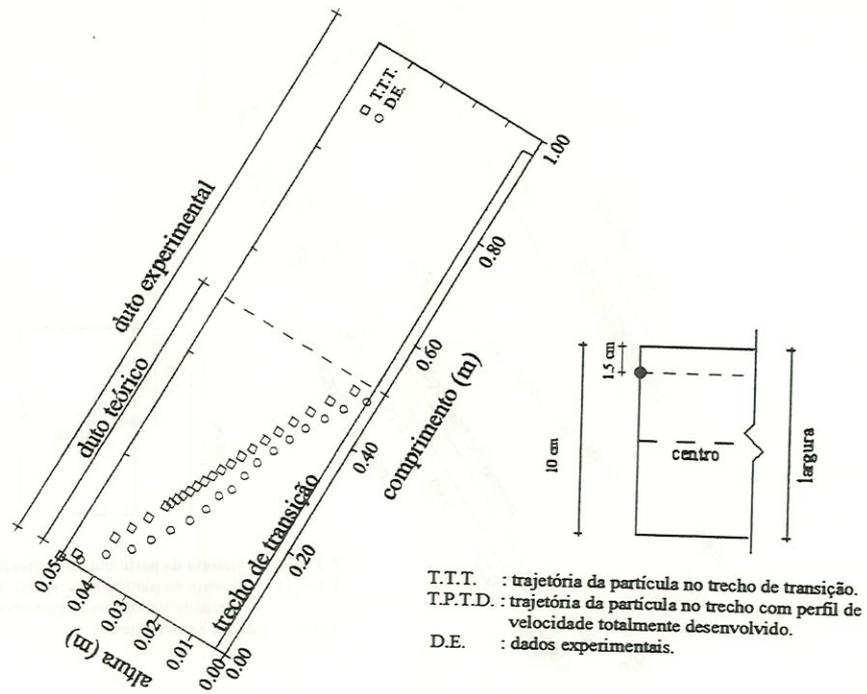


FIGURA C.47 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

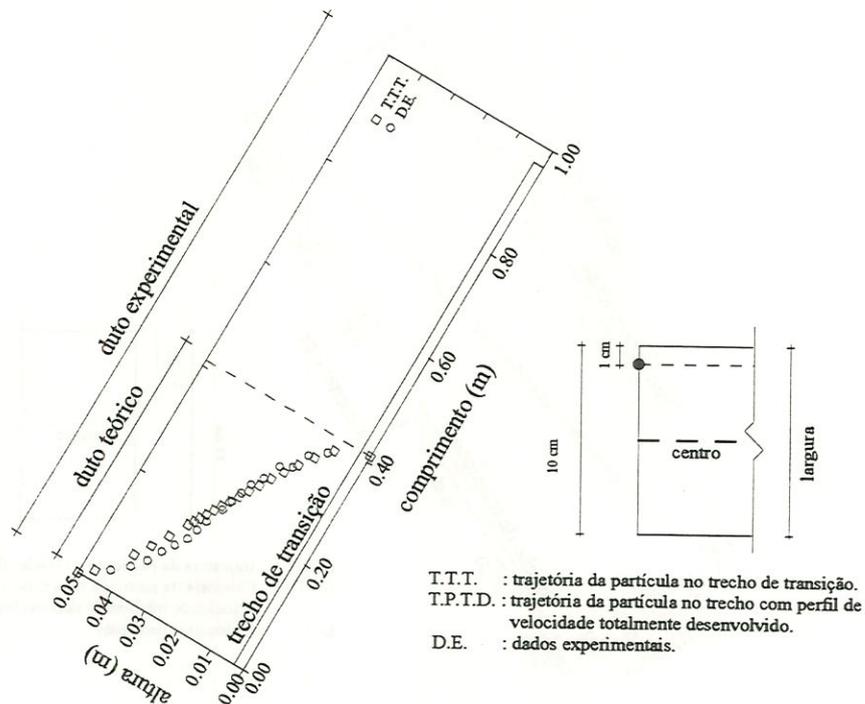


FIGURA C.48 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

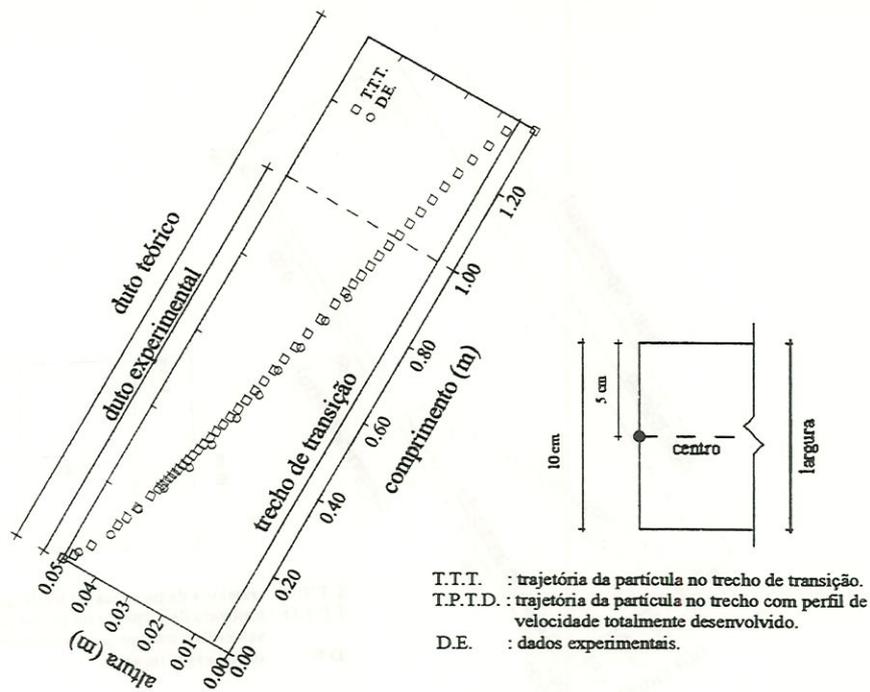


FIGURA C.49 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

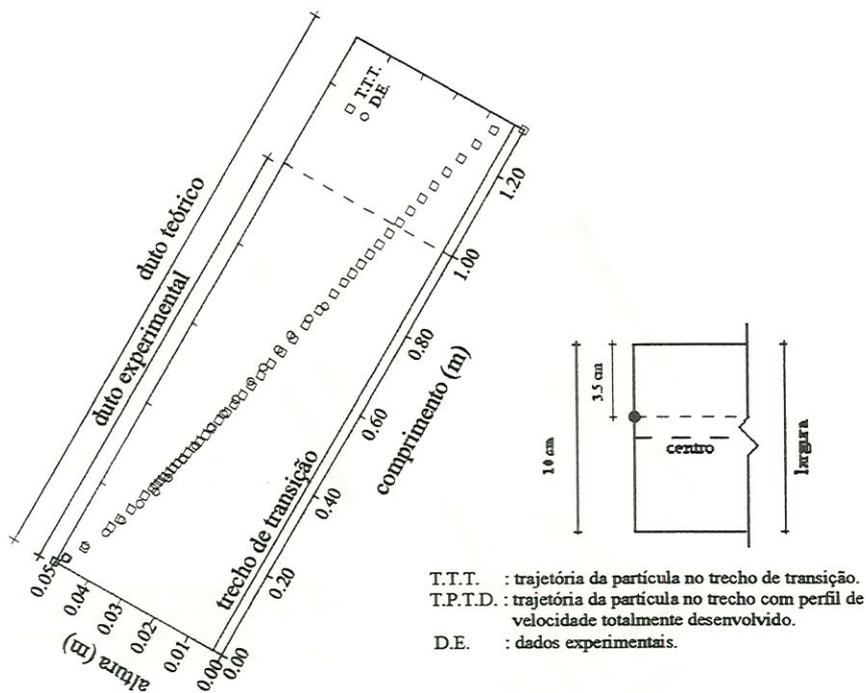


FIGURA C.50 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

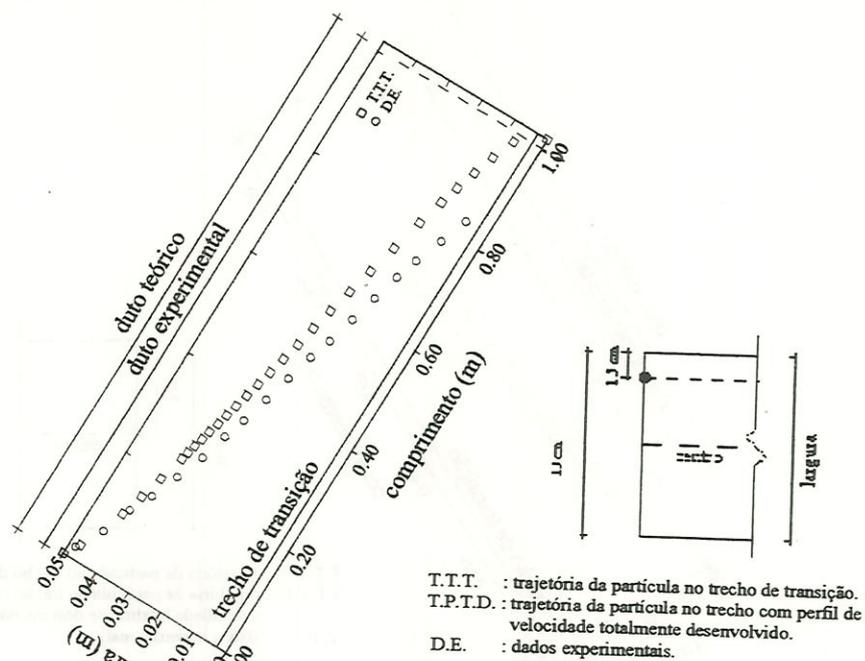


FIGURA C.51 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

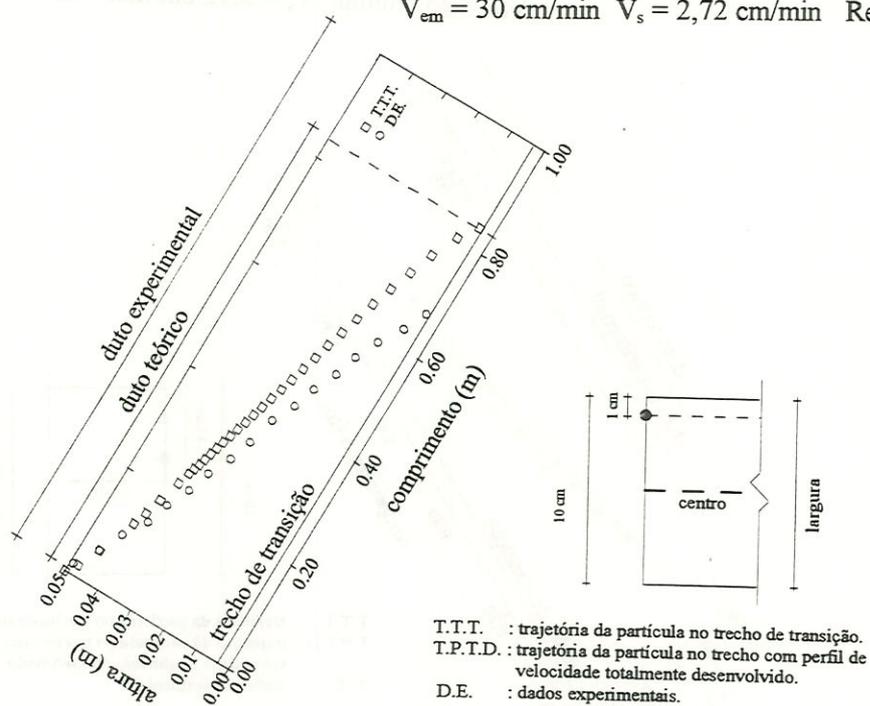


FIGURA C.52 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

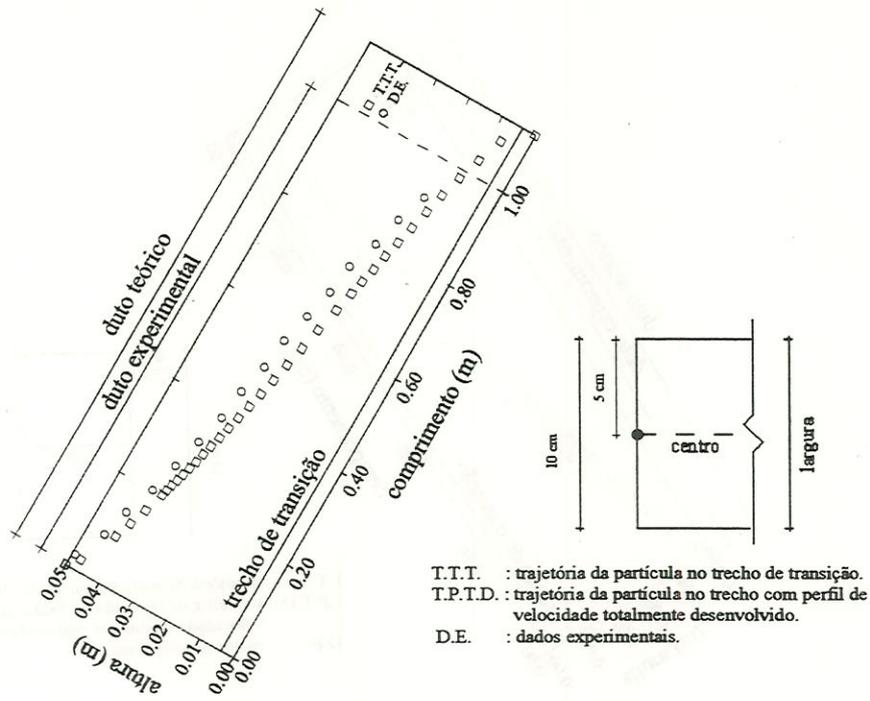


FIGURA C.53 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

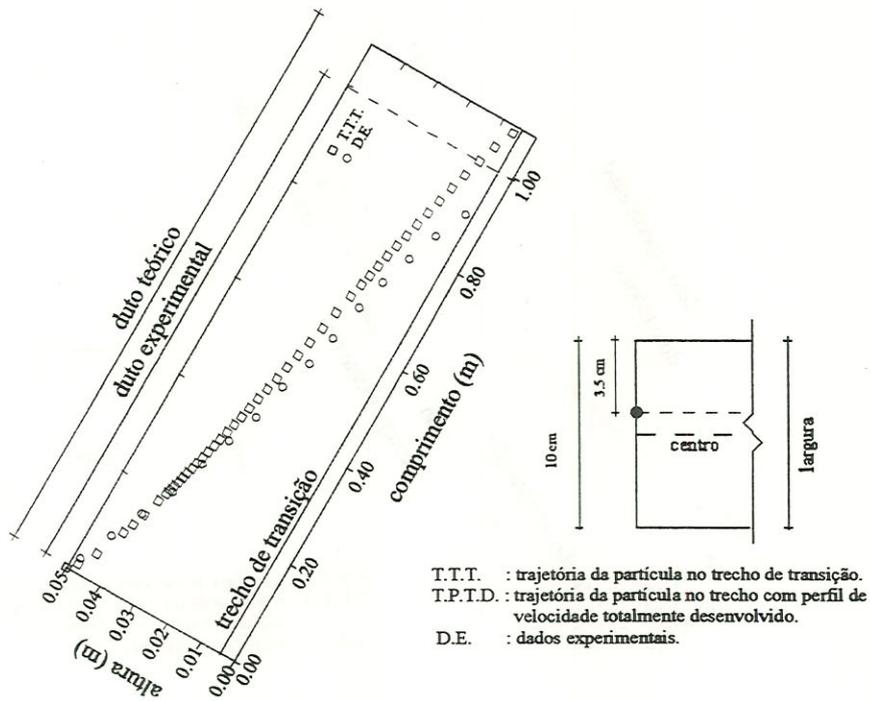


FIGURA C.54 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

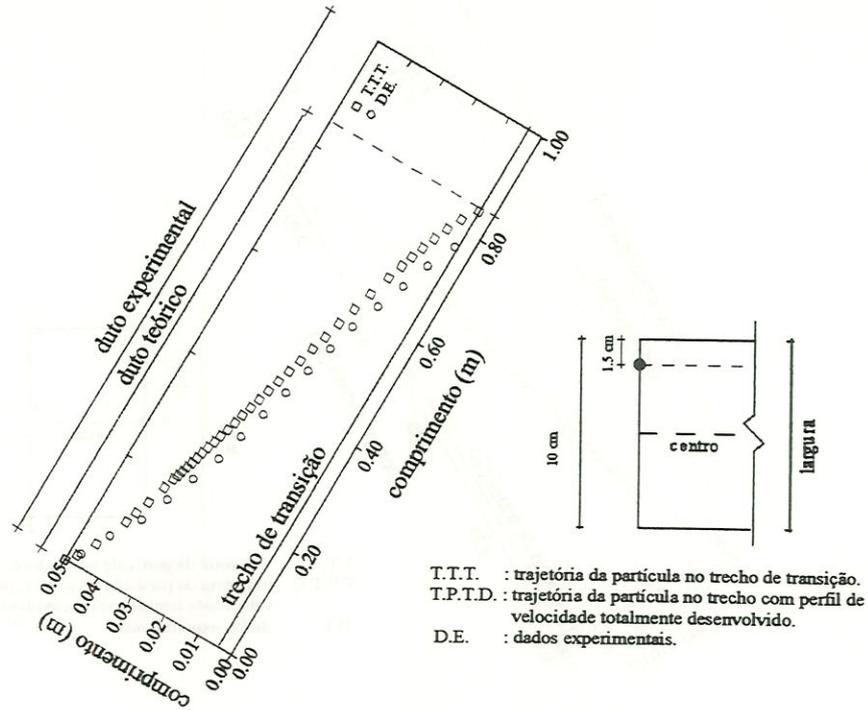


FIGURA C.55 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

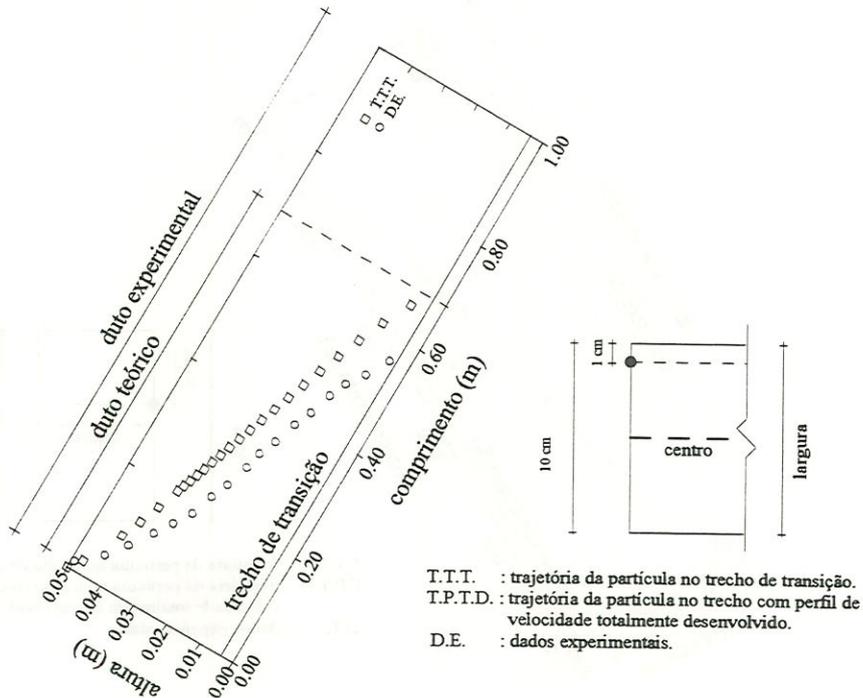


FIGURA C.56 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

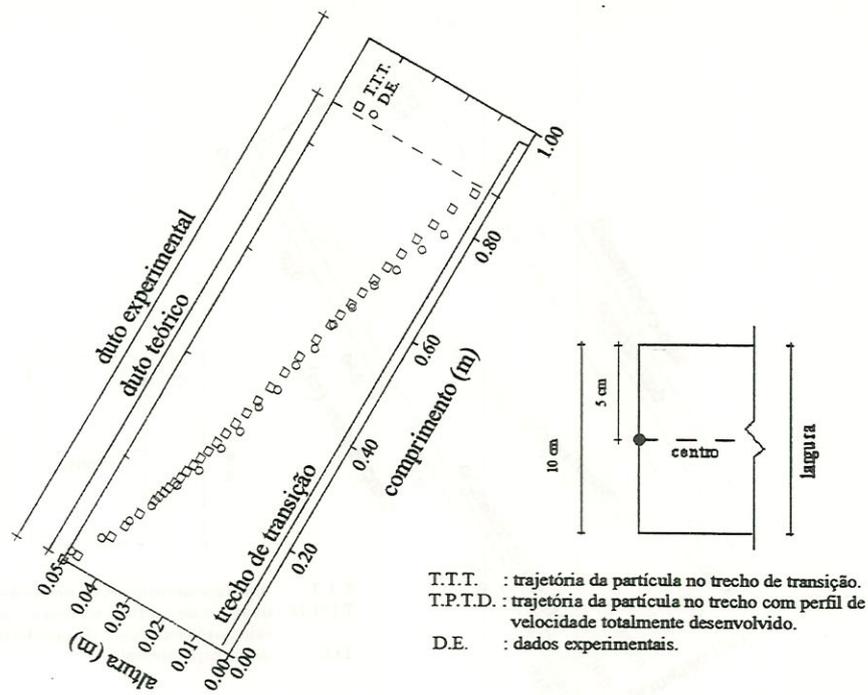


FIGURA C.57 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

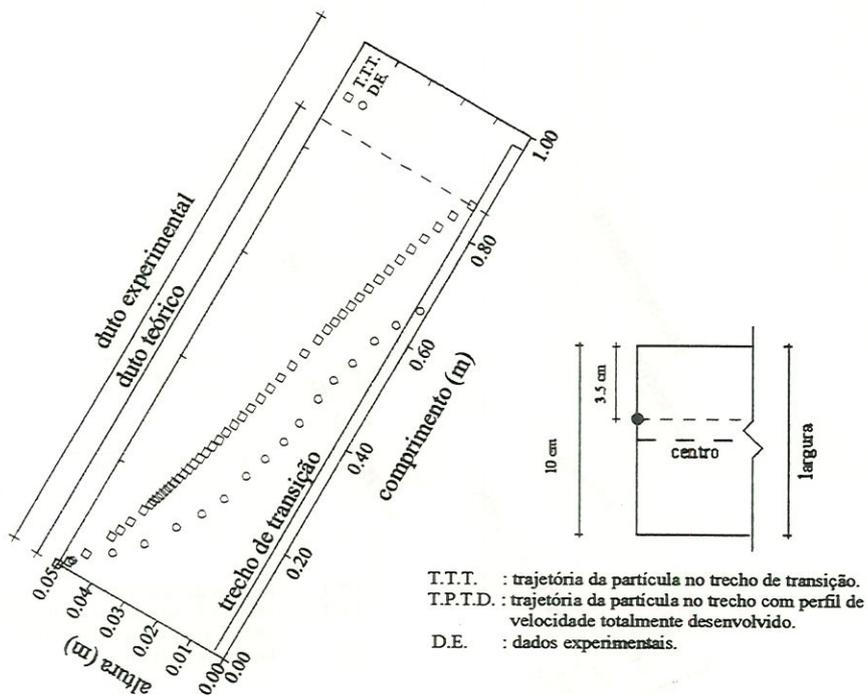


FIGURA C.58 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

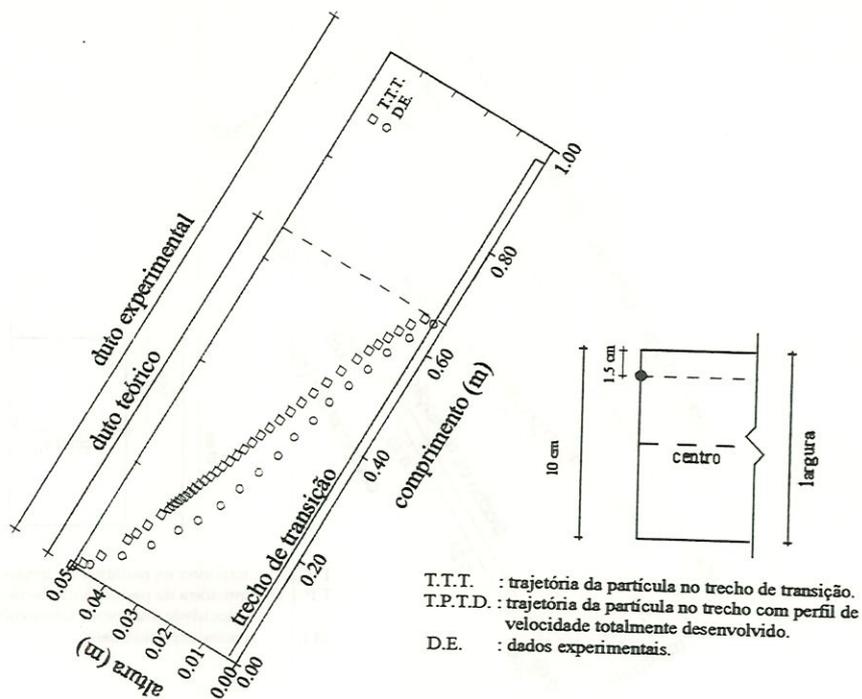


FIGURA C.59 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

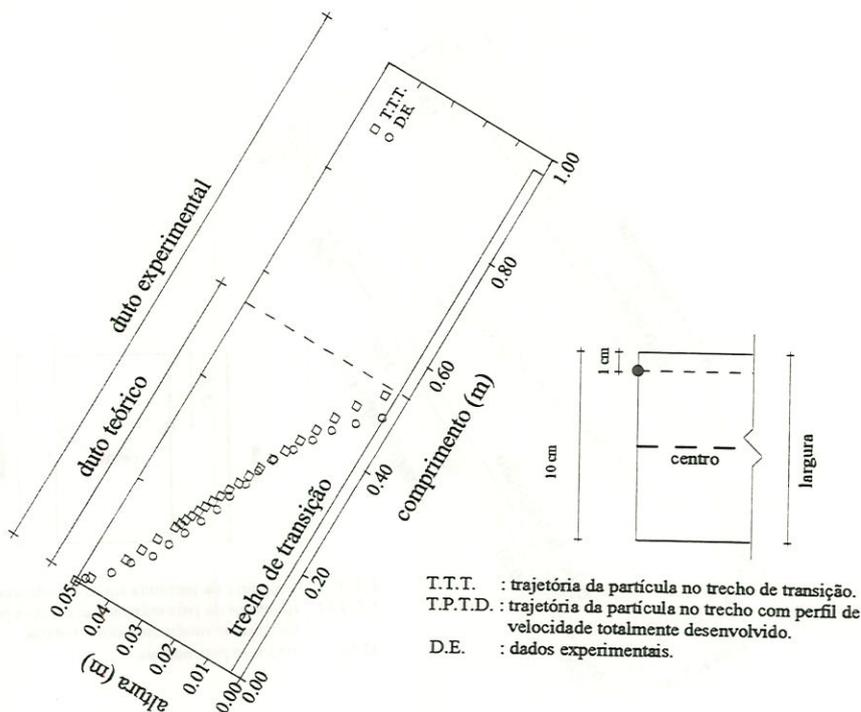


FIGURA C.60 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

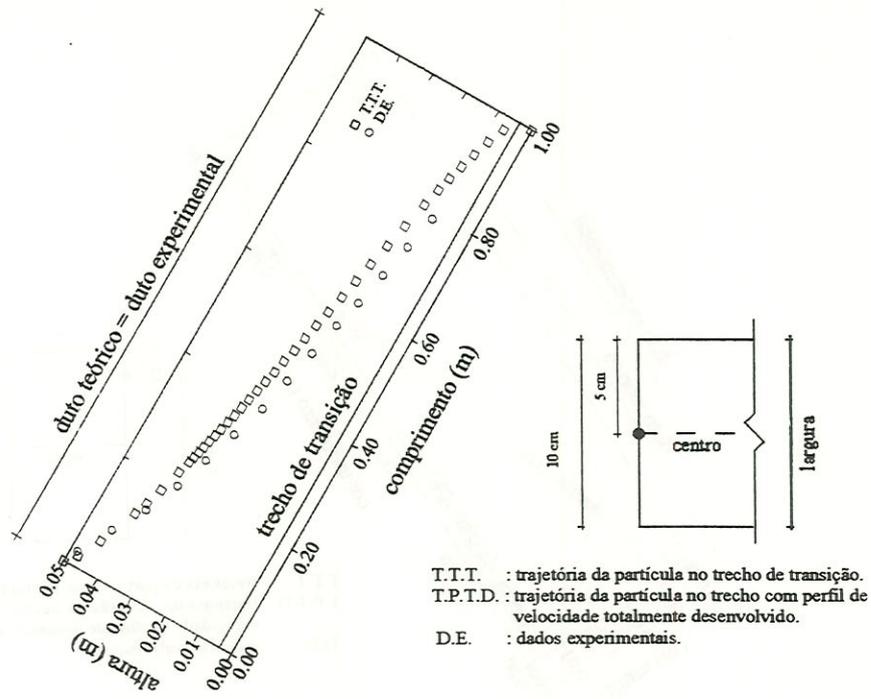


FIGURA C.61 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

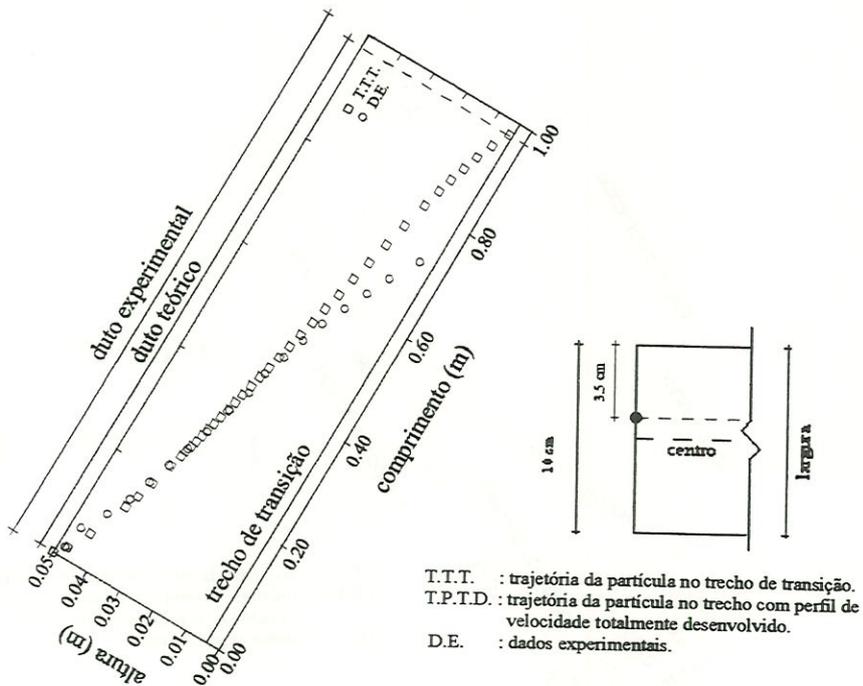


FIGURA C.62 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

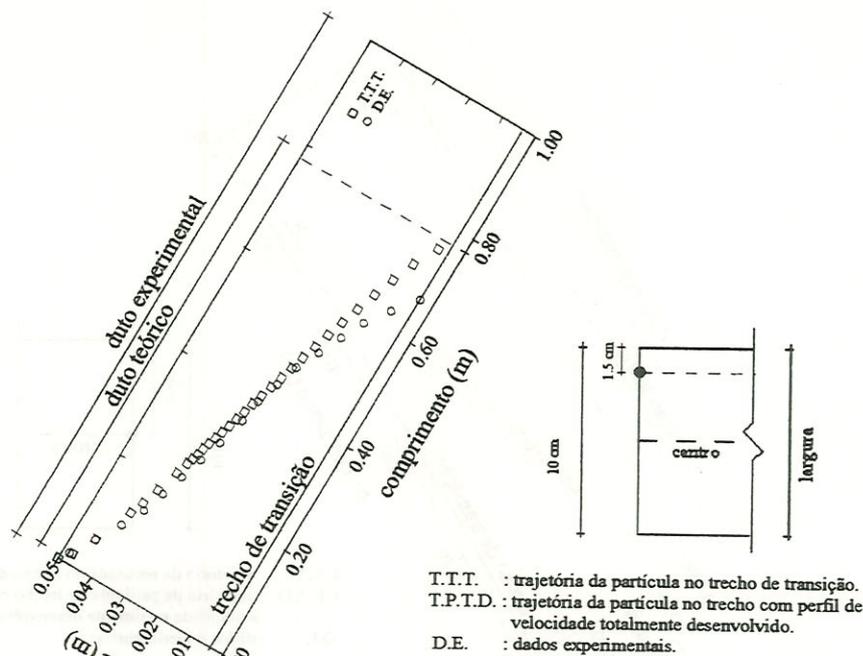


FIGURA C.63 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

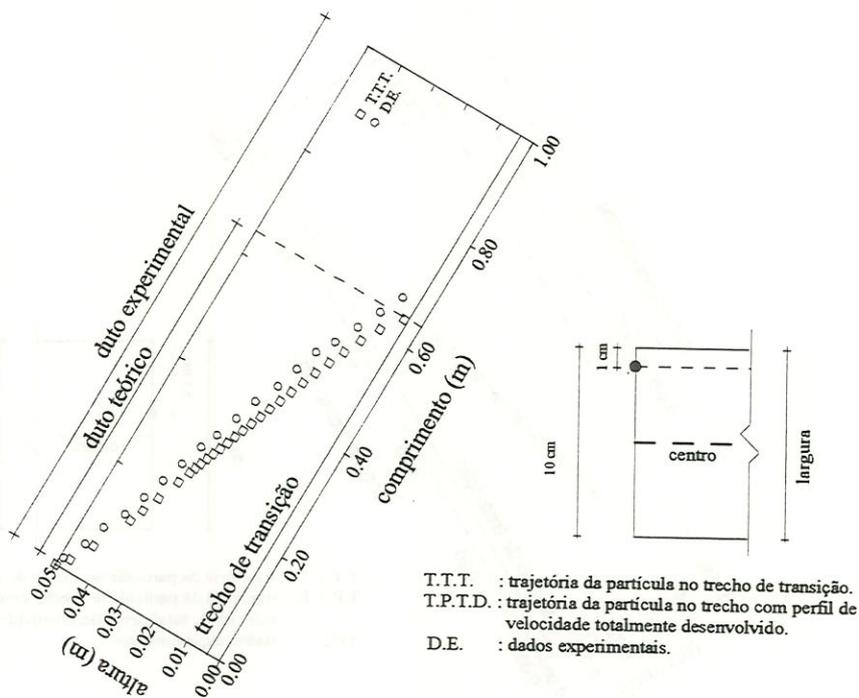


FIGURA C.64 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

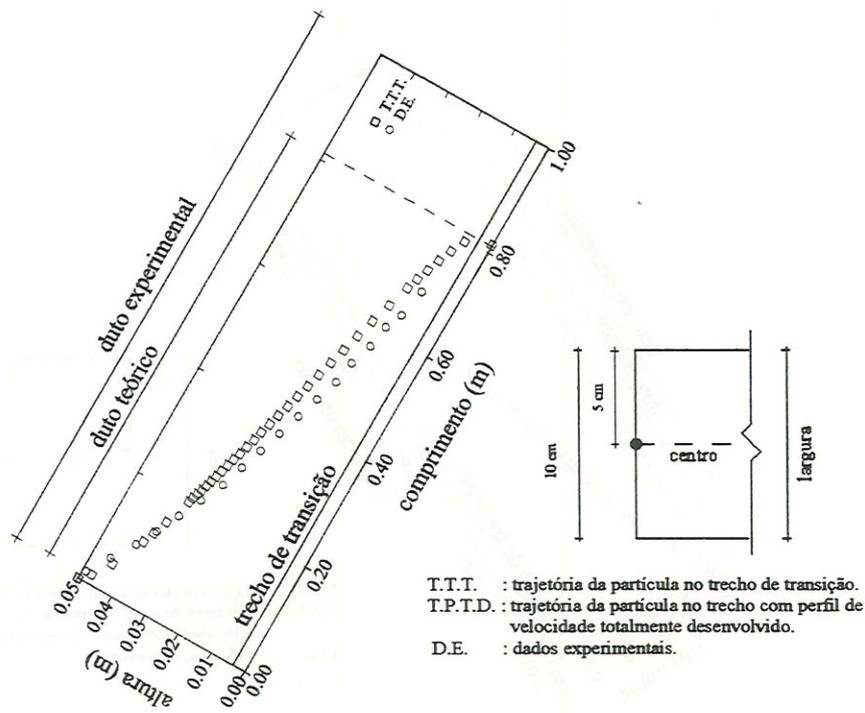


FIGURA C.65 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

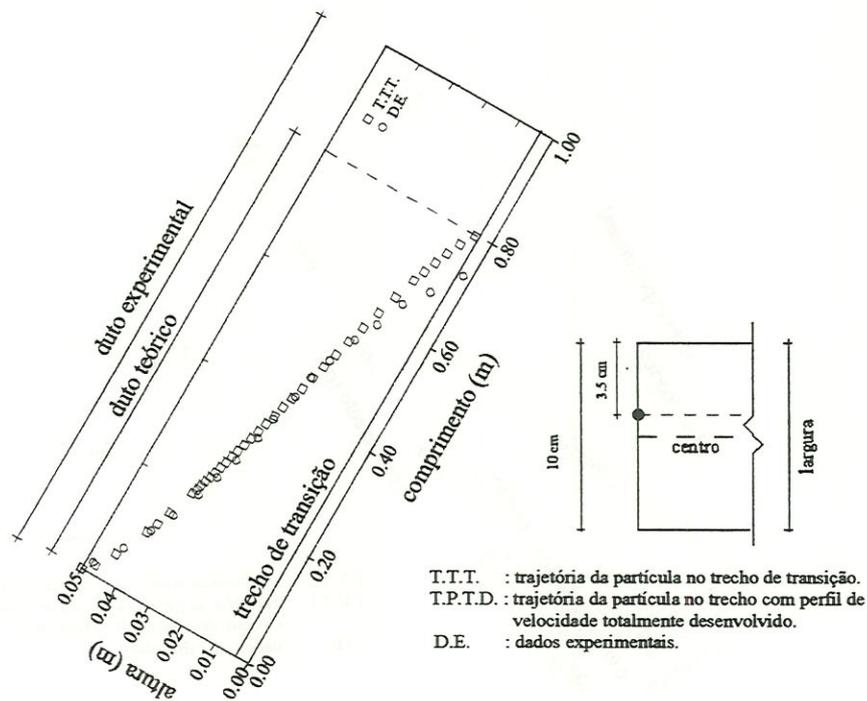


FIGURA C.66 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

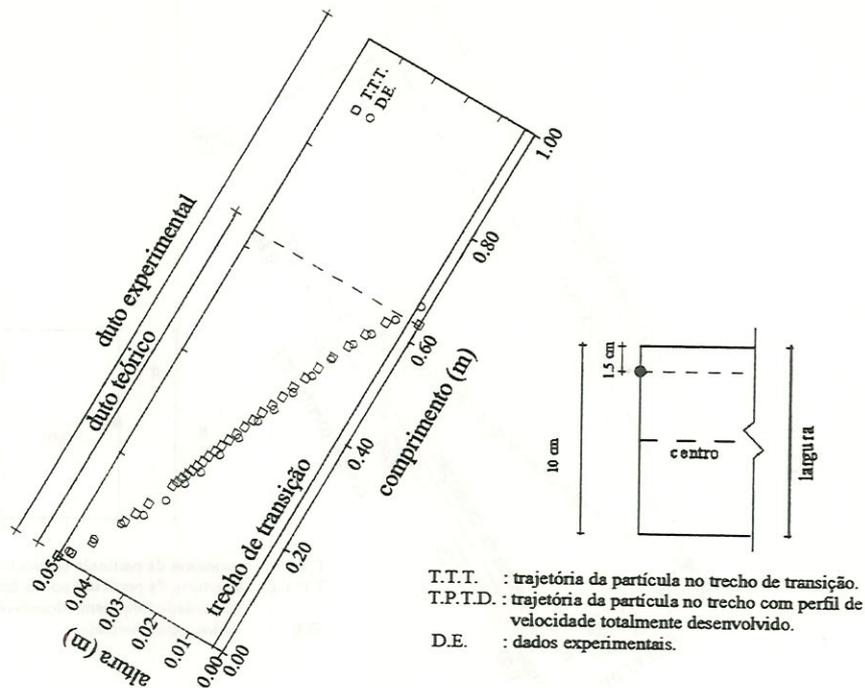


FIGURA C.67 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

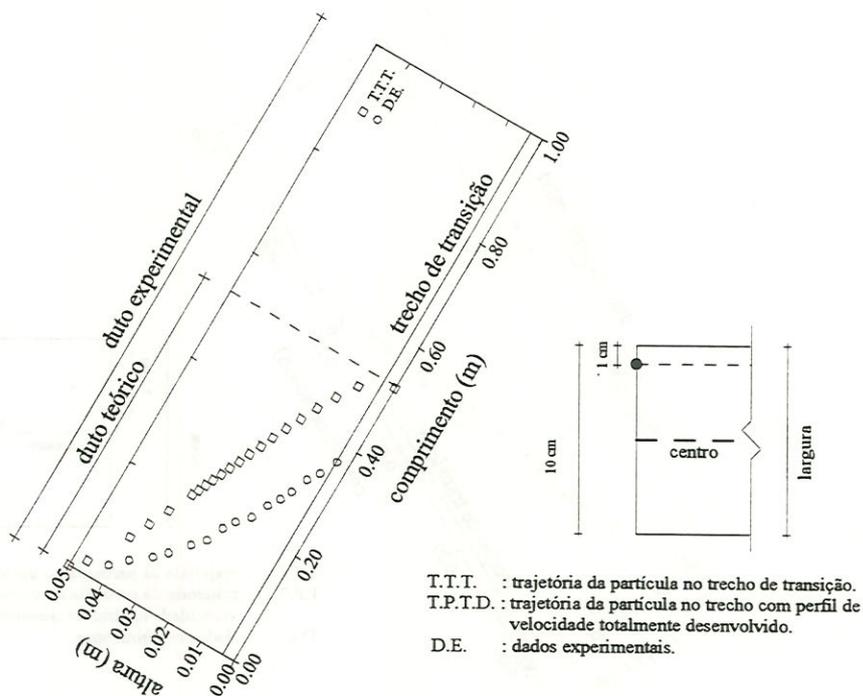


FIGURA C.68 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

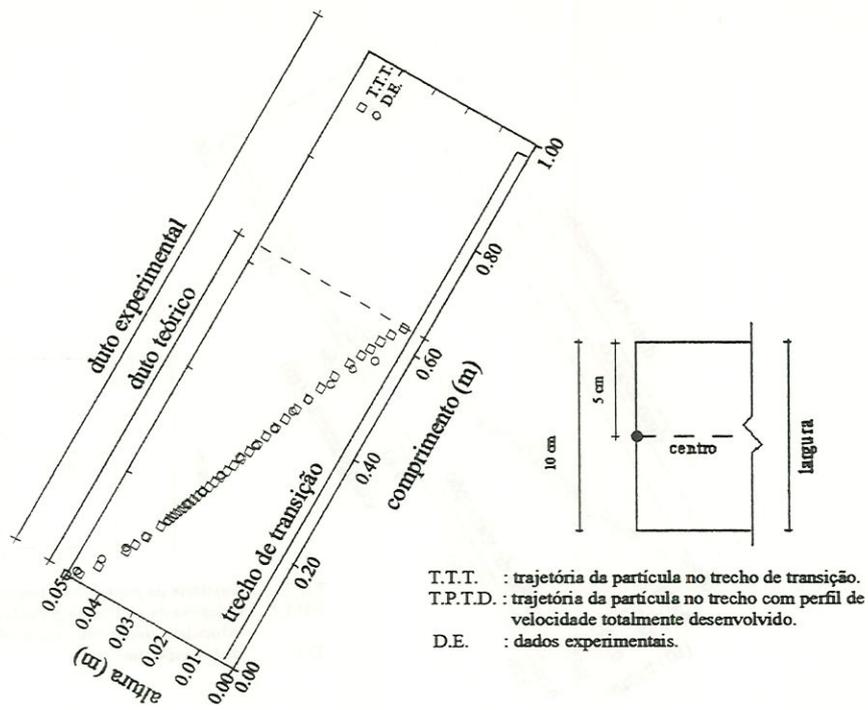


FIGURA C.69 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $De = 0,067 \text{ m}$ $lr = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

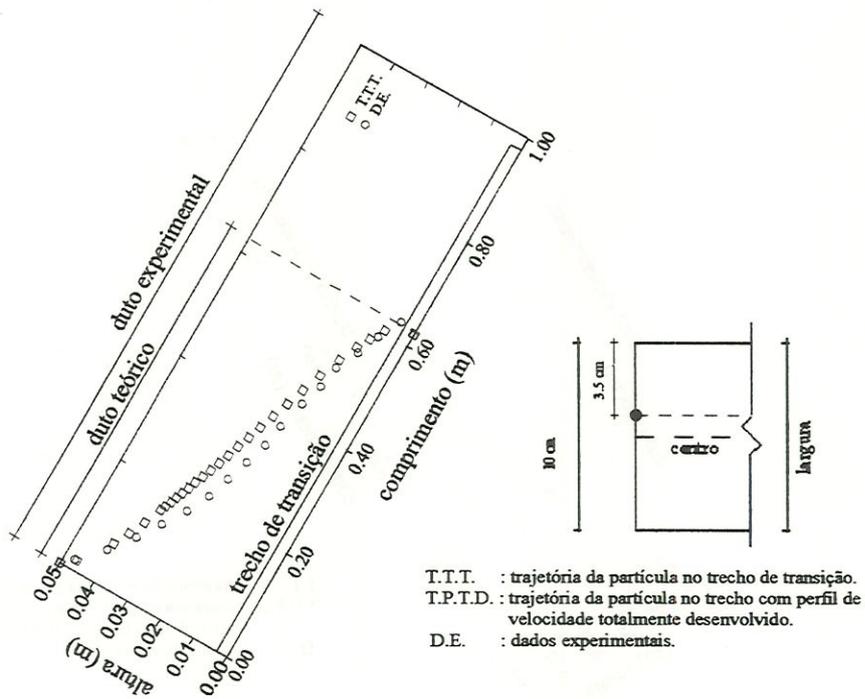


FIGURA C.70 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $De = 0,067 \text{ m}$ $lr = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

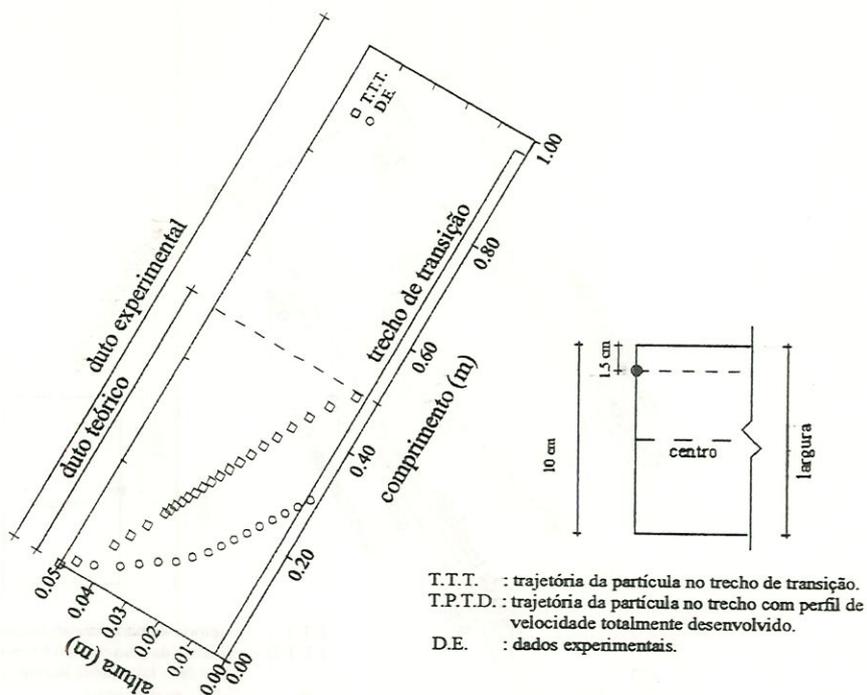


FIGURA C.71 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $De = 0,067 \text{ m}$ $lr = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

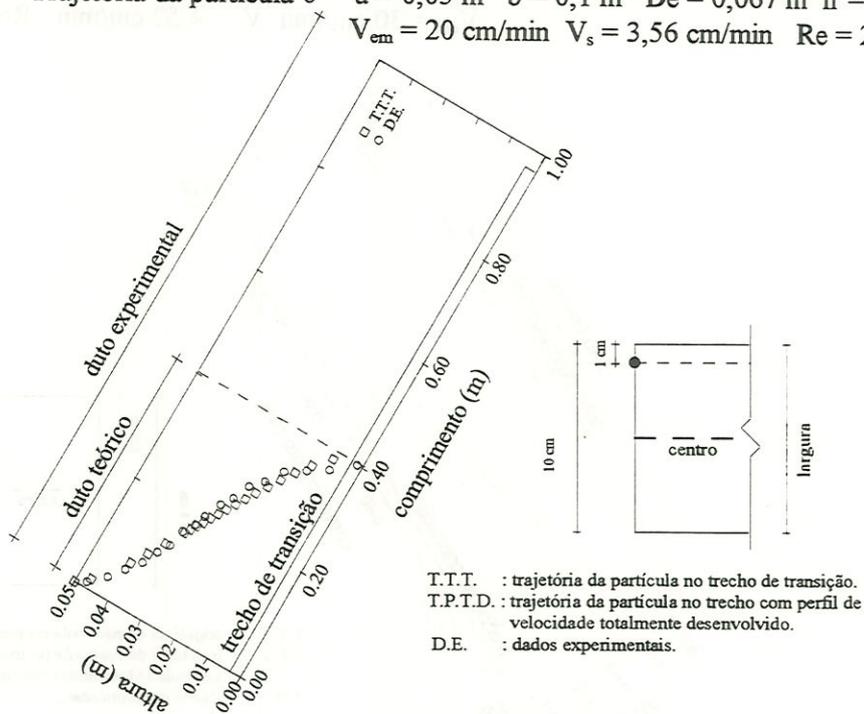


FIGURA C.72 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $De = 0,067 \text{ m}$ $lr = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

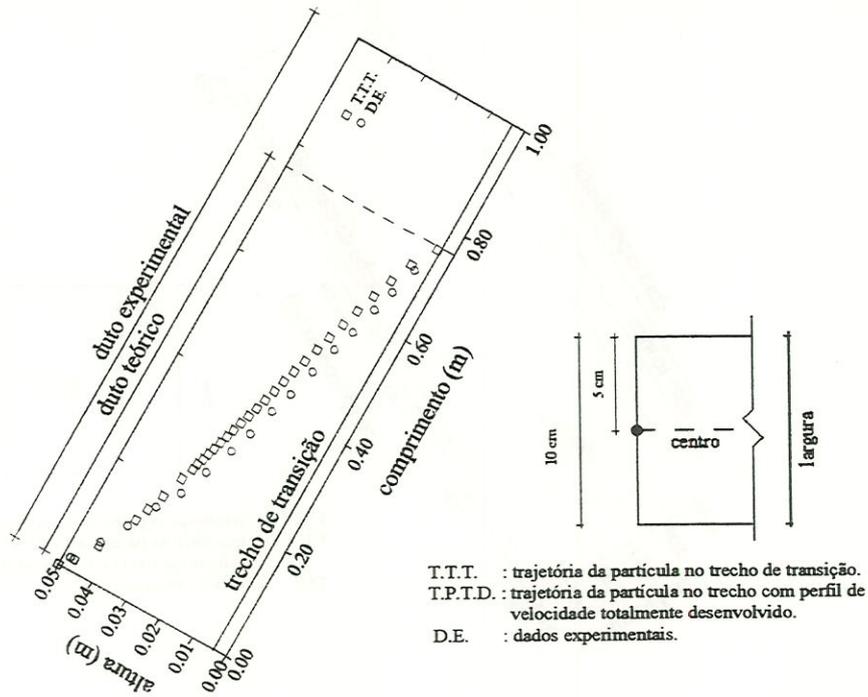


FIGURA C.73 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $De = 0,067 \text{ m}$ $lr = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

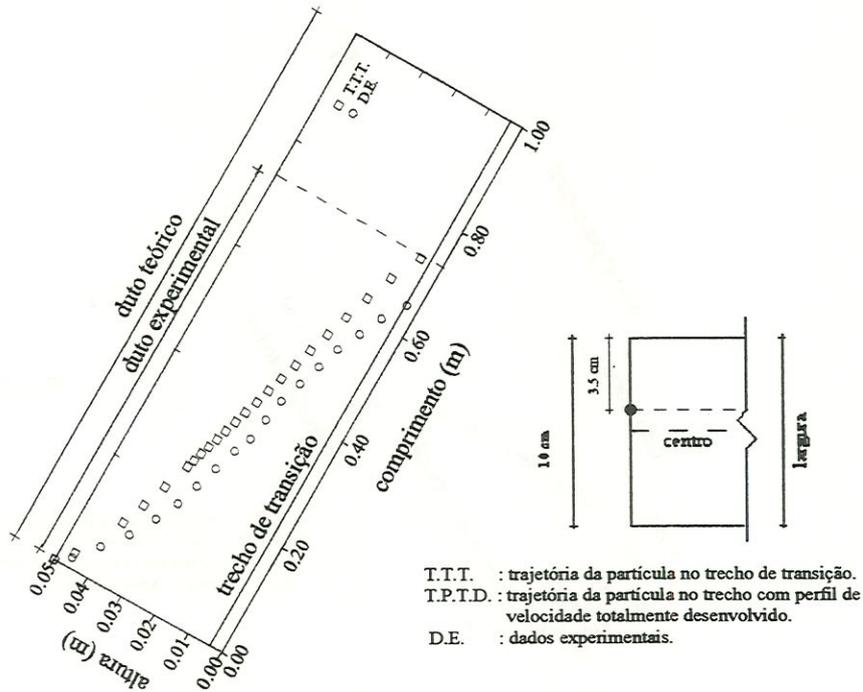


FIGURA C.74 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $De = 0,067 \text{ m}$ $lr = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

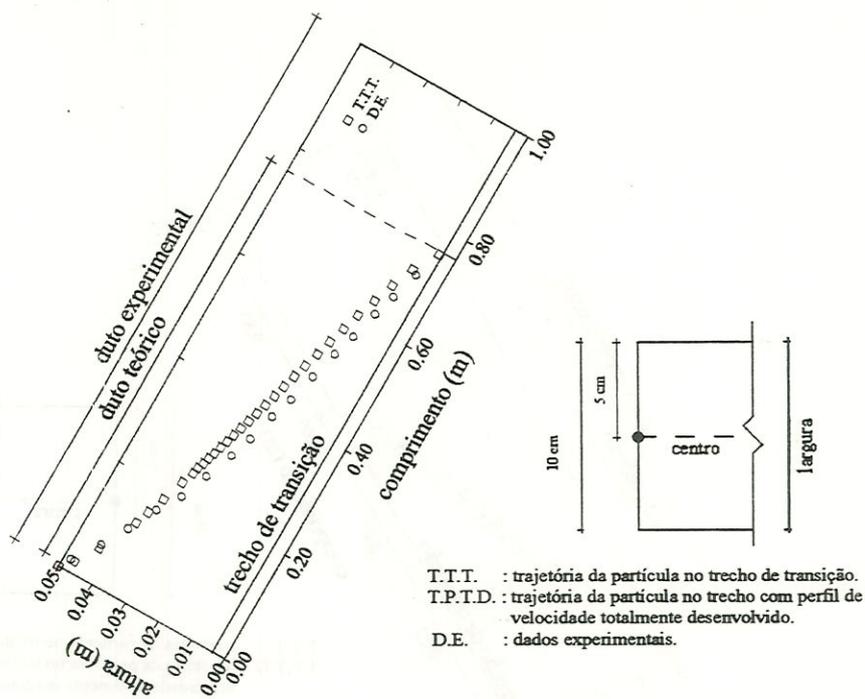


FIGURA C.75 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $De = 0,067 \text{ m}$ $lr = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

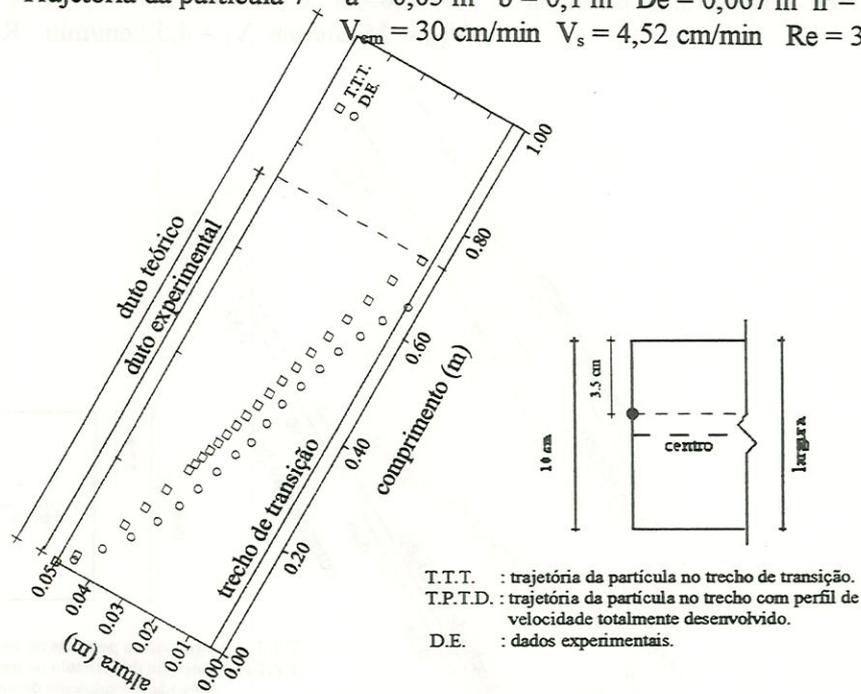


FIGURA C.76 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $De = 0,067 \text{ m}$ $lr = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

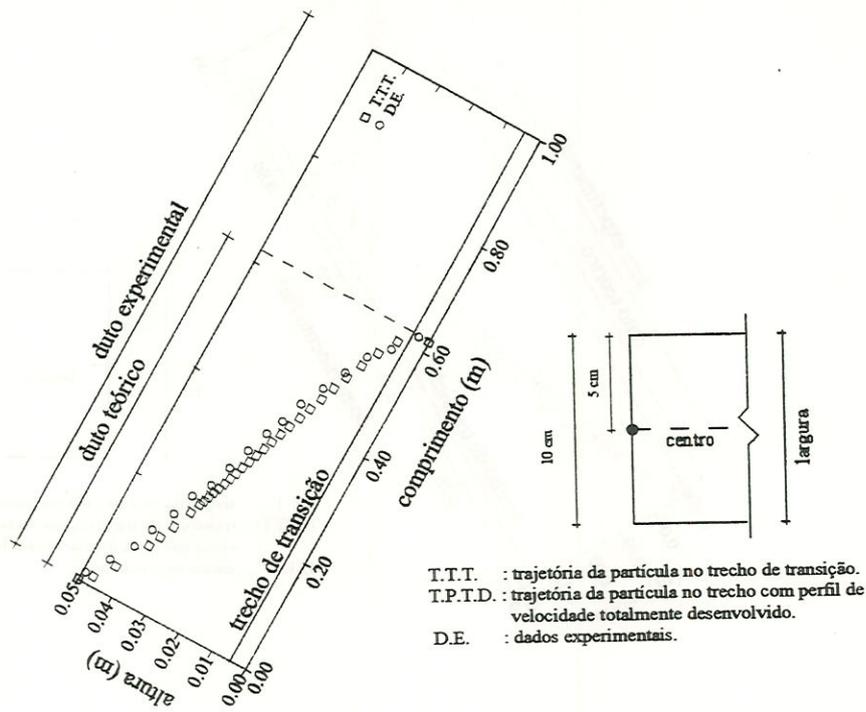


FIGURA C.77 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $De = 0,067$ m $lr = 1,46$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 4,52$ cm/min $Re = 276,07$

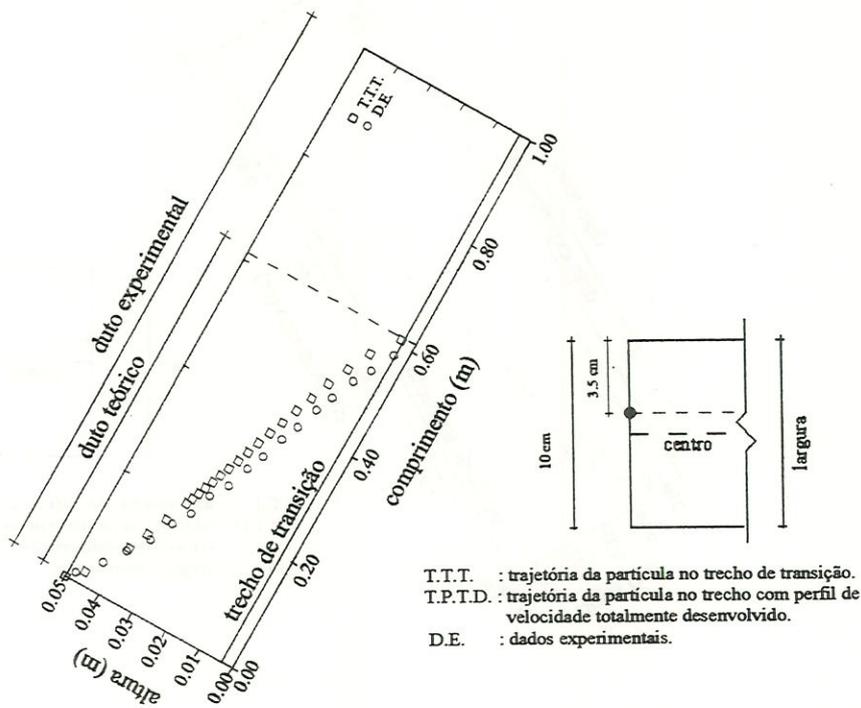


FIGURA C.78 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $De = 0,067$ m $lr = 1,46$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 4,52$ cm/min $Re = 276,07$

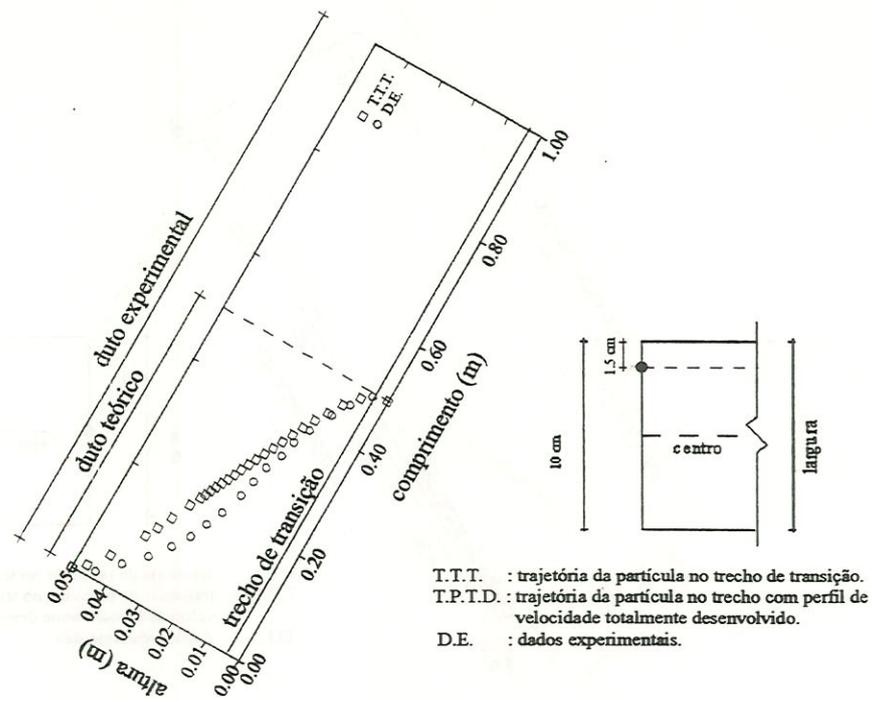


FIGURA C.79 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

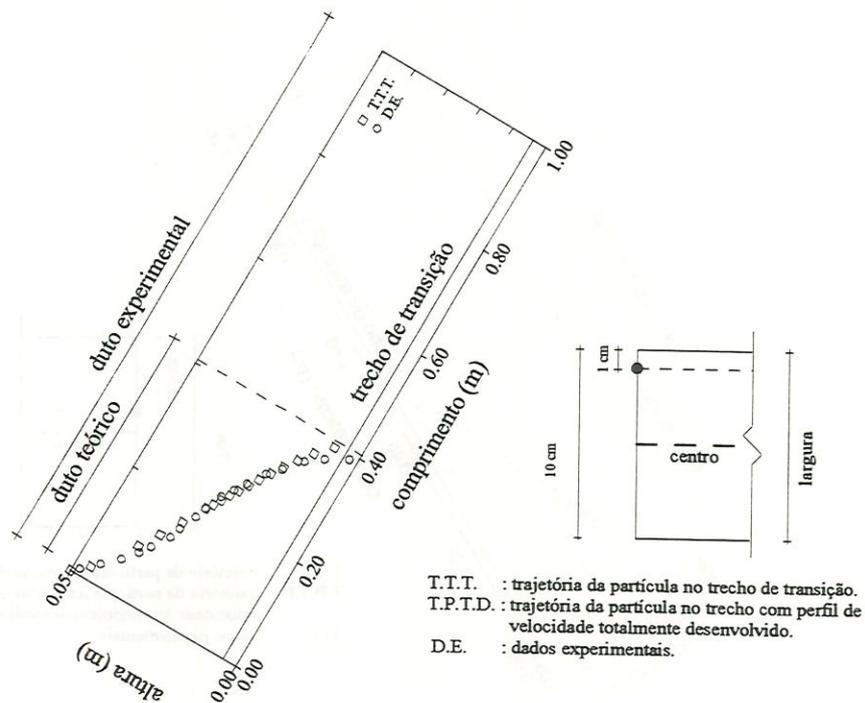


FIGURA C.80 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

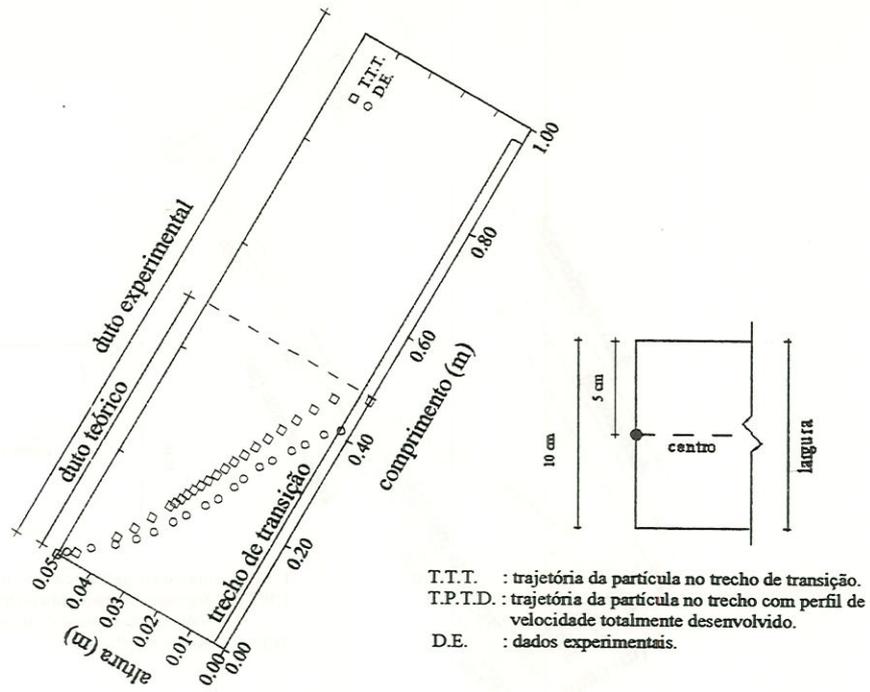


FIGURA C.81 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 0,97$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 4,52$ cm/min $Re = 220,46$

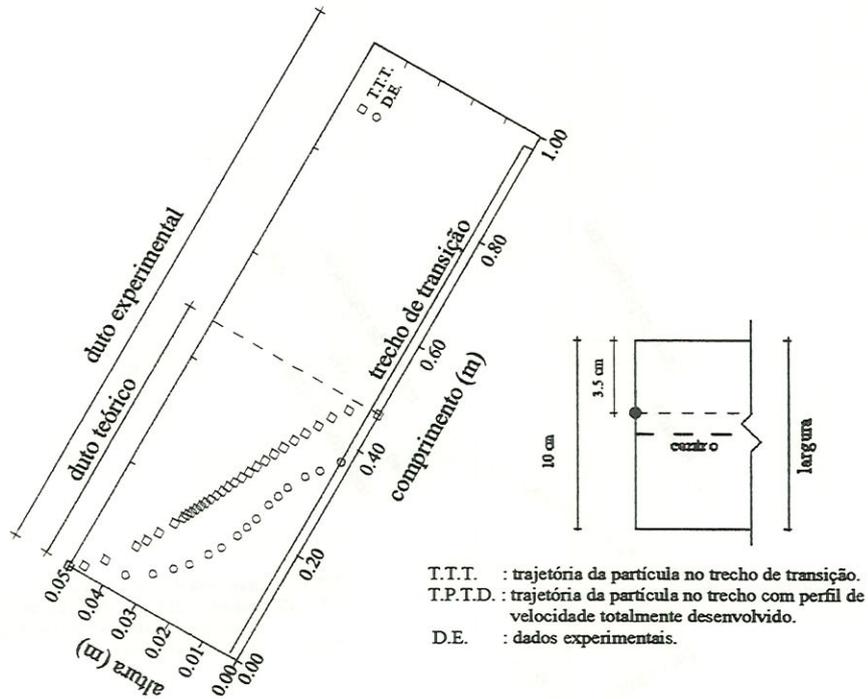


FIGURA C.82 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 0,97$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 4,52$ cm/min $Re = 220,46$

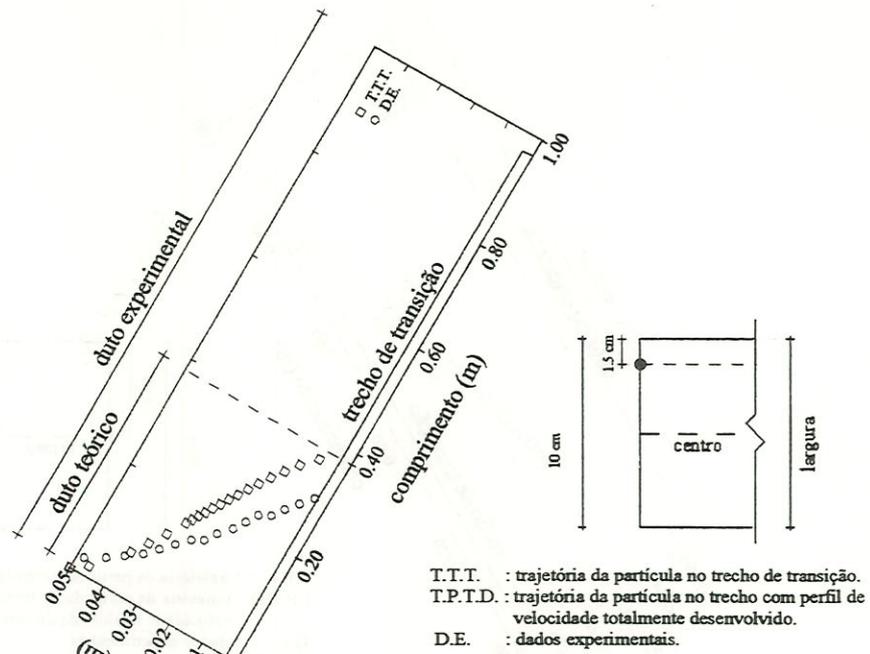


FIGURA C.83 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 0,97$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 4,52$ cm/min $Re = 220,46$

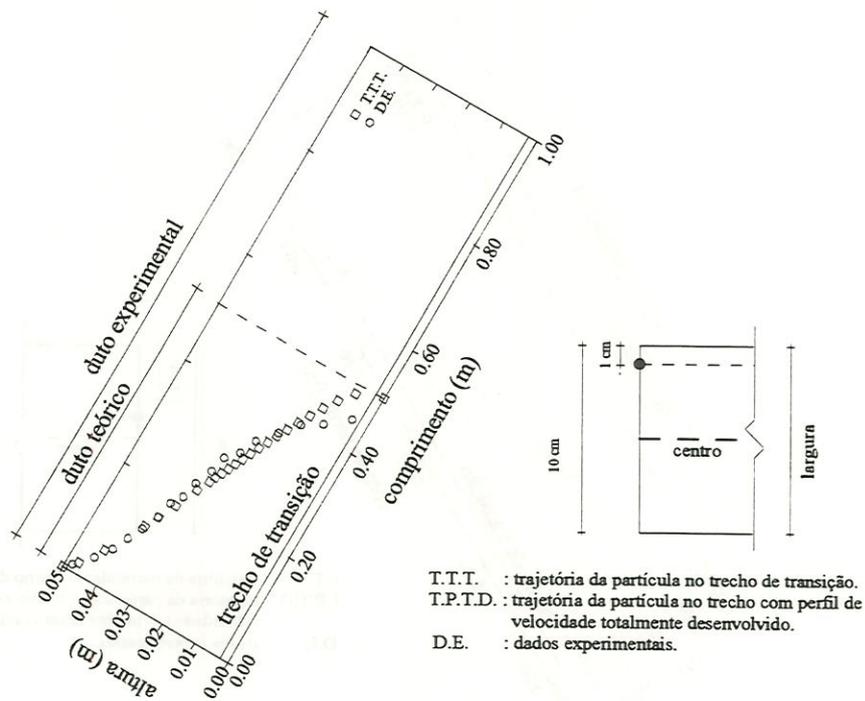


FIGURA C.84 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 0,97$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 4,52$ cm/min $Re = 220,46$

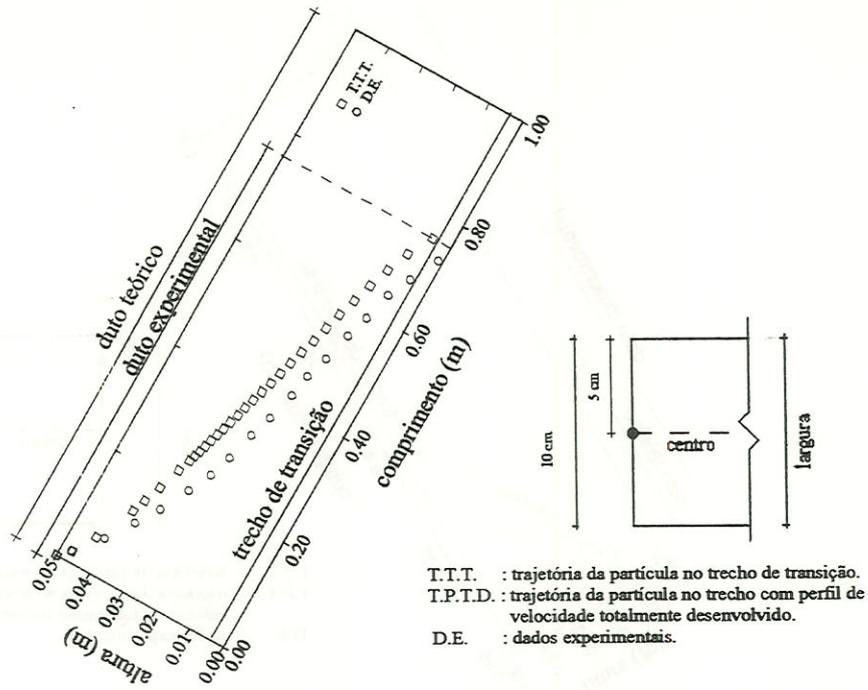


FIGURA C.85 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 1,46$ m
 $V_{em} = 30$ cm/min $V_s = 4,48$ cm/min $Re = 331,02$

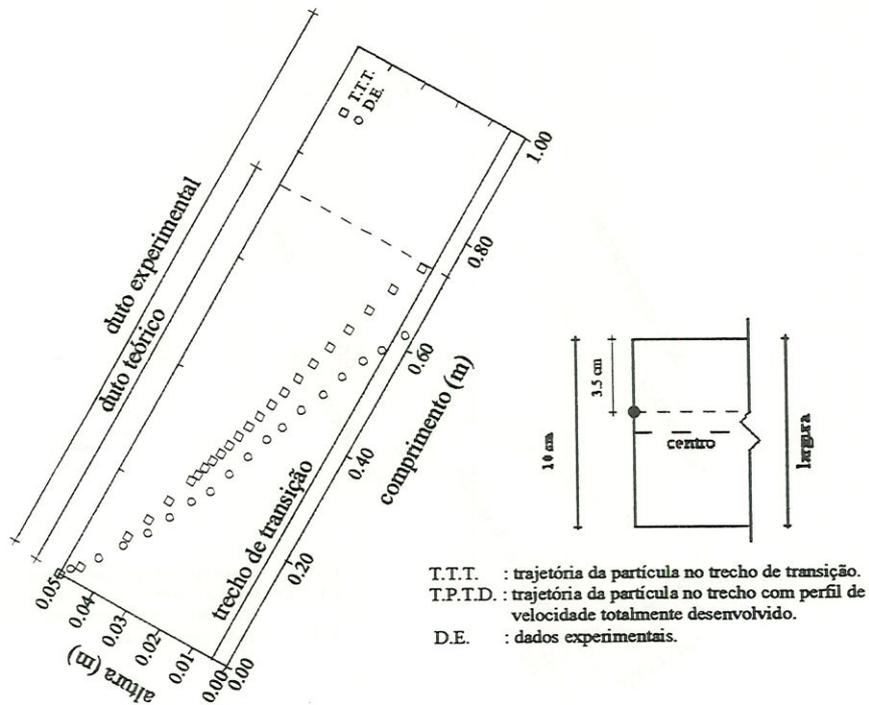


FIGURA C.86 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 1,46$ m
 $V_{em} = 30$ cm/min $V_s = 4,48$ cm/min $Re = 331,02$

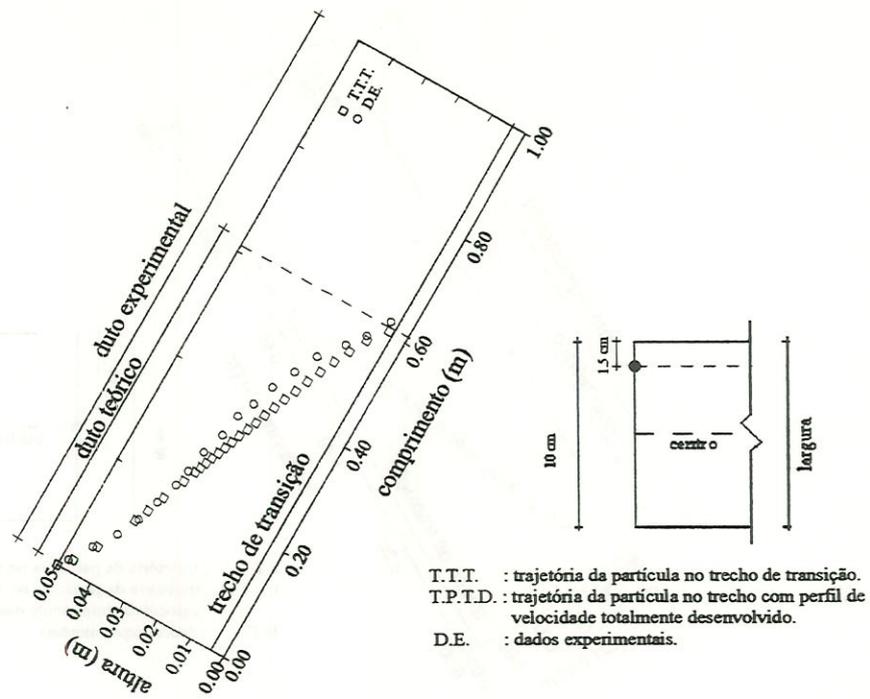


FIGURA C.87 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

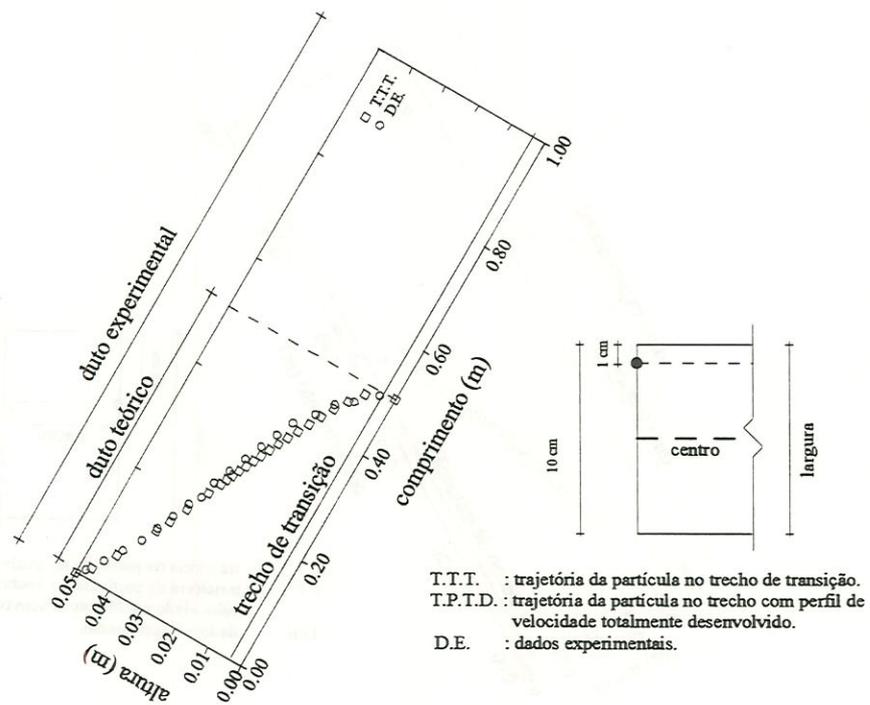


FIGURA C.88 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

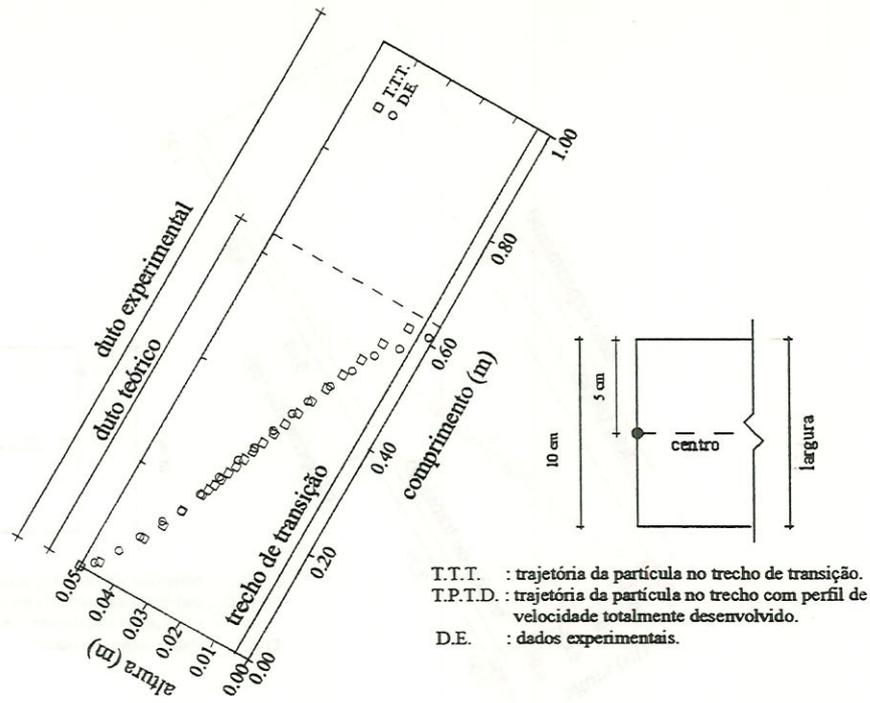


FIGURA C.89 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 1,21$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 4,48$ cm/min $Re = 276,07$

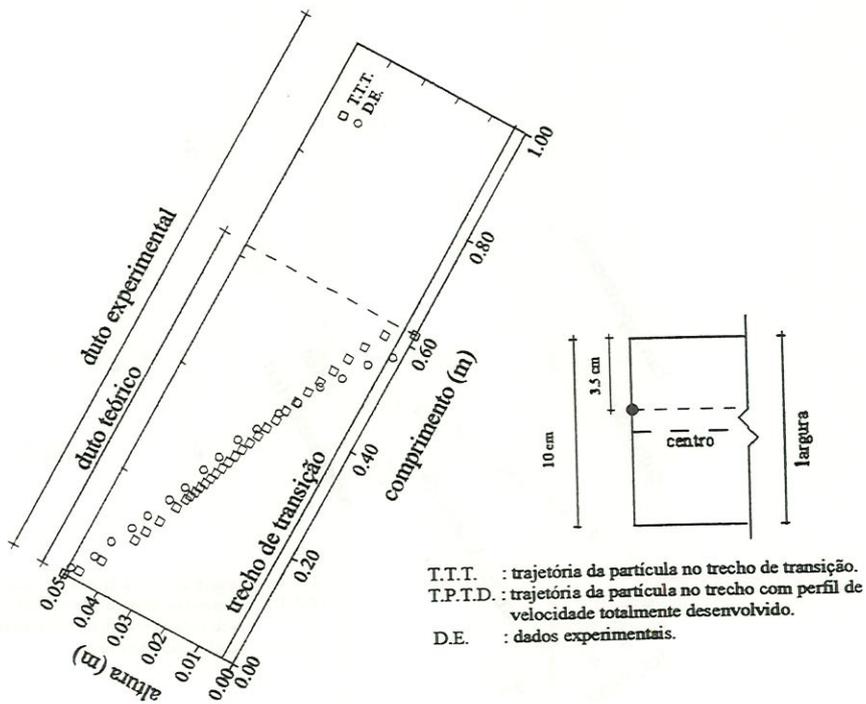


FIGURA C.90 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05$ m $b = 0,1$ m $D_c = 0,067$ m $l_r = 1,21$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 4,48$ cm/min $Re = 276,07$

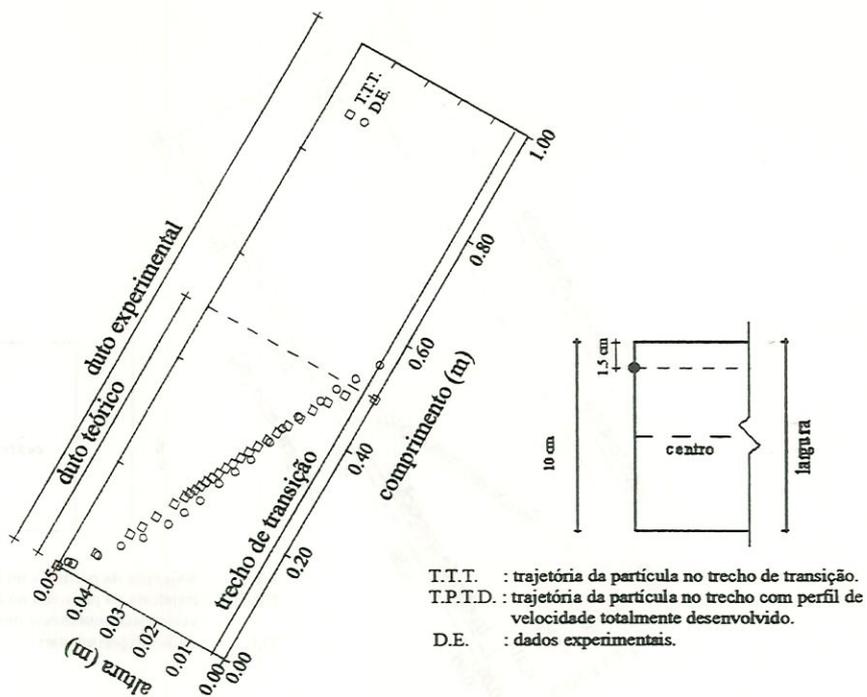


FIGURA C.91 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

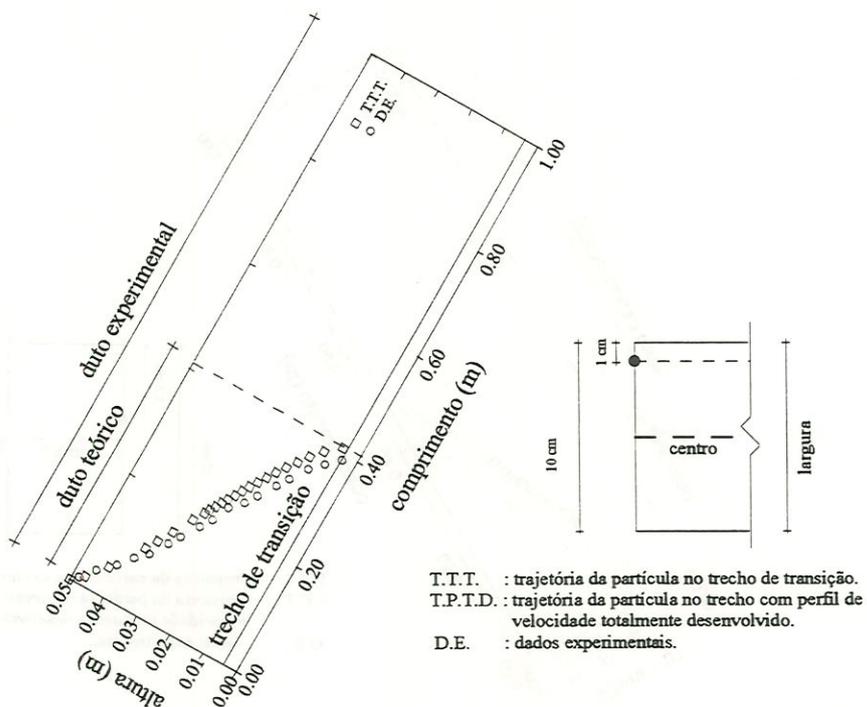


FIGURA C.92 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

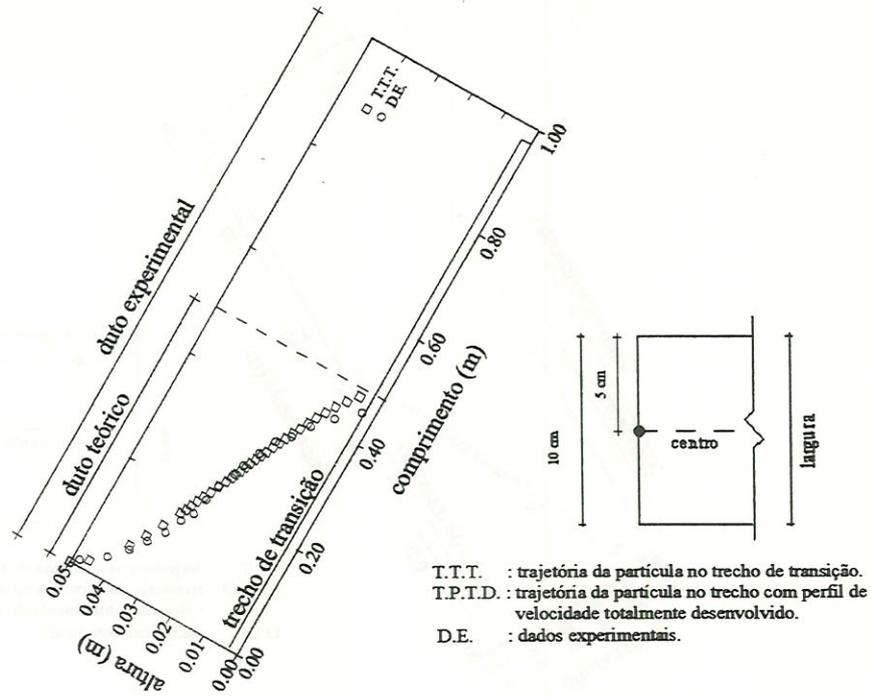


FIGURA C.93 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

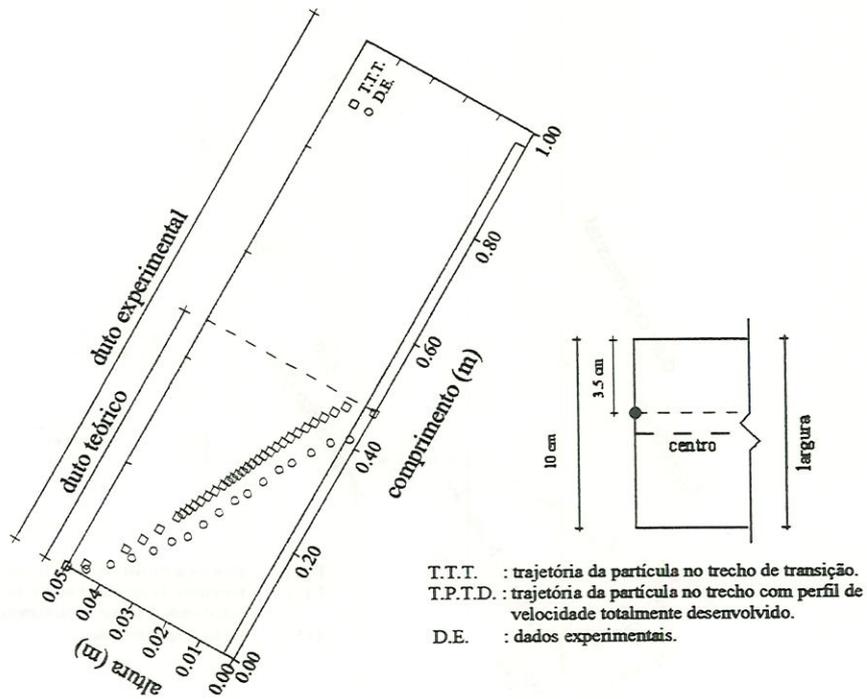


FIGURA C.94 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

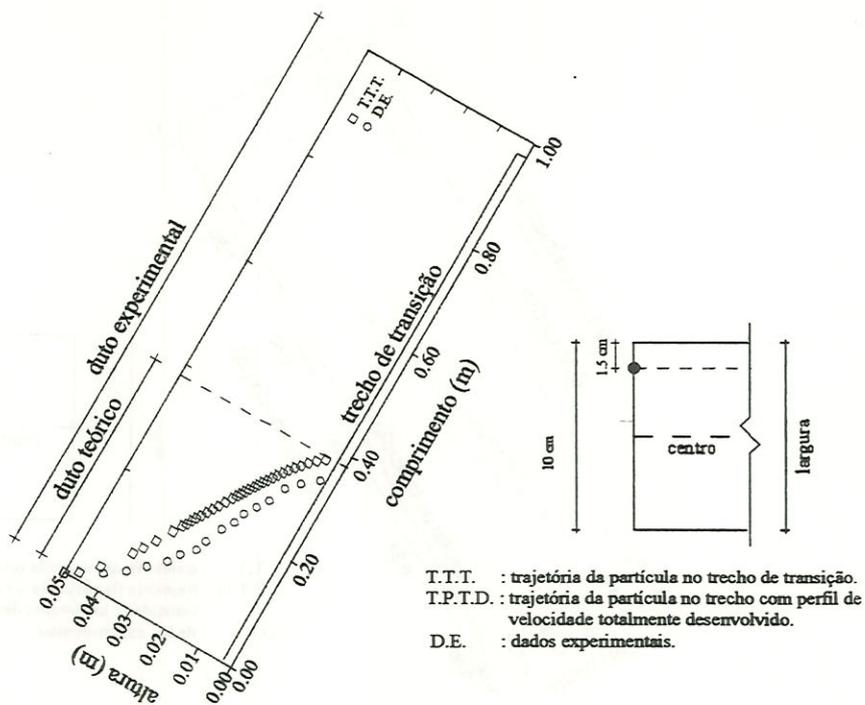


FIGURA C.95 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

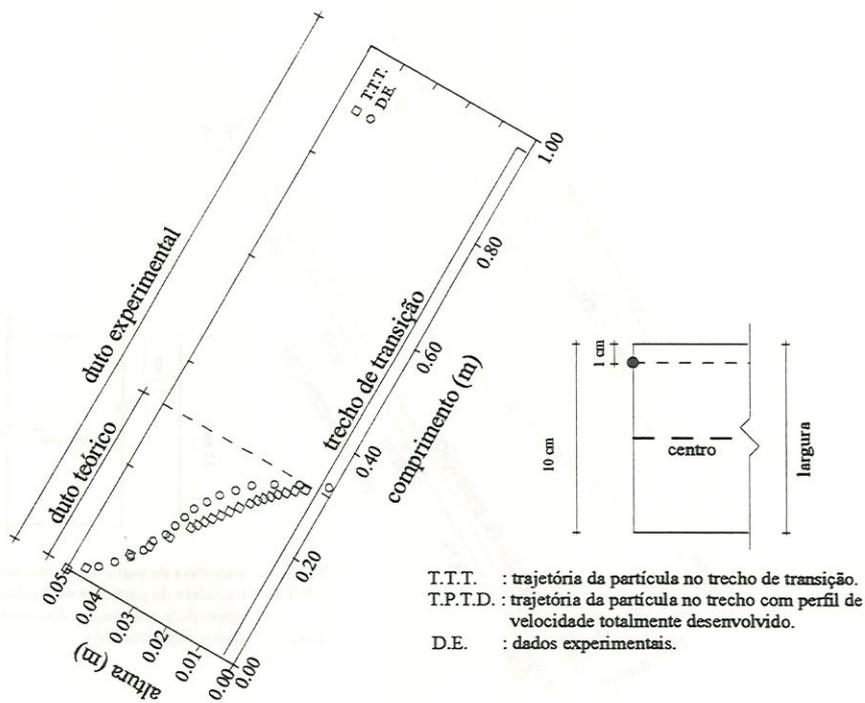


FIGURA C.96 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

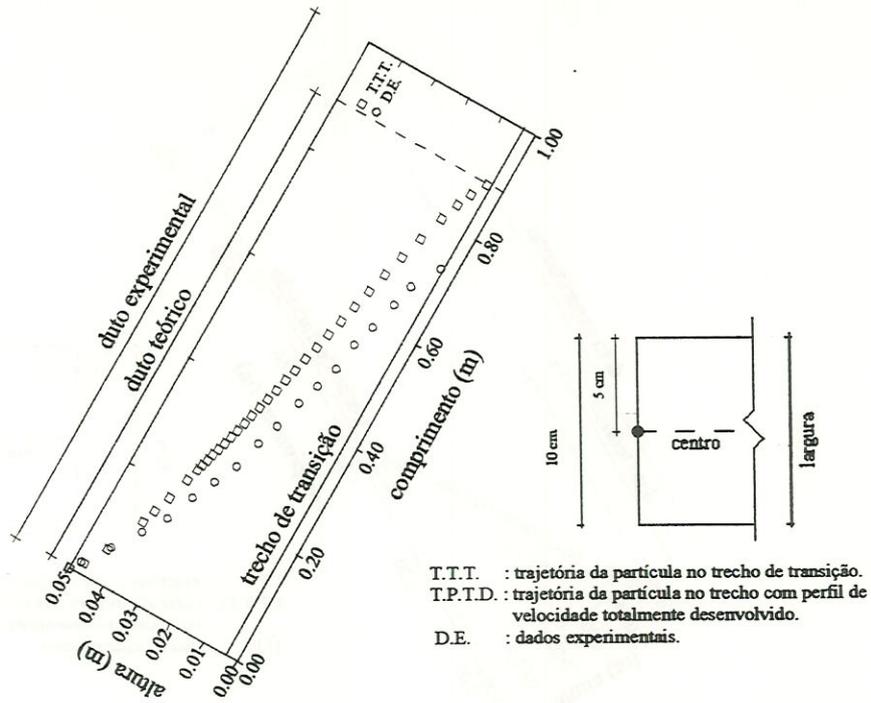


FIGURA C.97 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

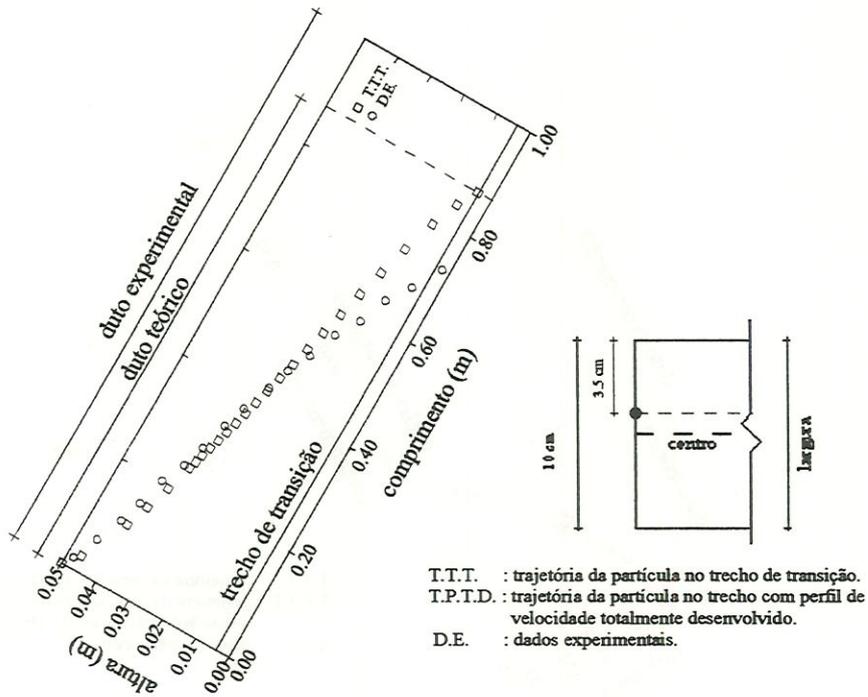


FIGURA C.98 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$



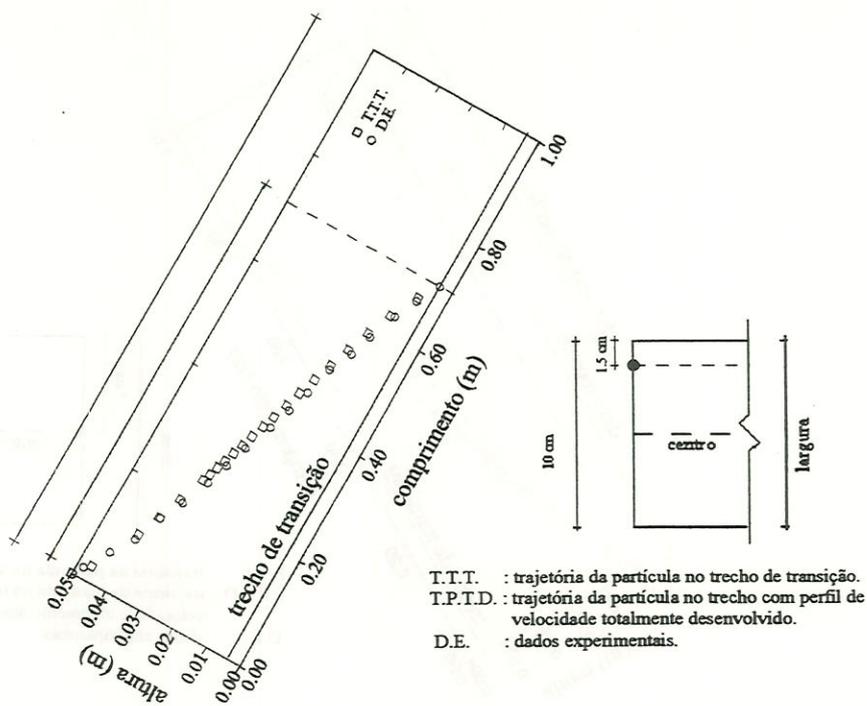


FIGURA C.99 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$

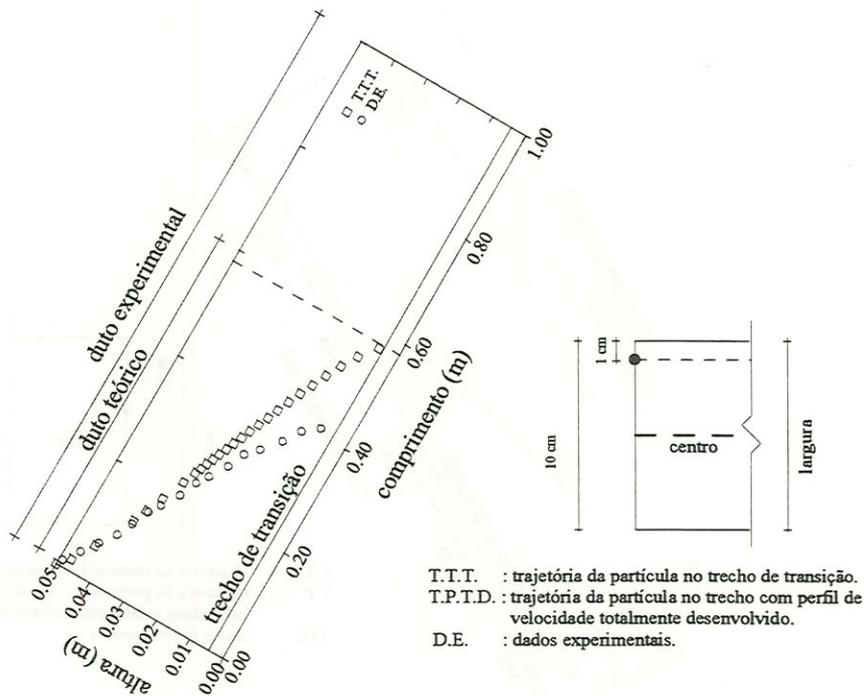


FIGURA C.100 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,46 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,02$



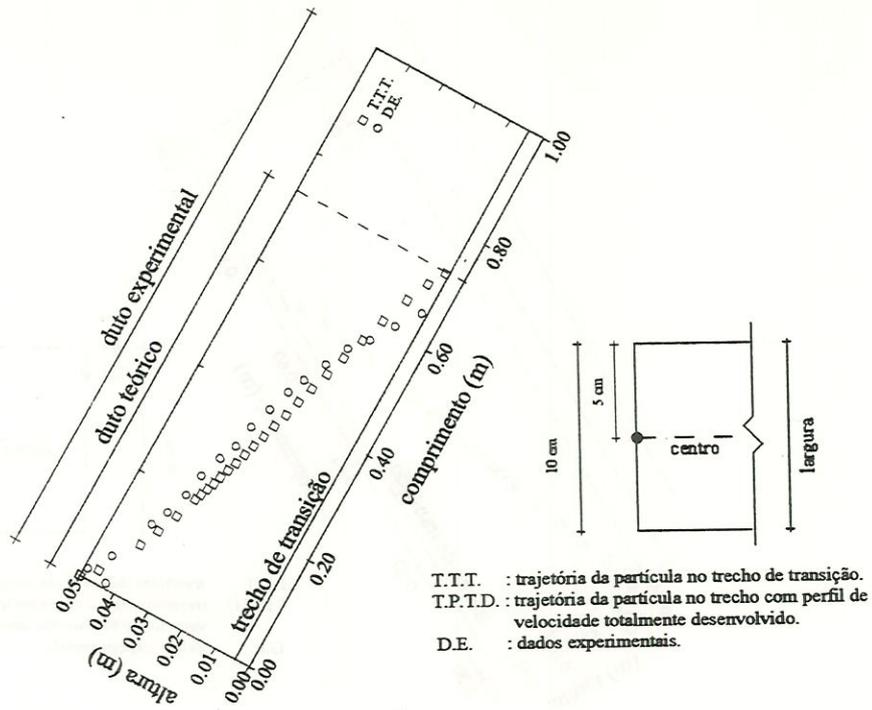


FIGURA C.101 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

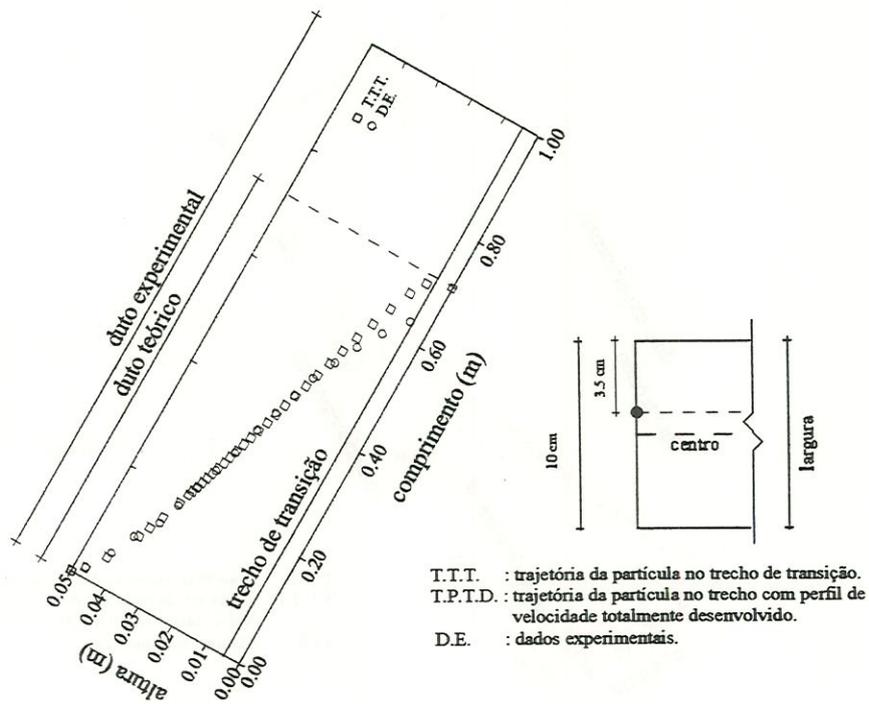


FIGURA C.102 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 1,21 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

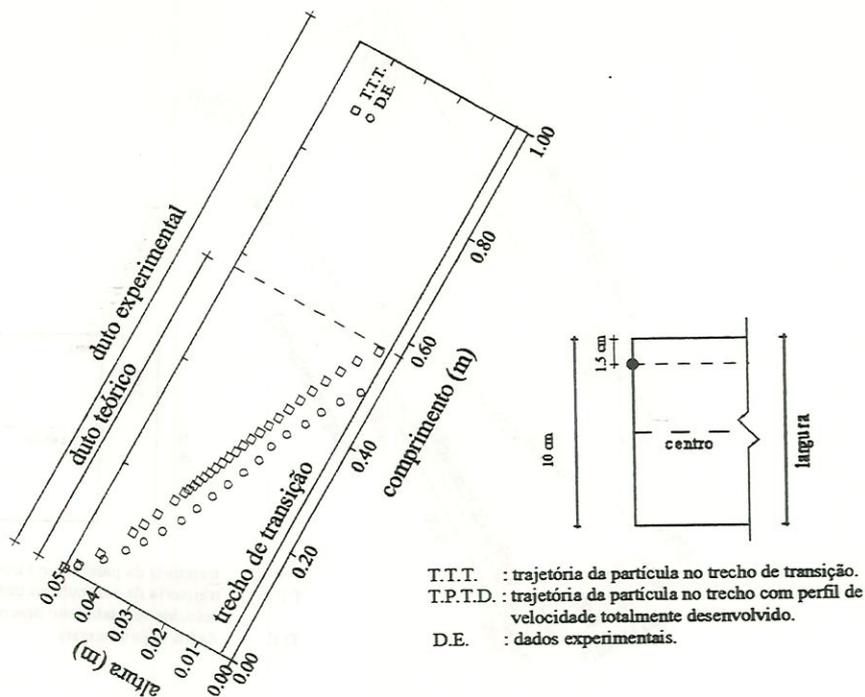


FIGURA C.103 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,1\text{ m}$ $D_c = 0,067\text{ m}$ $l_r = 1,21\text{ m}$
 $V_{em} = 25\text{ cm/min}$ $V_s = 3,93\text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

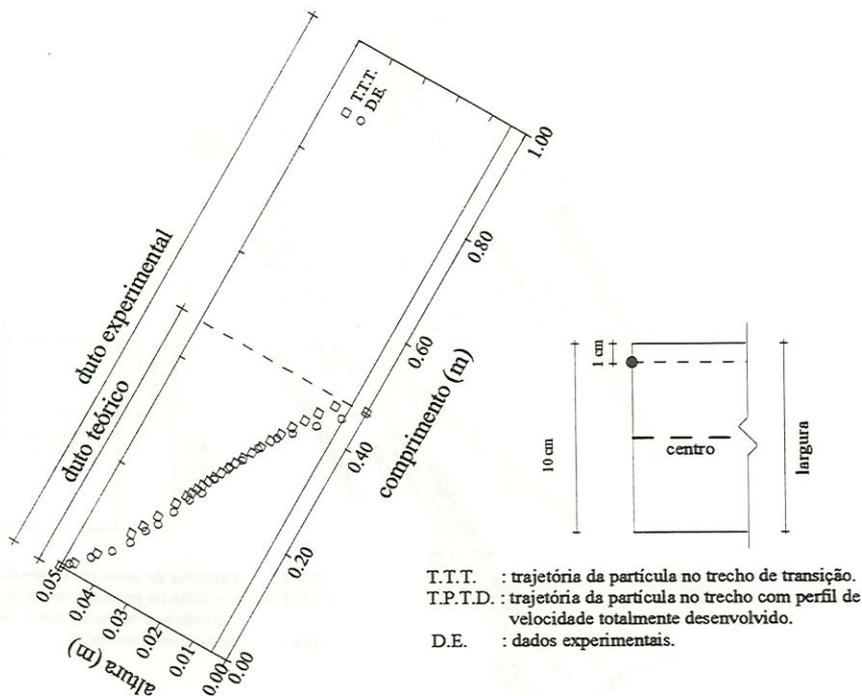


FIGURA C.104 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,1\text{ m}$ $D_c = 0,067\text{ m}$ $l_r = 1,21\text{ m}$
 $V_{em} = 25\text{ cm/min}$ $V_s = 3,93\text{ cm/min}$ $Re = 276,07$

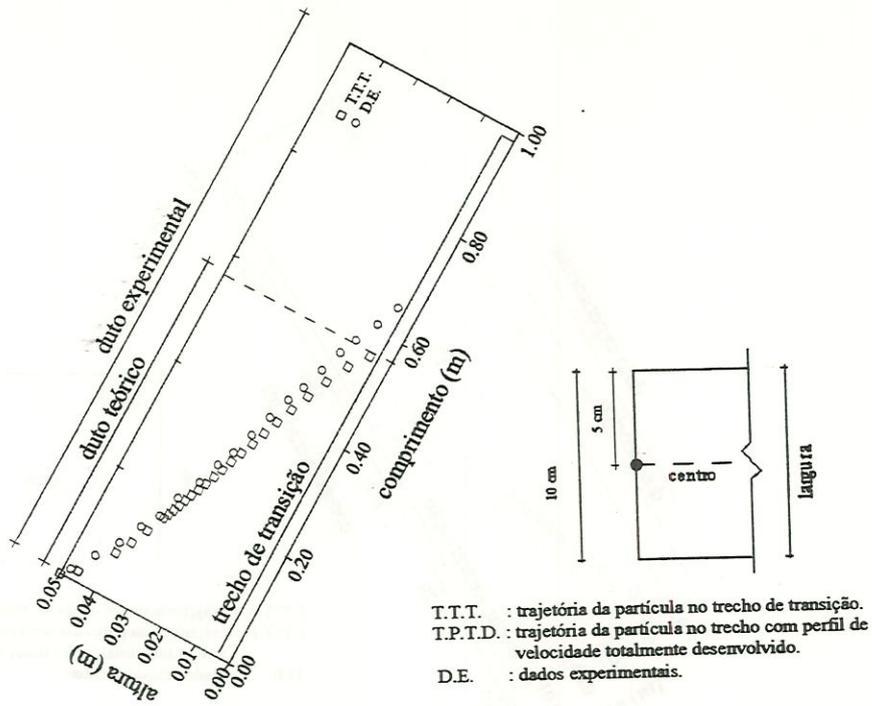


FIGURA C.105 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

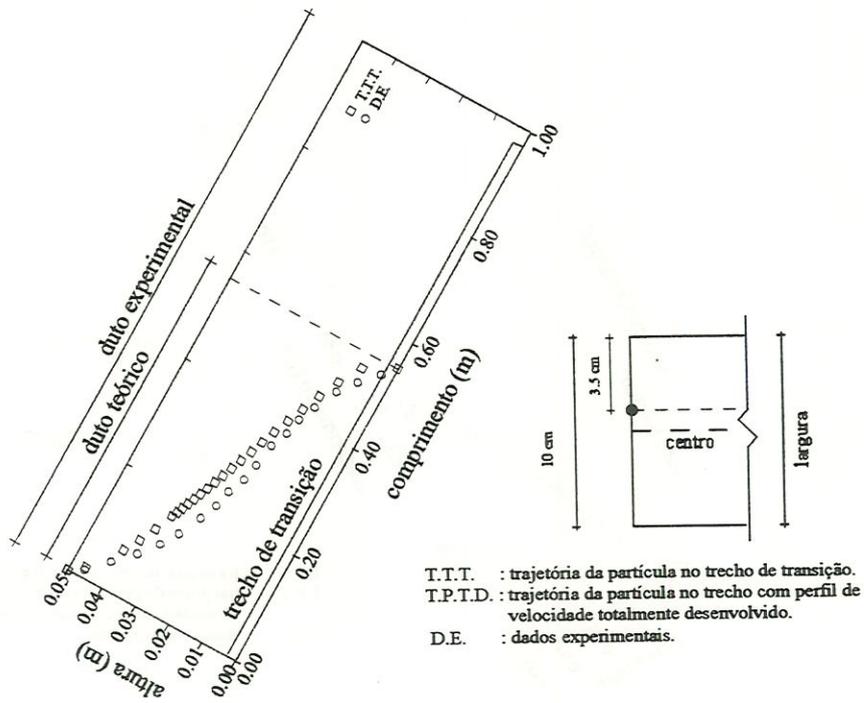


FIGURA C.106 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

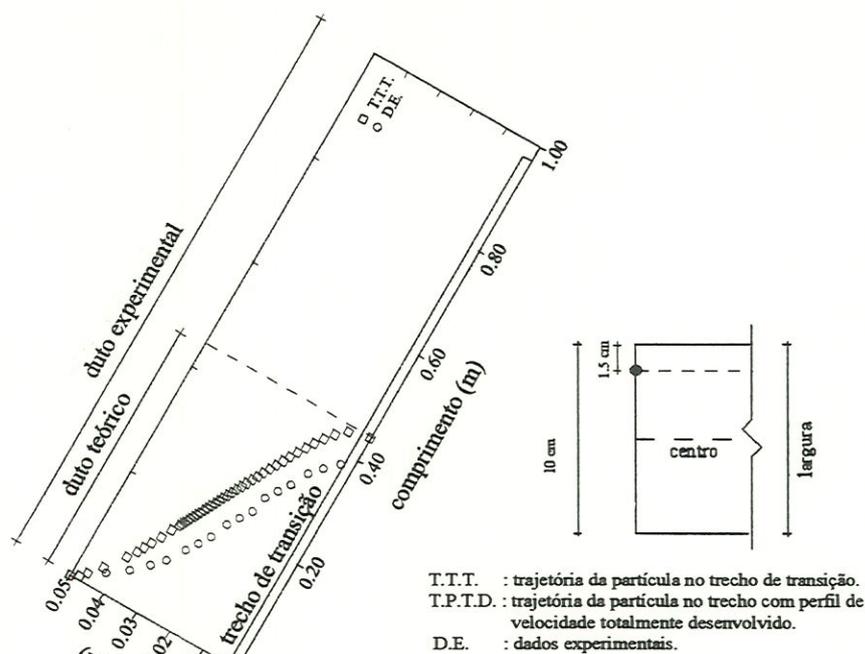


FIGURA C.107 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

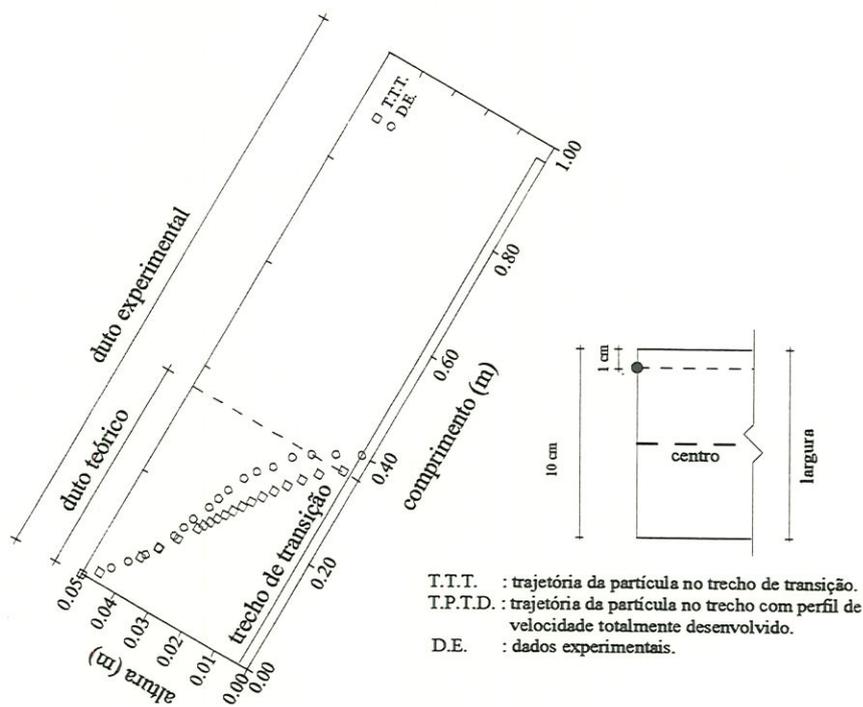


FIGURA C.108 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,1 \text{ m}$ $D_c = 0,067 \text{ m}$ $l_r = 0,97 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 220,46$

ANEXO D

Tabela D.1 - Descrição das Figuras do duto 5X20 cm²

Velocidade sedimentação cm/min	Velocidade escoamento cm/min	10 cm	7,5 cm	5 cm	2,5 cm	1 cm
(1) 2,24	30	Figura D.1	Figura D.2	Figura D.3	Figura D.4	Figura D.5
	25	Figura D.6	Figura D.7	Figura D.8	Figura D.9	Figura D.10
	20	Figura D.11	Figura D.12	Figura D.13	Figura D.14	Figura D.15
(2) 5,20	30	Figura D.16	Figura D.17	Figura D.18	Figura D.19	Figura D.20
	25	Figura D.21	Figura D.22	Figura D.23	Figura D.24	Figura D.25
	20	Figura D.26	Figura D.27	Figura D.28	Figura D.29	Figura D.30
(3) 3,32	30	Figura D.31	Figura D.32	Figura D.33	Figura D.34	Figura D.35
	25	Figura D.36	Figura D.37	Figura D.38	Figura D.39	Figura D.40
	20	Figura D.41	Figura D.42	Figura D.43	Figura D.44	Figura D.45
(4) 3,50	30	Figura D.46	Figura D.47	Figura D.48	Figura D.49	Figura D.50
	25	Figura D.51	Figura D.52	Figura D.53	Figura D.54	Figura D.55
	20	Figura D.56	Figura D.57	Figura D.58	Figura D.59	Figura D.60
(5) 2,72	30	Figura D.61	Figura D.62	Figura D.63	Figura D.64	Figura D.65
	25	Figura D.66	Figura D.67	Figura D.68	Figura D.69	Figura D.70
	20	Figura D.71	Figura D.72	Figura D.73	Figura D.74	Figura D.75
(6) 3,56	30	Figura D.76	Figura D.77	Figura D.78	Figura D.79	Figura D.80
	25	Figura D.81	Figura D.82	Figura D.83	Figura D.84	Figura D.85
	20	Figura D.86	Figura D.87	Figura D.88	Figura D.89	Figura D.90
(7) 4,52	30	Figura D.91	Figura D.92	Figura D.93	Figura D.94	Figura D.95
	25	Figura D.96	Figura D.97	Figura D.98	Figura D.99	Figura D.100
	20	Figura D.101	Figura D.102	Figura D.103	Figura D.104	Figura D.105
(8) 4,48	30	Figura D.106	Figura D.107	Figura D.108	Figura D.109	Figura D.110
	25	Figura D.111	Figura D.112	Figura D.113	Figura D.114	Figura D.115
	20	Figura D.116	Figura D.117	Figura D.118	Figura D.119	Figura D.120
(9) 3,93	30	Figura D.121	Figura D.122	Figura D.123	Figura D.124	Figura D.125
	25	Figura D.126	Figura D.127	Figura D.128	Figura D.129	Figura D.130
	20	Figura D.131	Figura D.132	Figura D.133	Figura D.134	Figura D.135

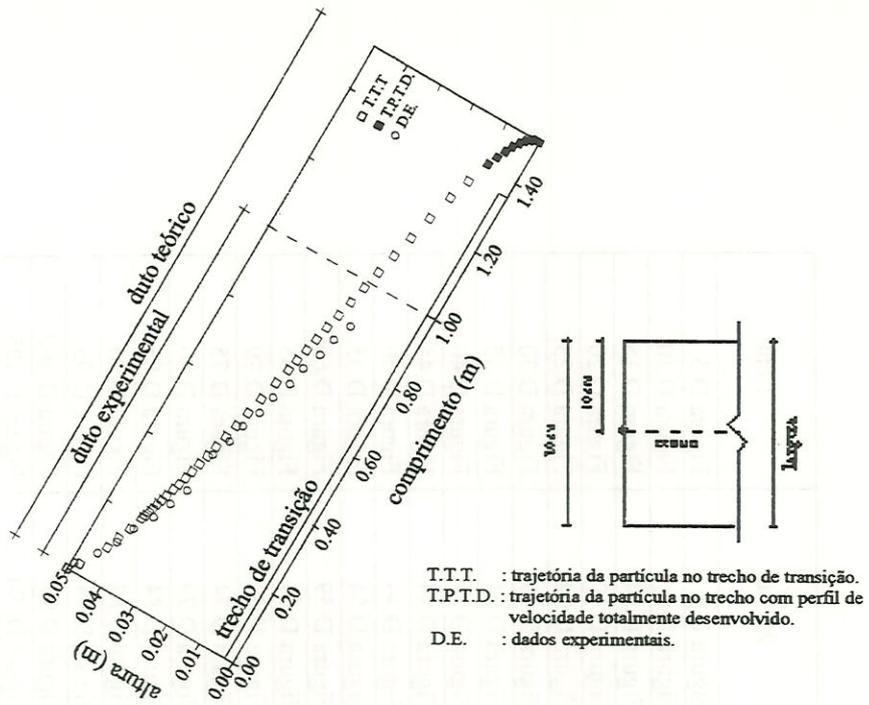


FIGURA D.1 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

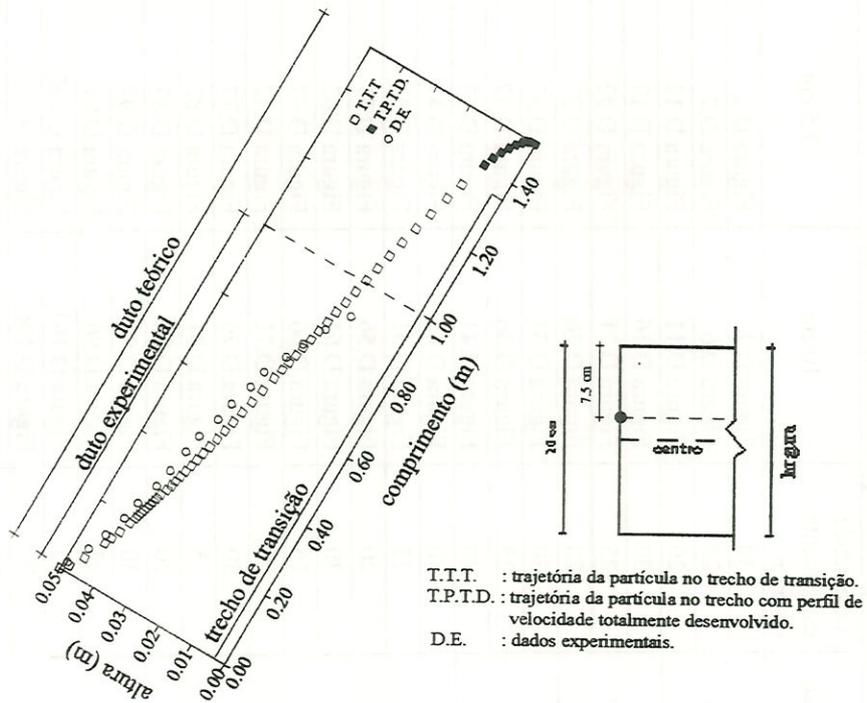


FIGURA D.2 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

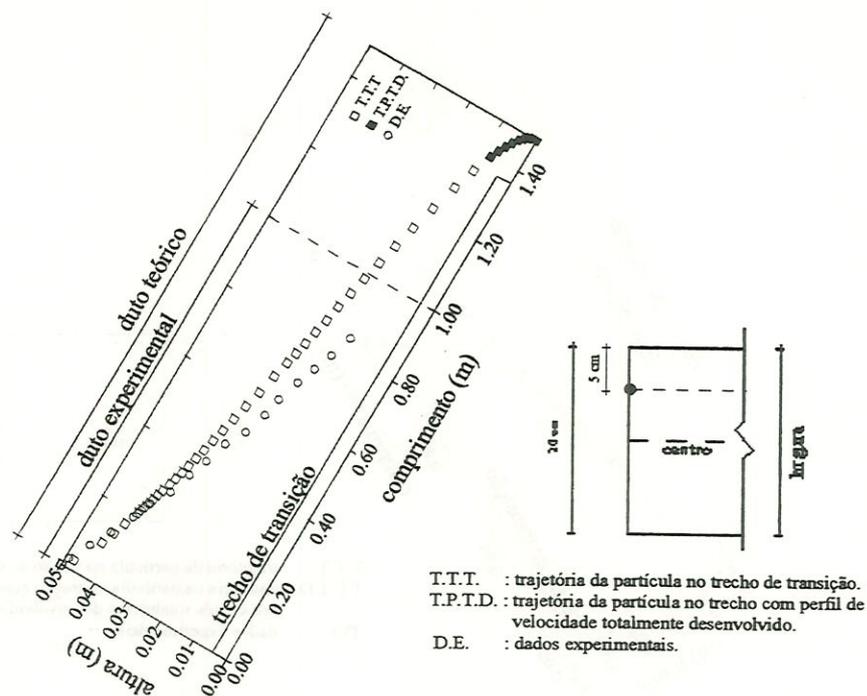


FIGURA D.3 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

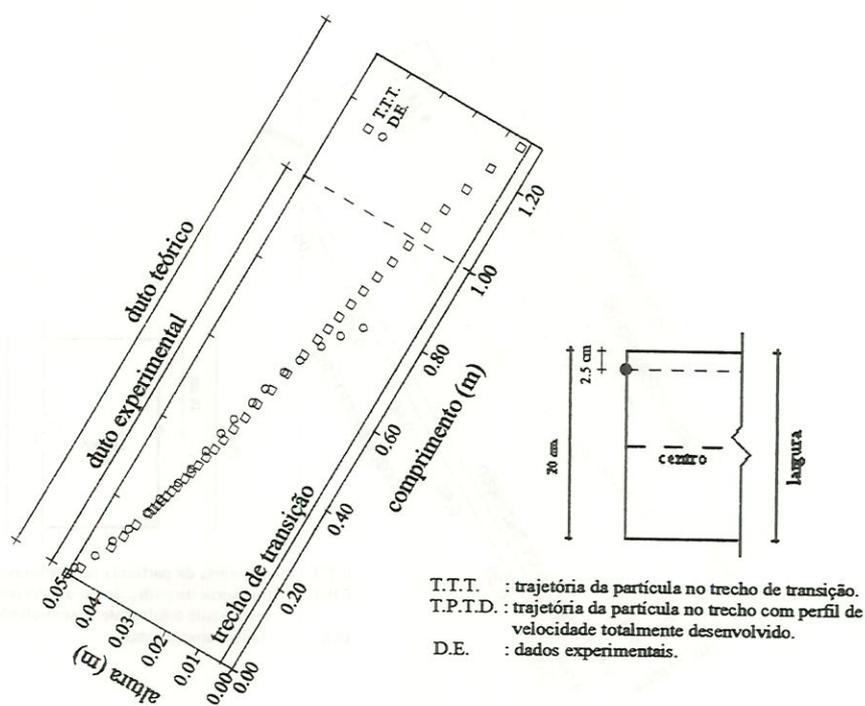


FIGURA D.4 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

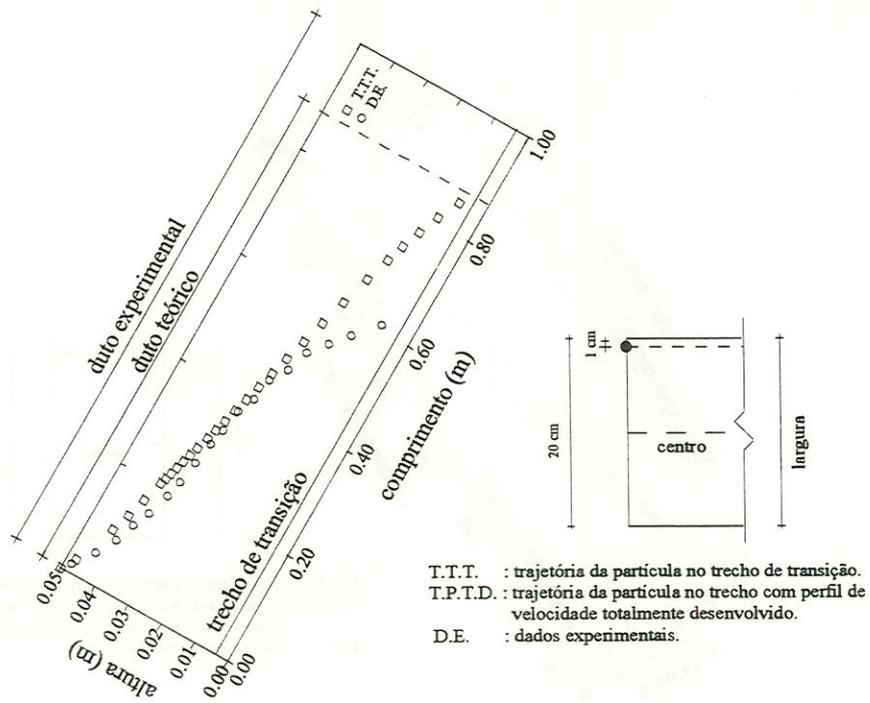


FIGURA D.5 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

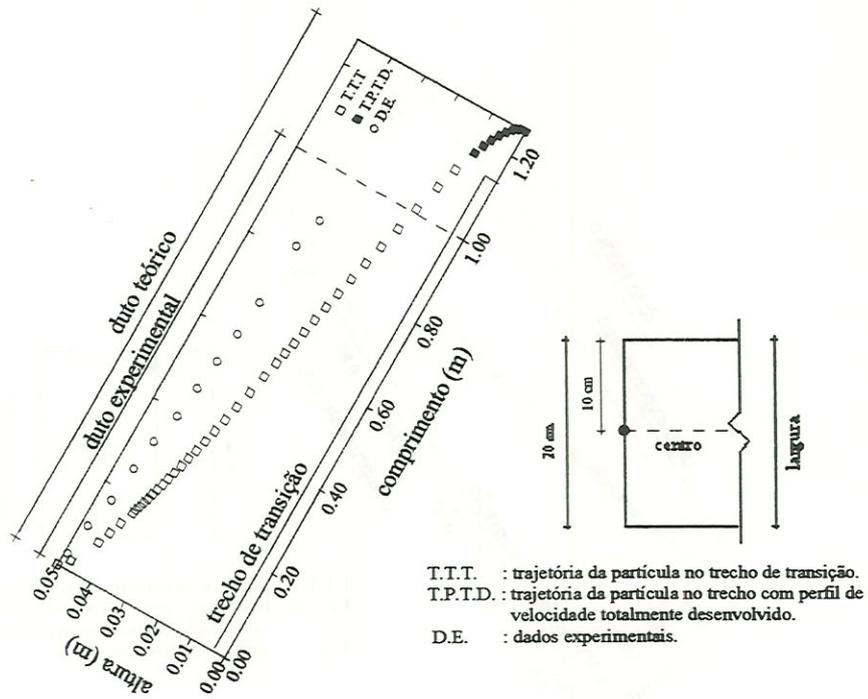


FIGURA D.6 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

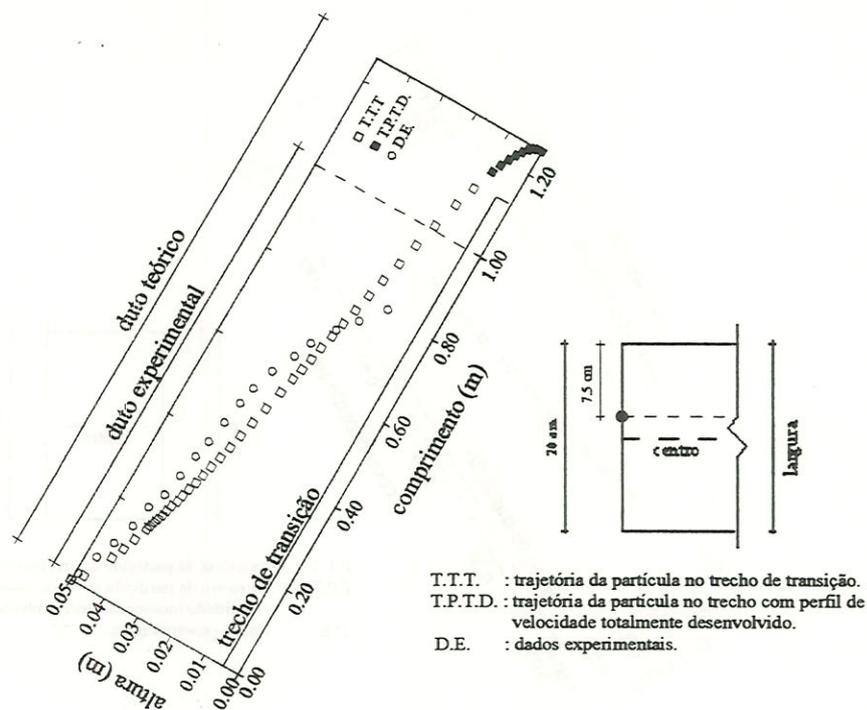


FIGURA D.7 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

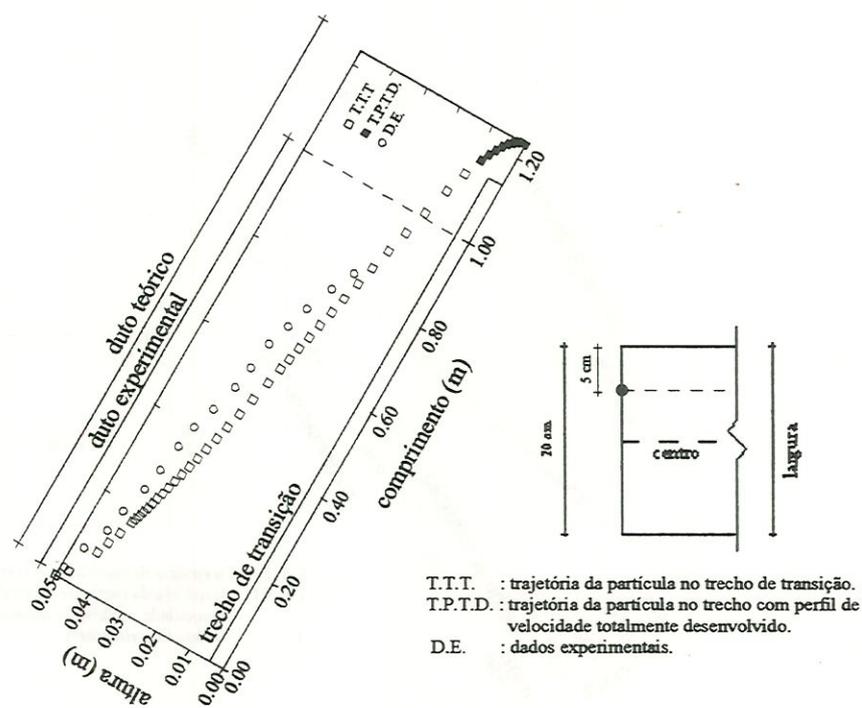


FIGURA D.8 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

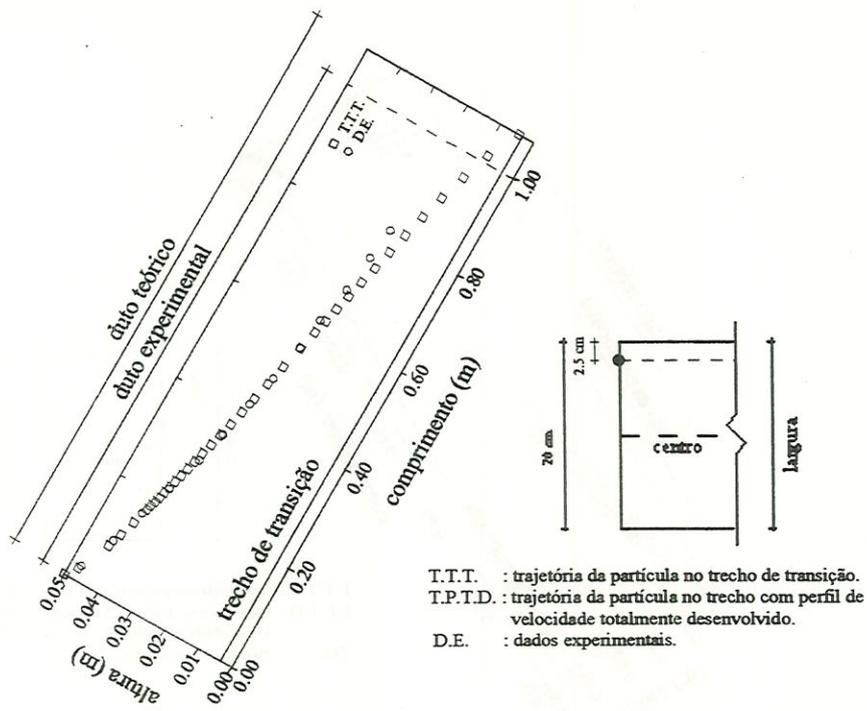


FIGURA D.9 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

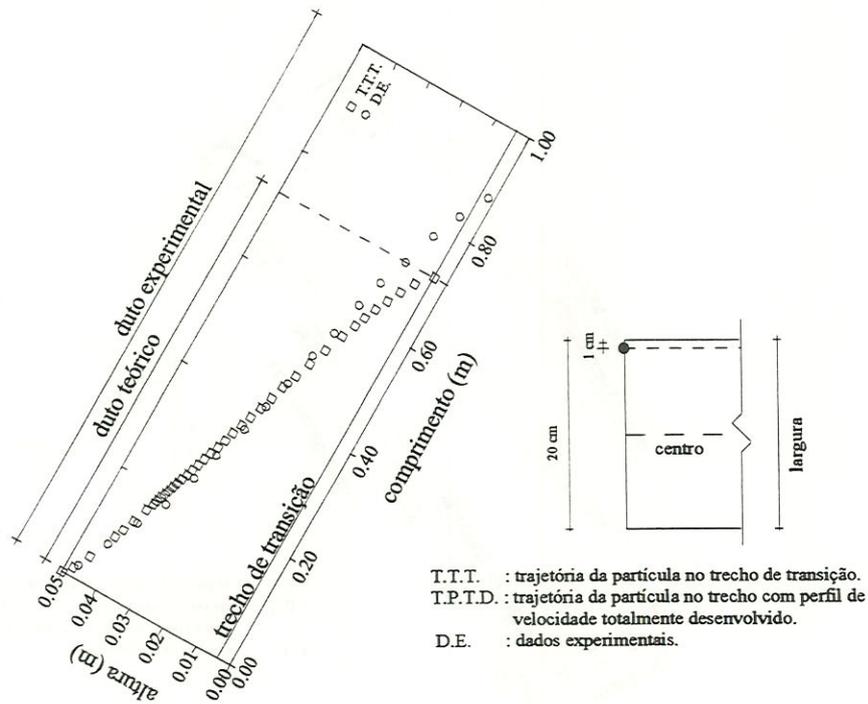


FIGURA D.10 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

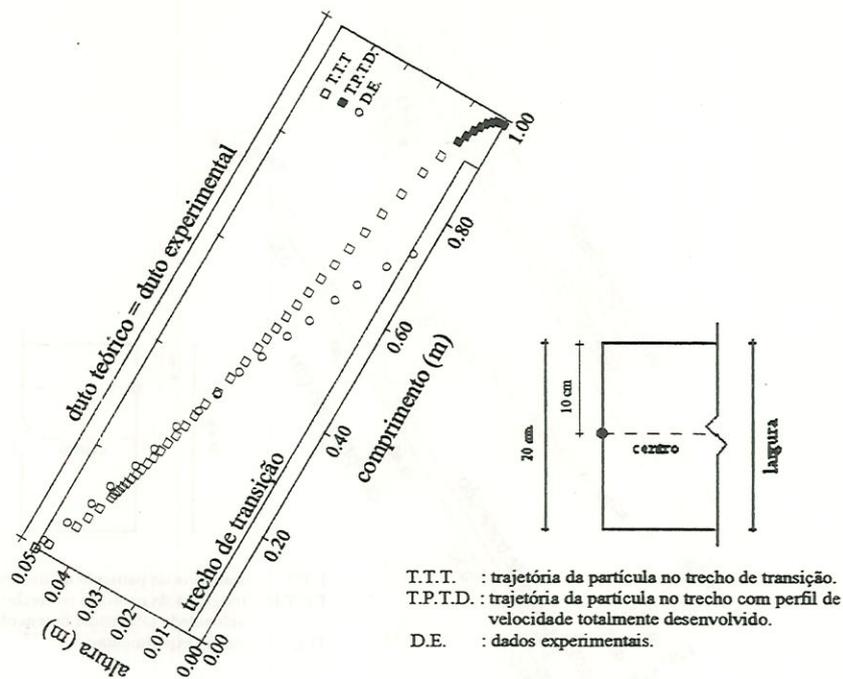


FIGURA D.11 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

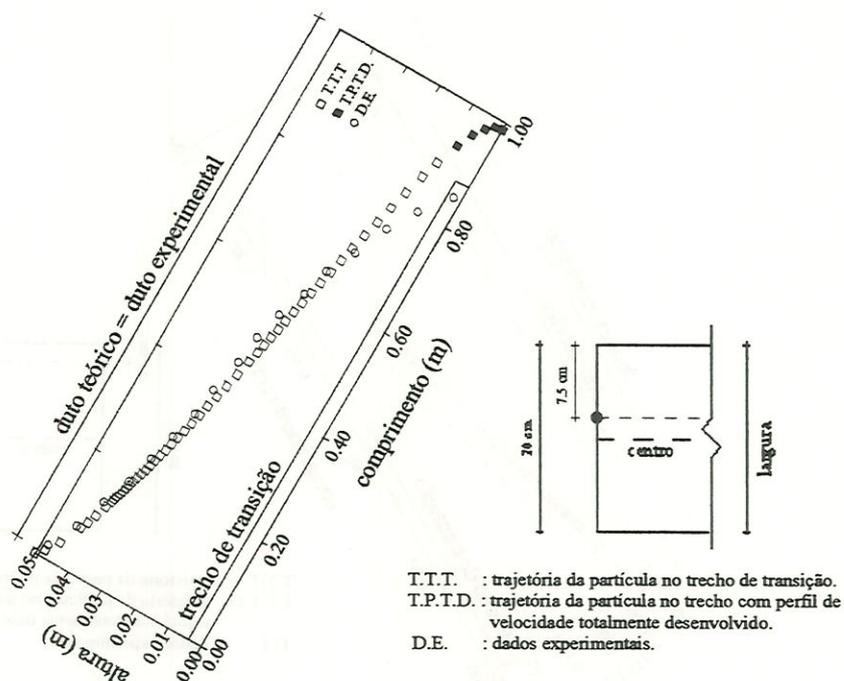


FIGURA D.12 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

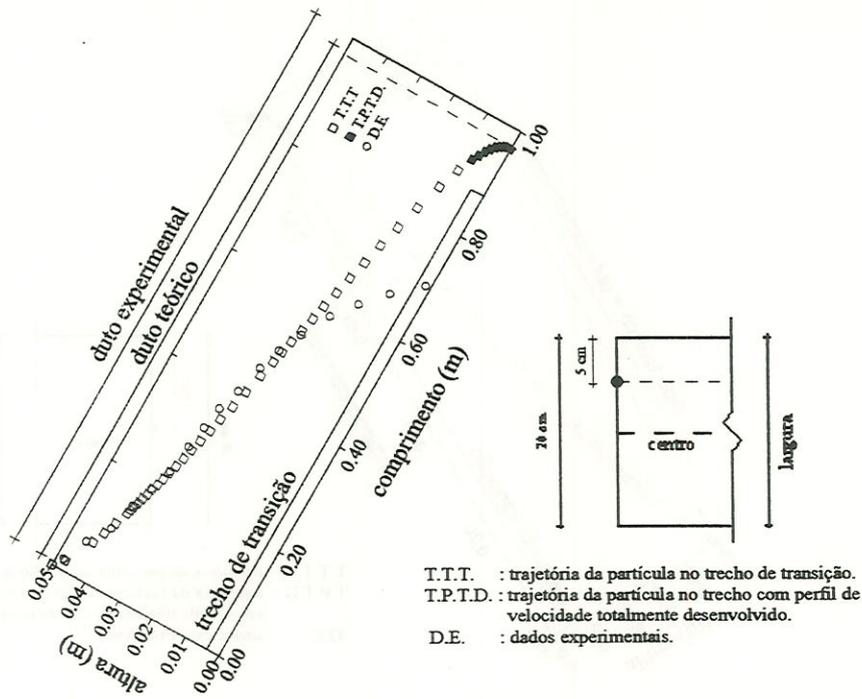


FIGURA D.13 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

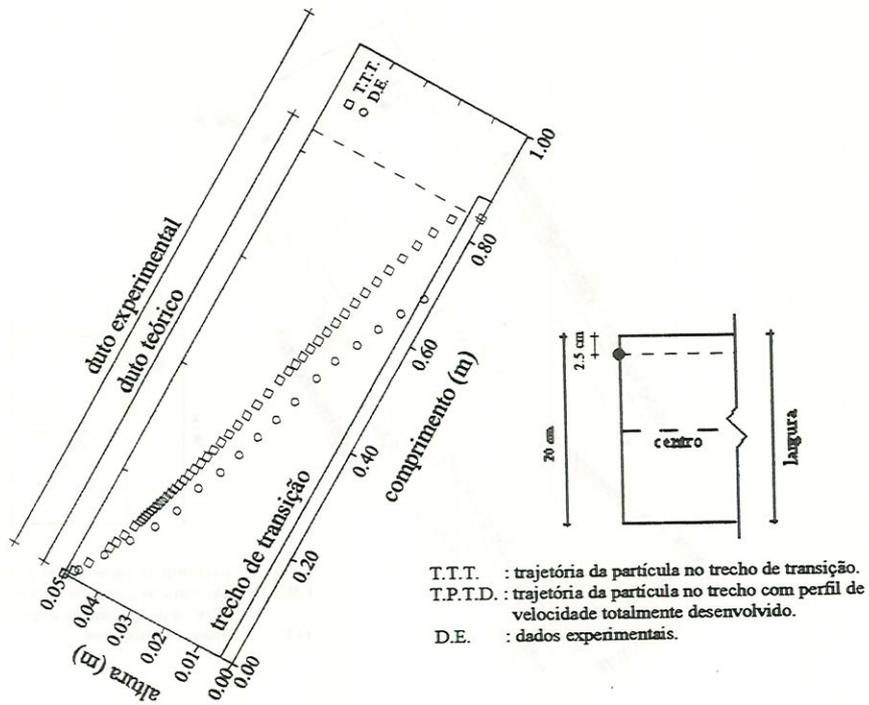


FIGURA D.14 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

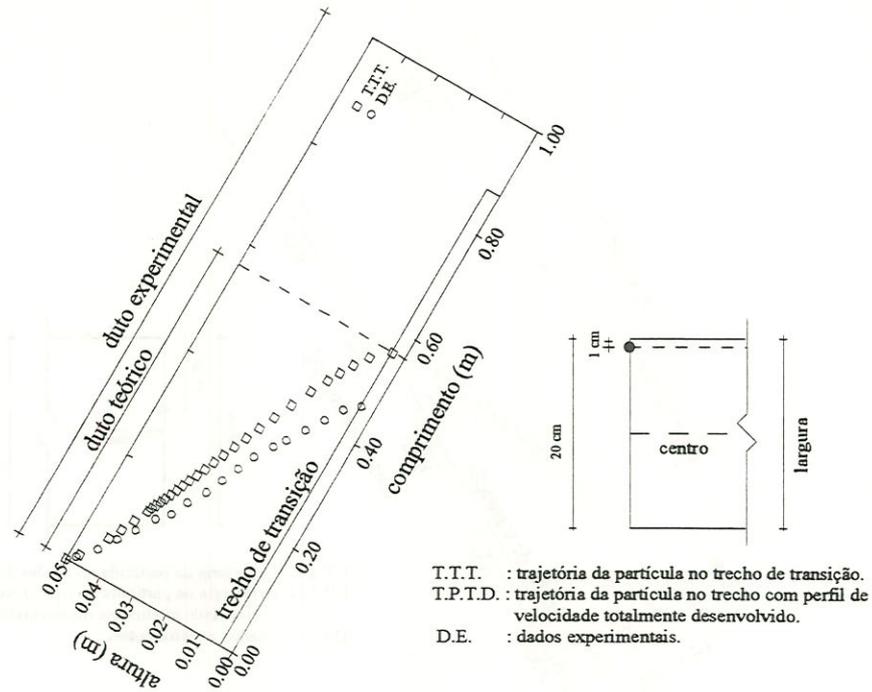


FIGURA D.15 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

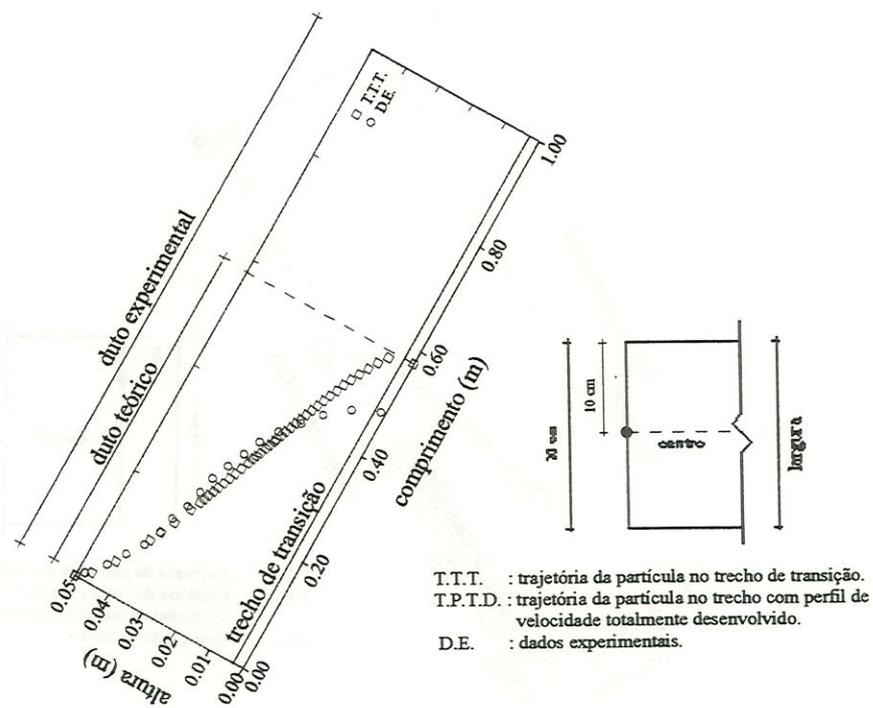


FIGURA D.16 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

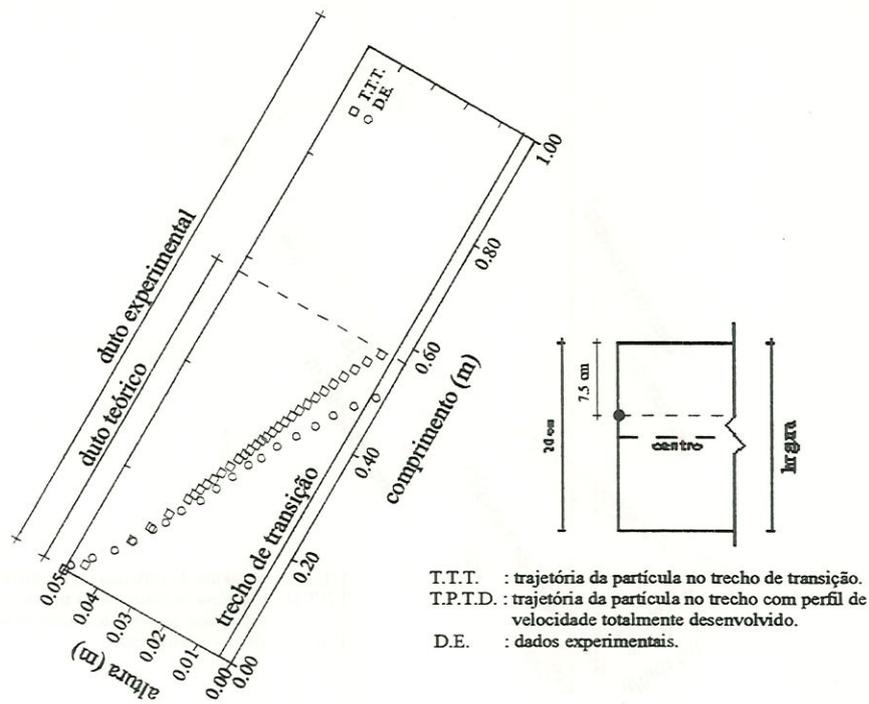


FIGURA D.17 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

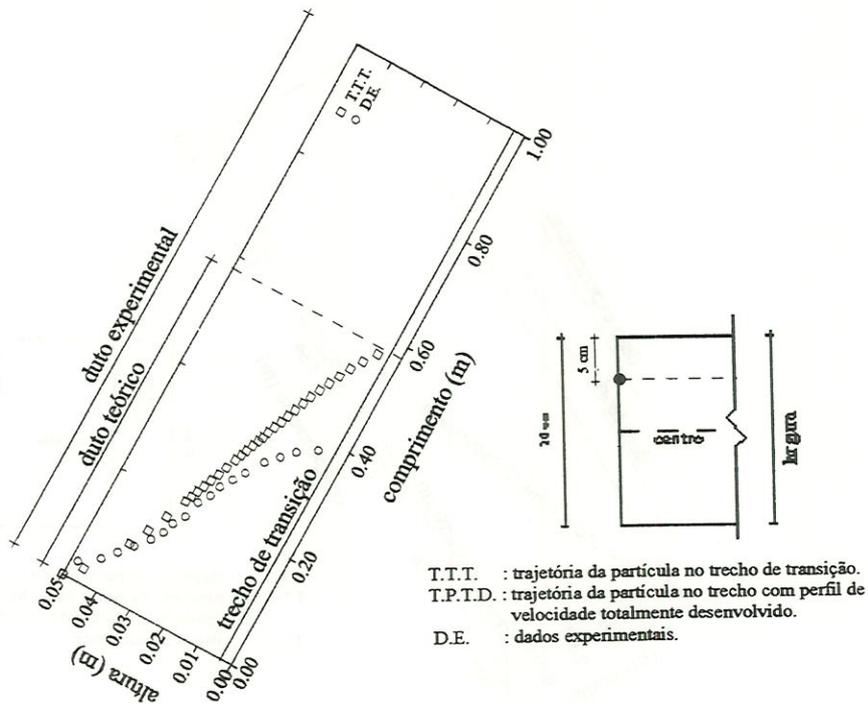


FIGURA D.18 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

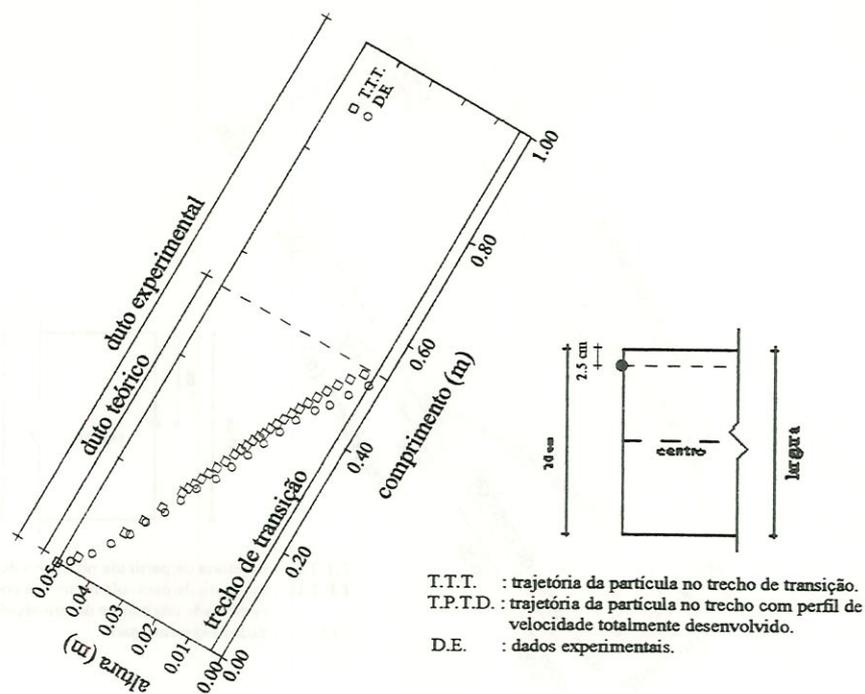


FIGURA D.19 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

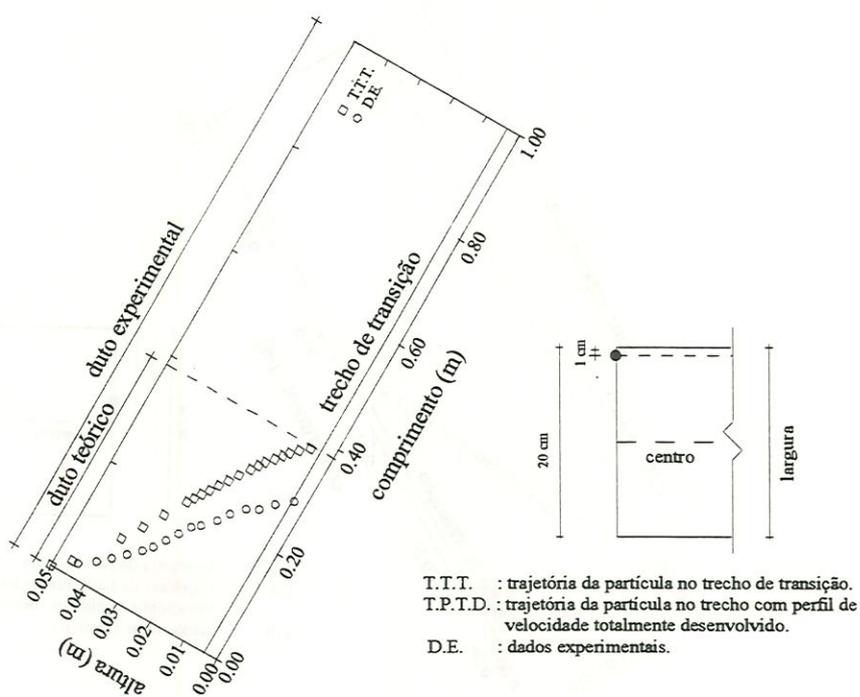


FIGURA D.20 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

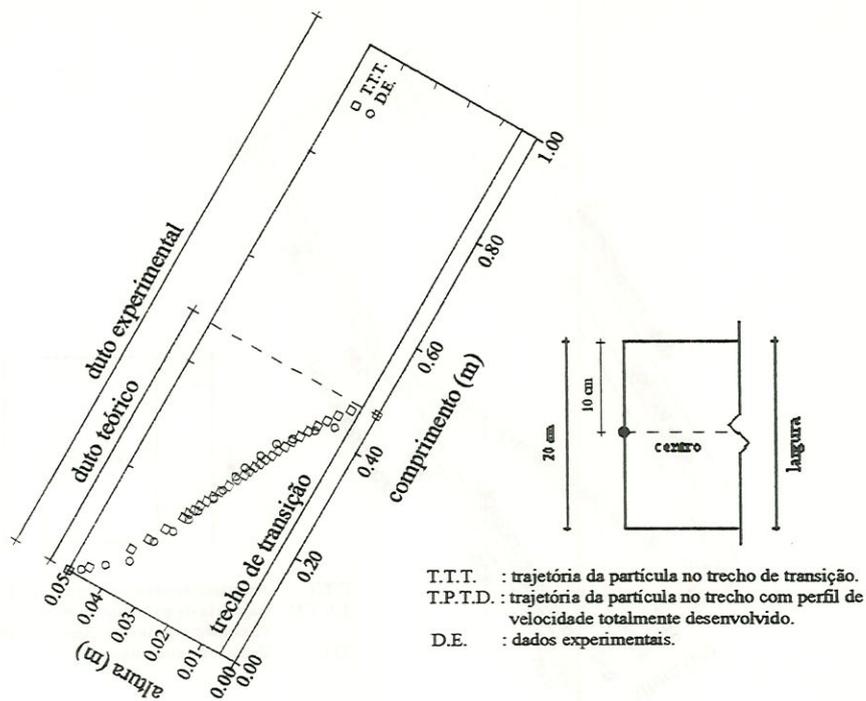


FIGURA D.21 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 5,20$ cm/min $Re = 331,28$

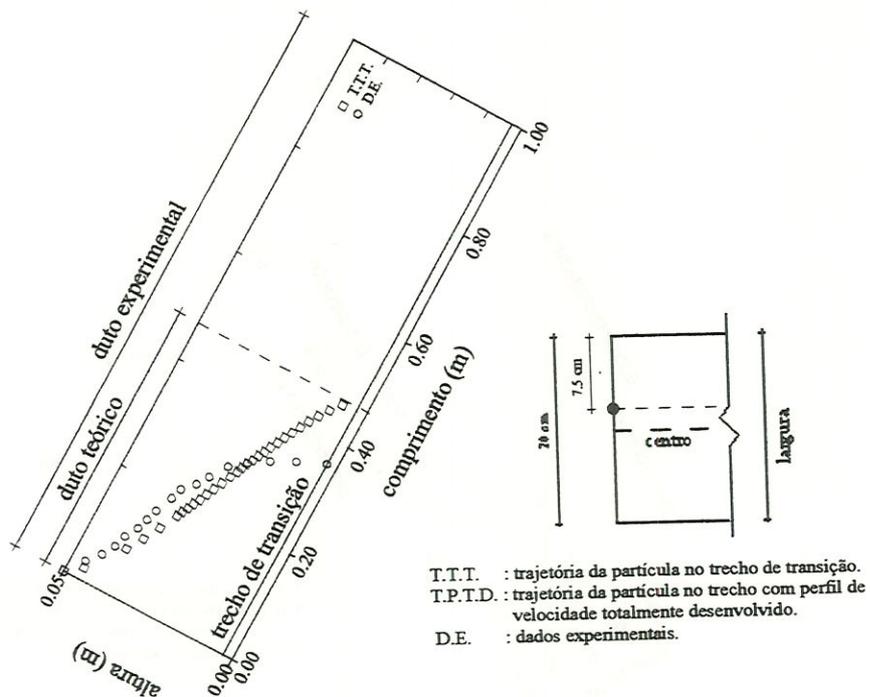


FIGURA D.22 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 5,20$ cm/min $Re = 331,28$

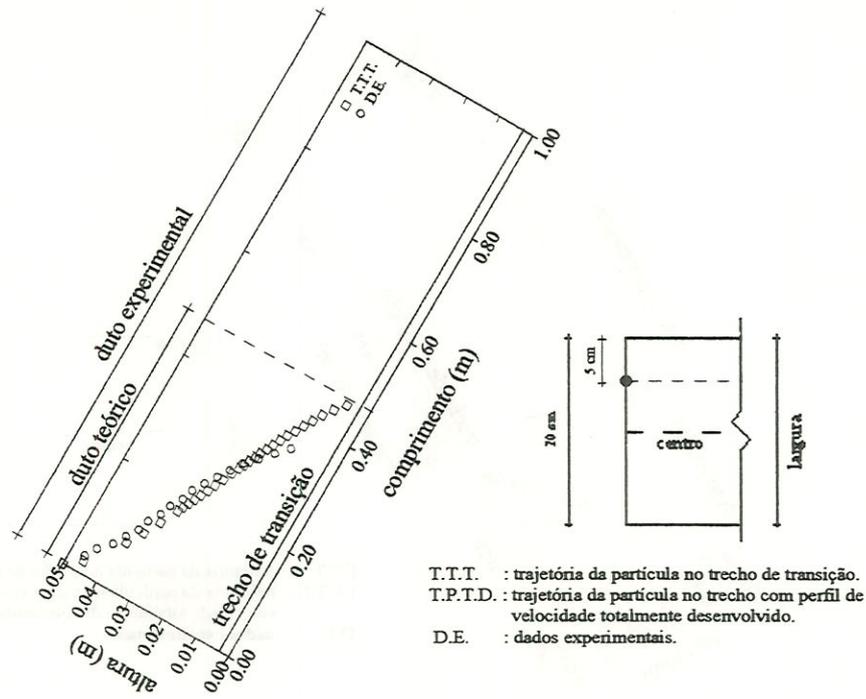


FIGURA D.23 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 5,20$ cm/min $Re = 331,28$

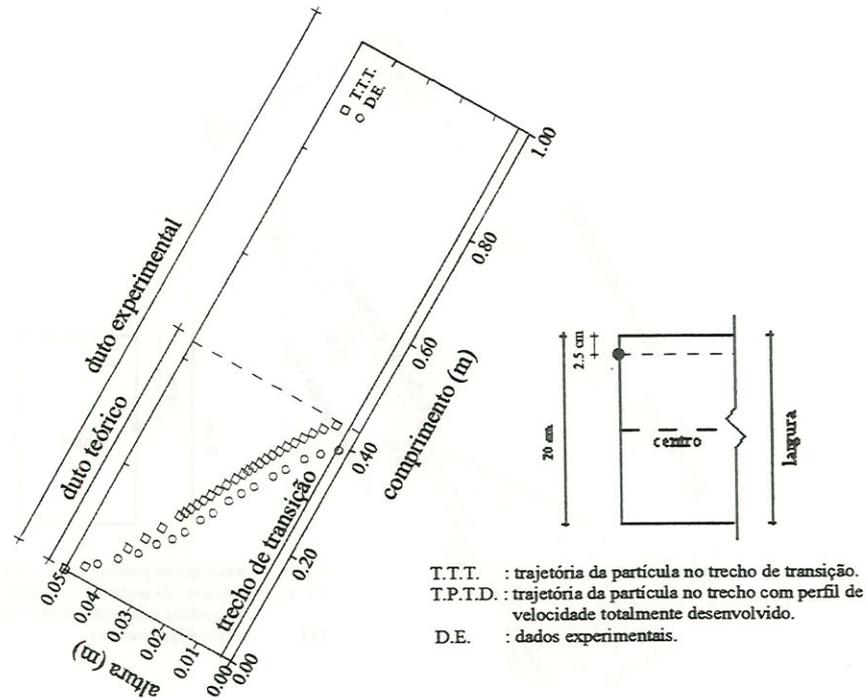


FIGURA D.24 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 5,20$ cm/min $Re = 331,28$

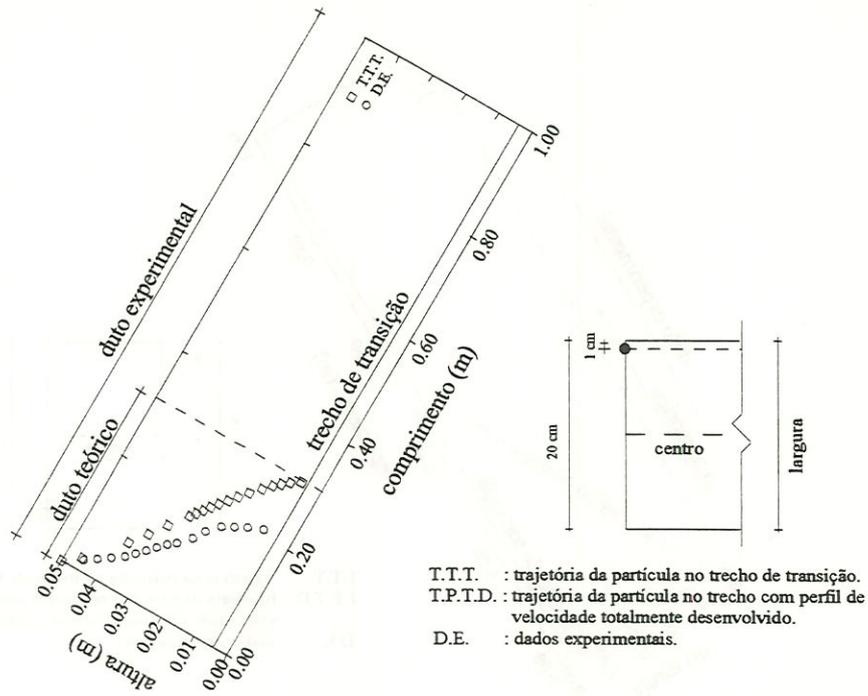


FIGURA D.25 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

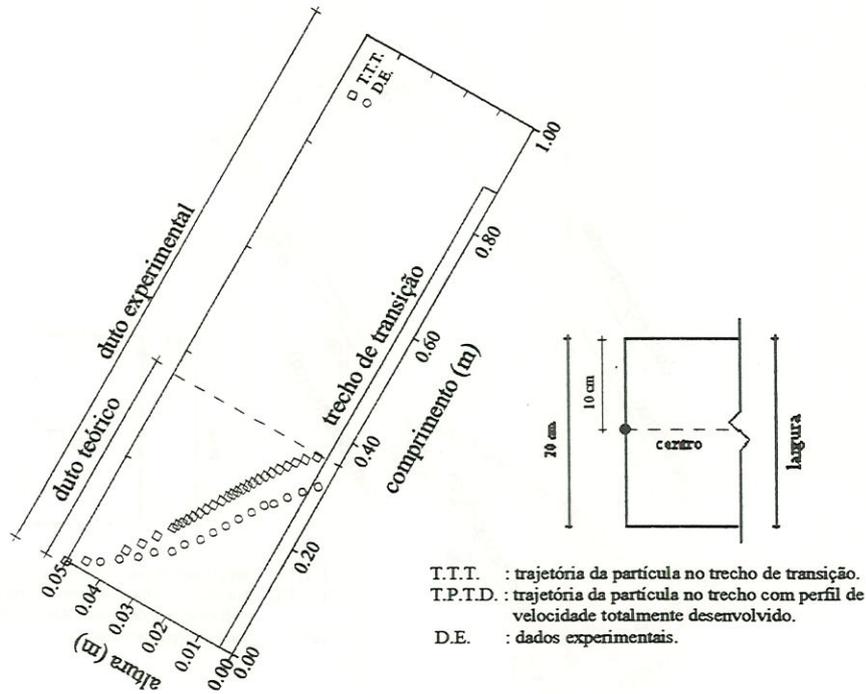


FIGURA D.26 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

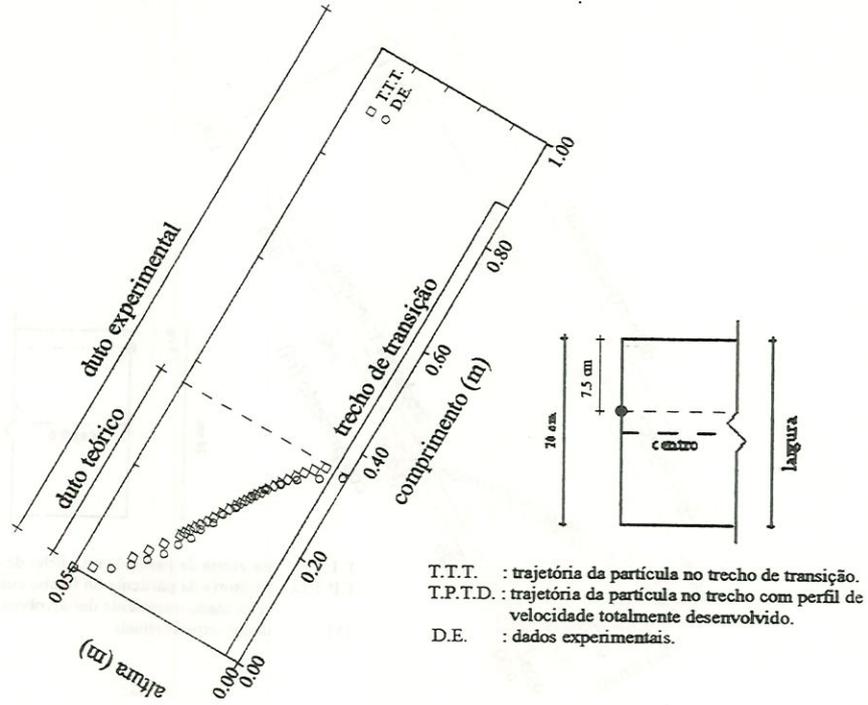


FIGURA D.27 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

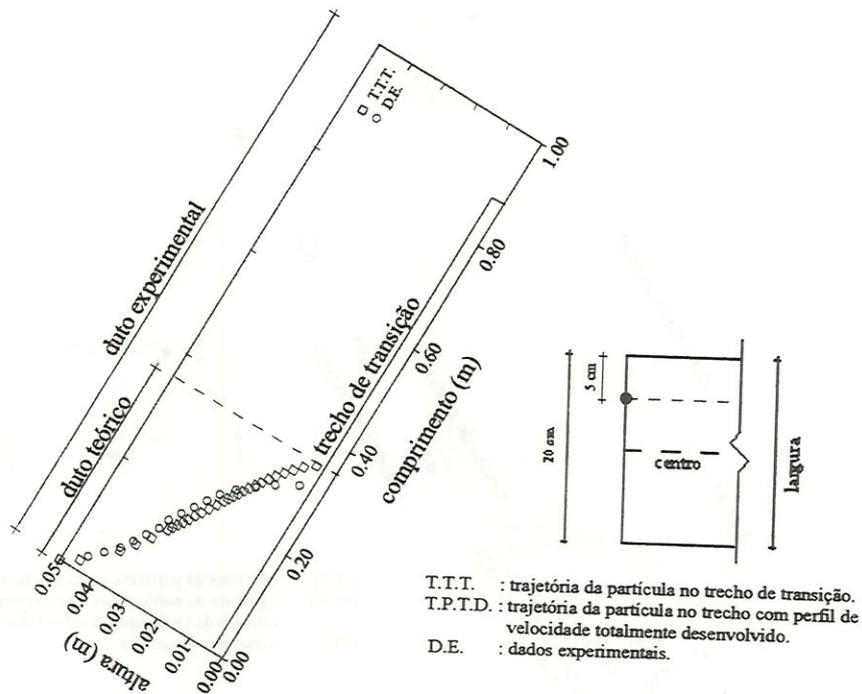


FIGURA D.28 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

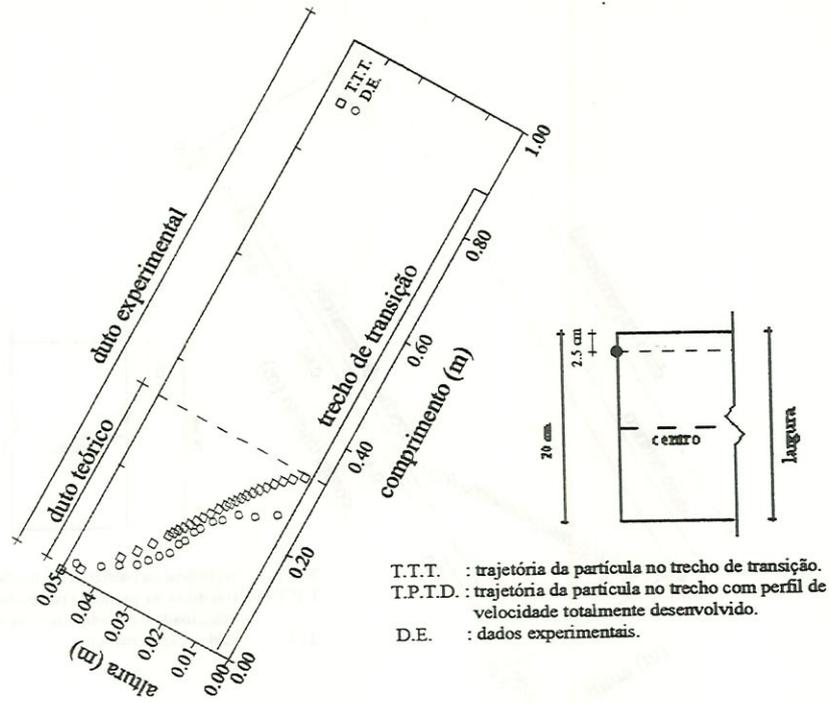


FIGURA D.29 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

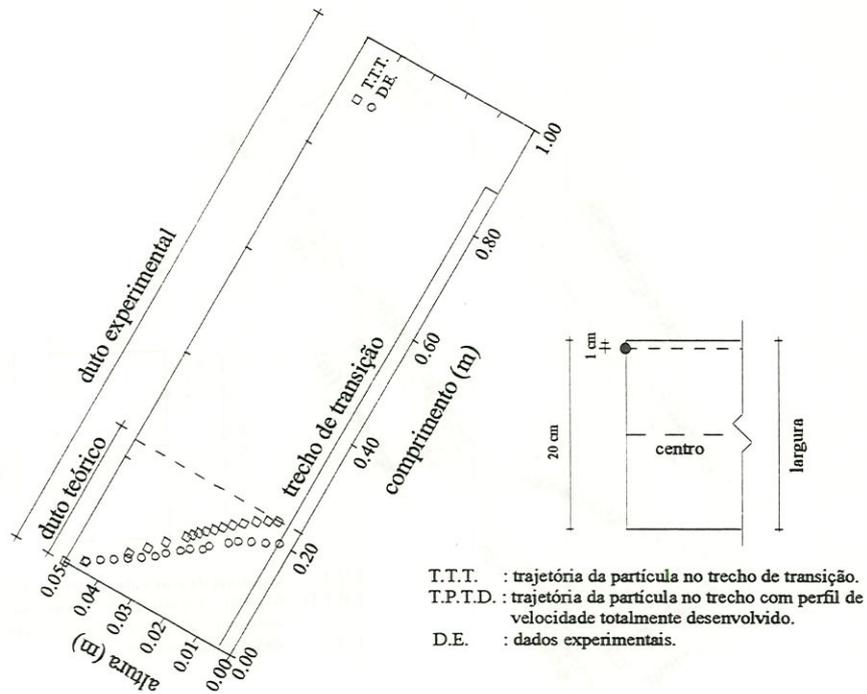


FIGURA D.30 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

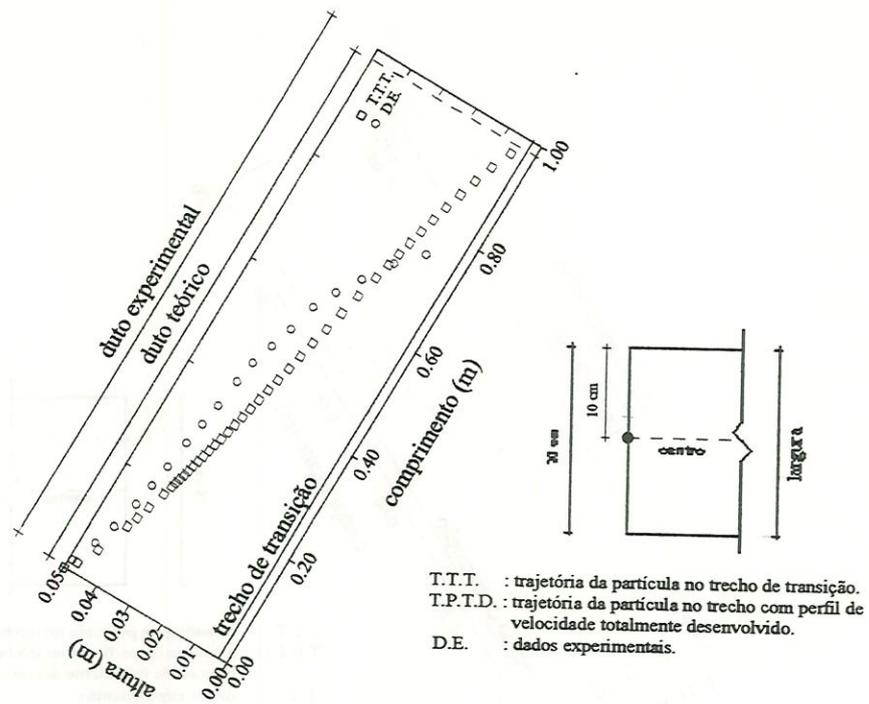


FIGURA D.31 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,36$ m
 $V_{em} = 30$ cm/min $V_s = 3,32$ cm/min $Re = 397,22$

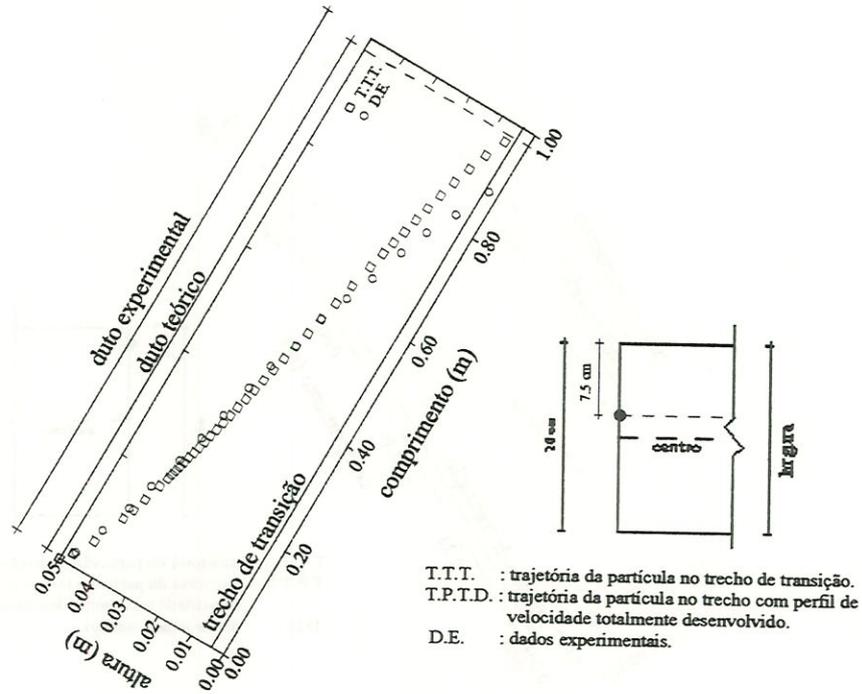


FIGURA D.32 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,36$ m
 $V_{em} = 30$ cm/min $V_s = 3,32$ cm/min $Re = 397,22$

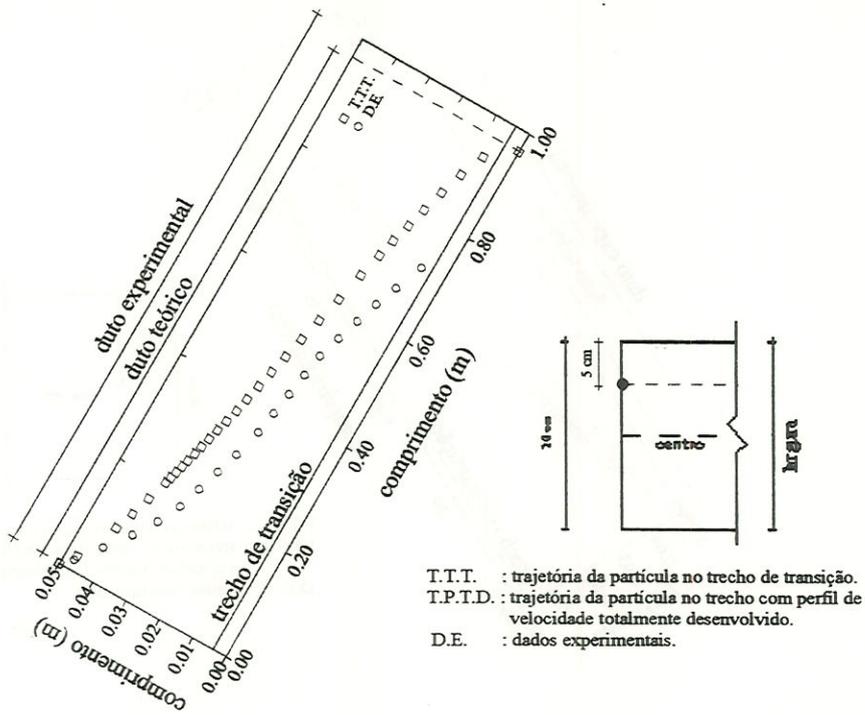


FIGURA D.33 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

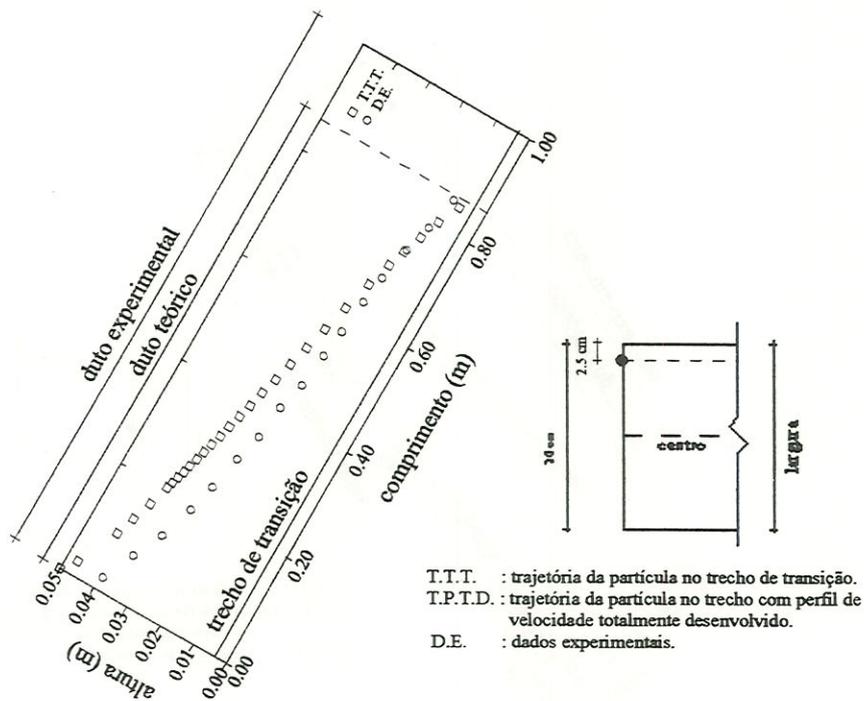


FIGURA D.34 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

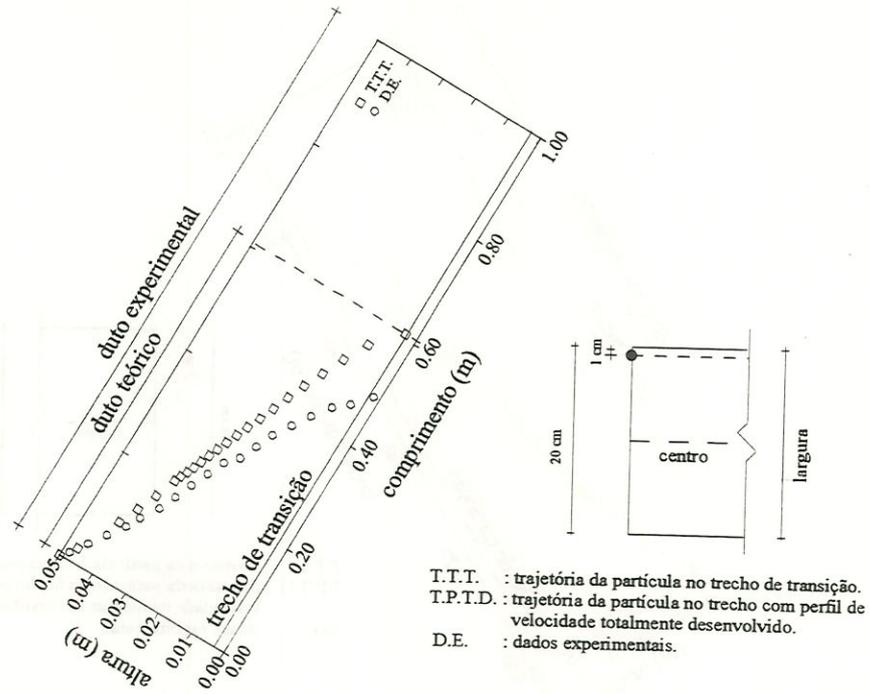


FIGURA D.35 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

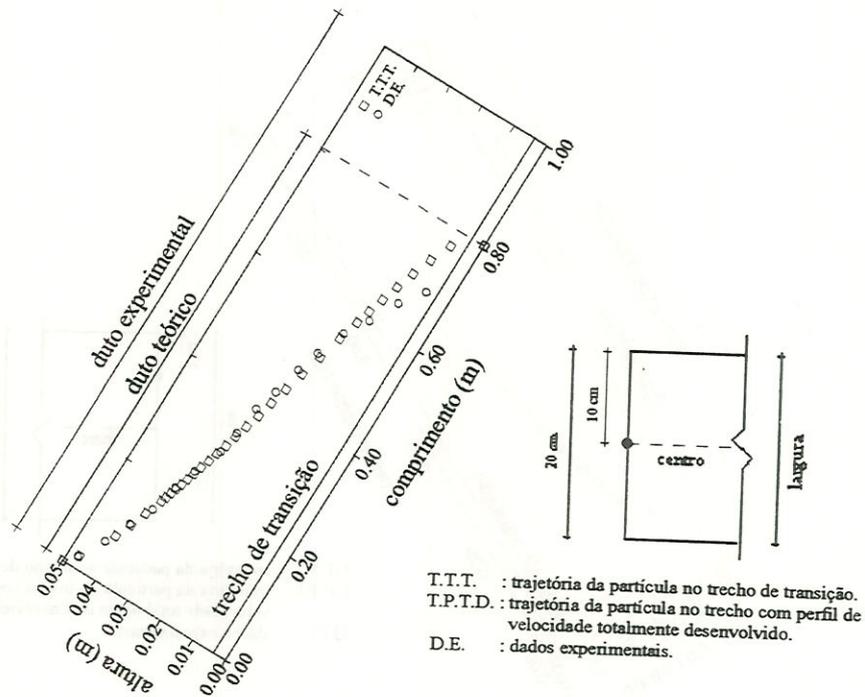


FIGURA D.36 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

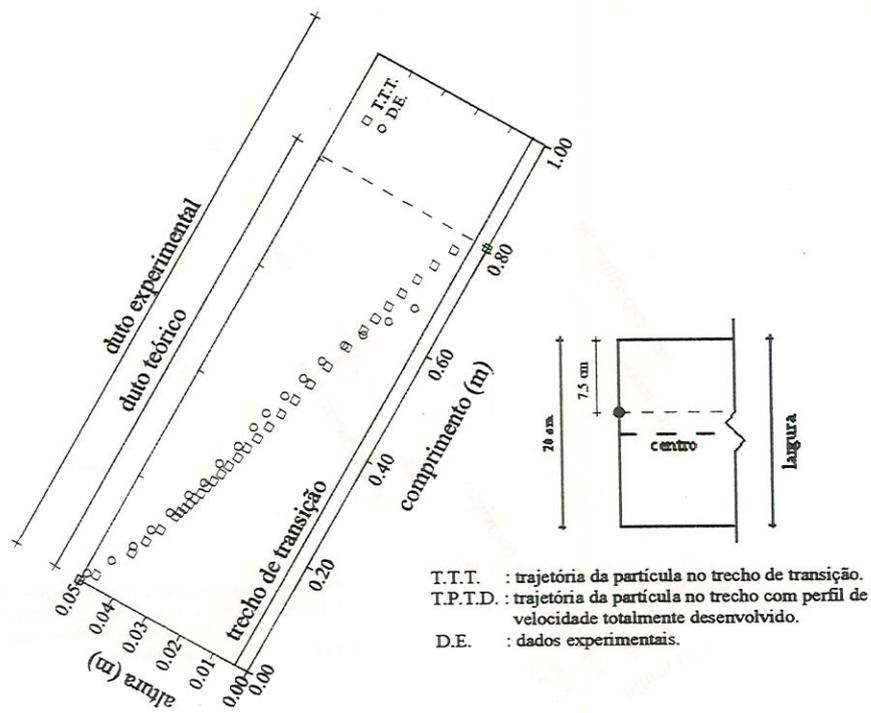


FIGURA D.37 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

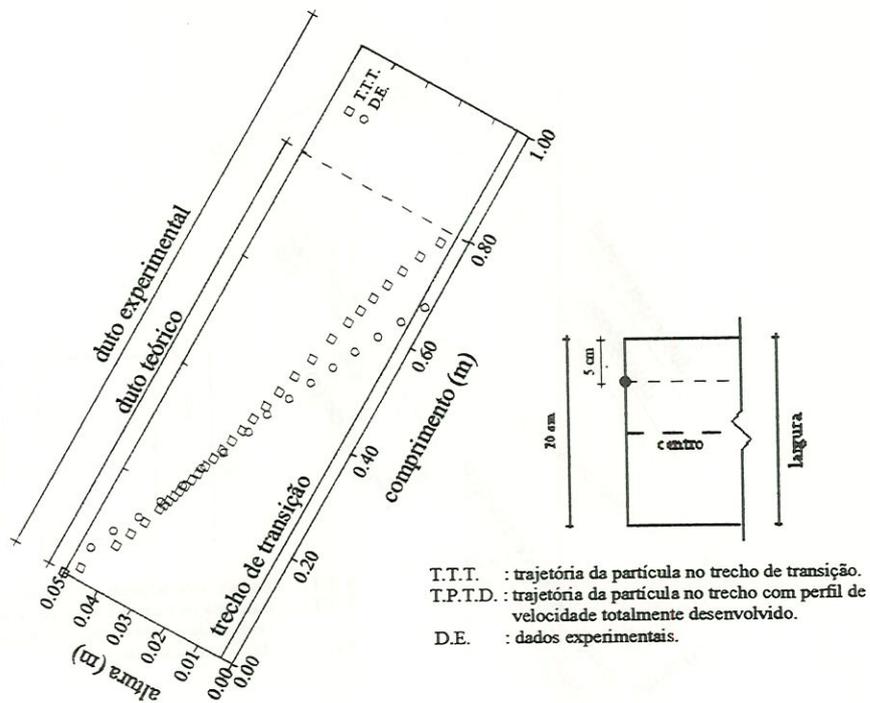


FIGURA D.38 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

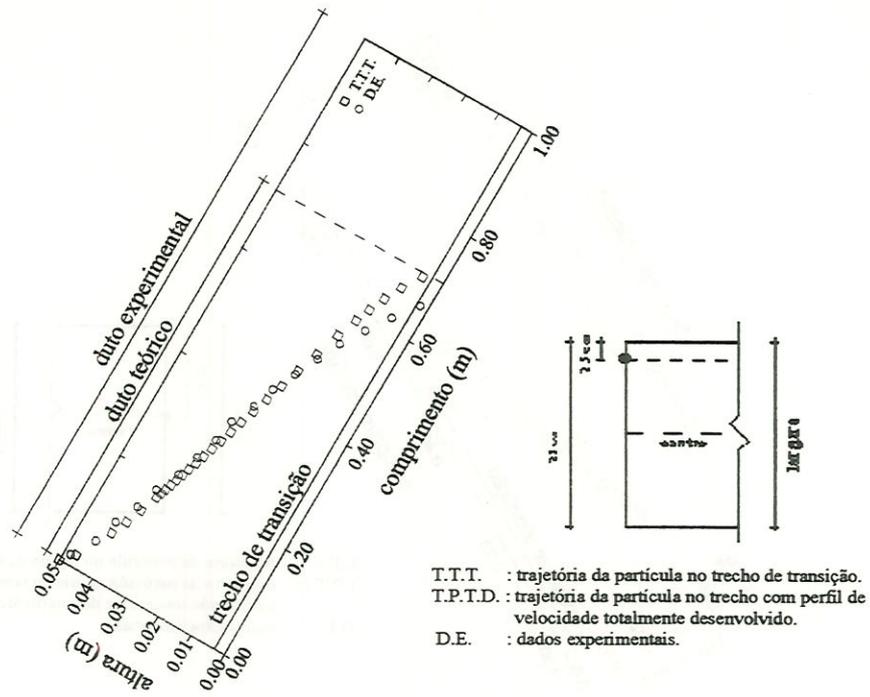


FIGURA D.39 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

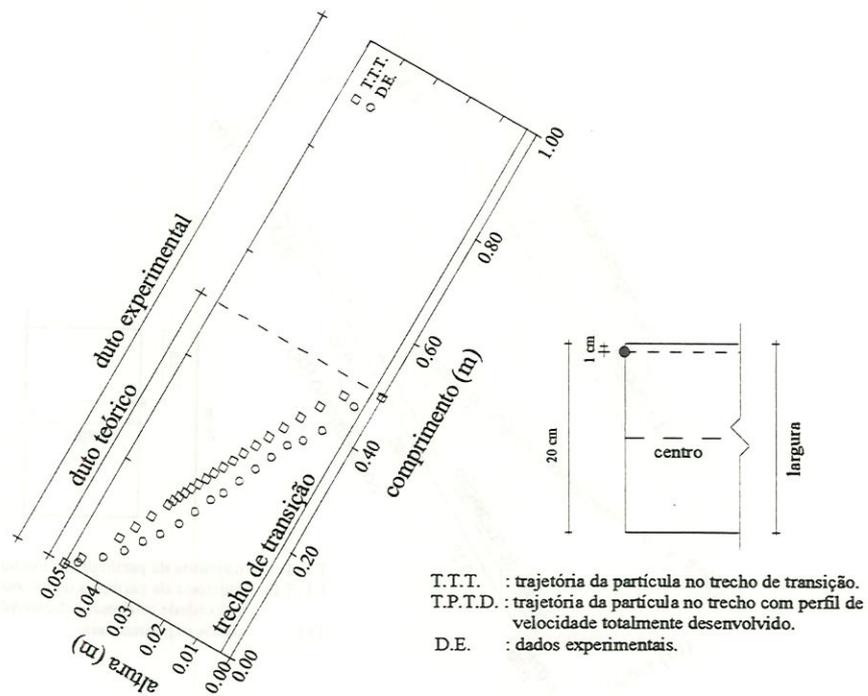


FIGURA D.40 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

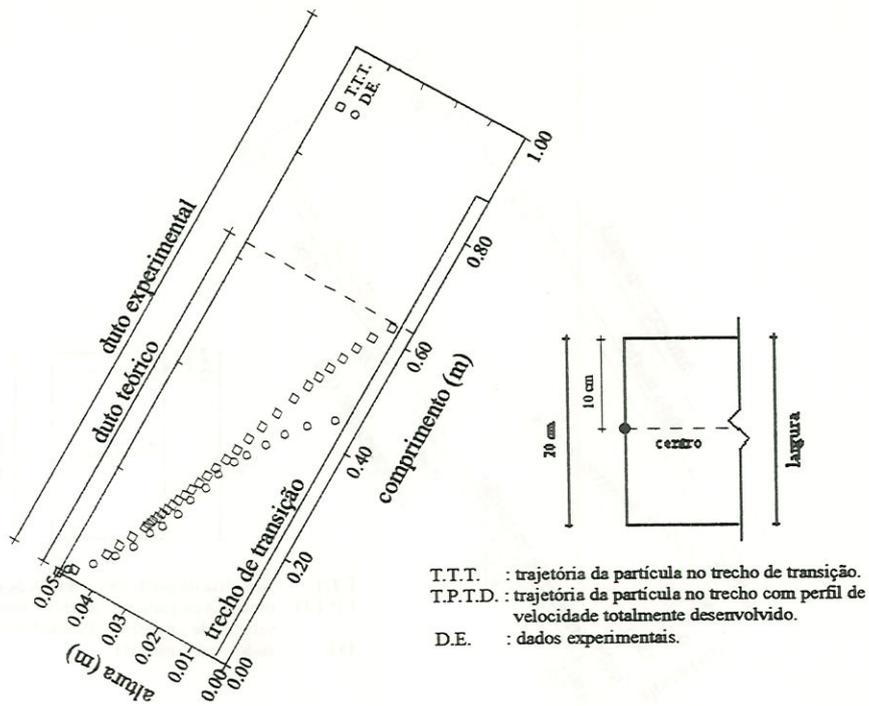


FIGURA D.41 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

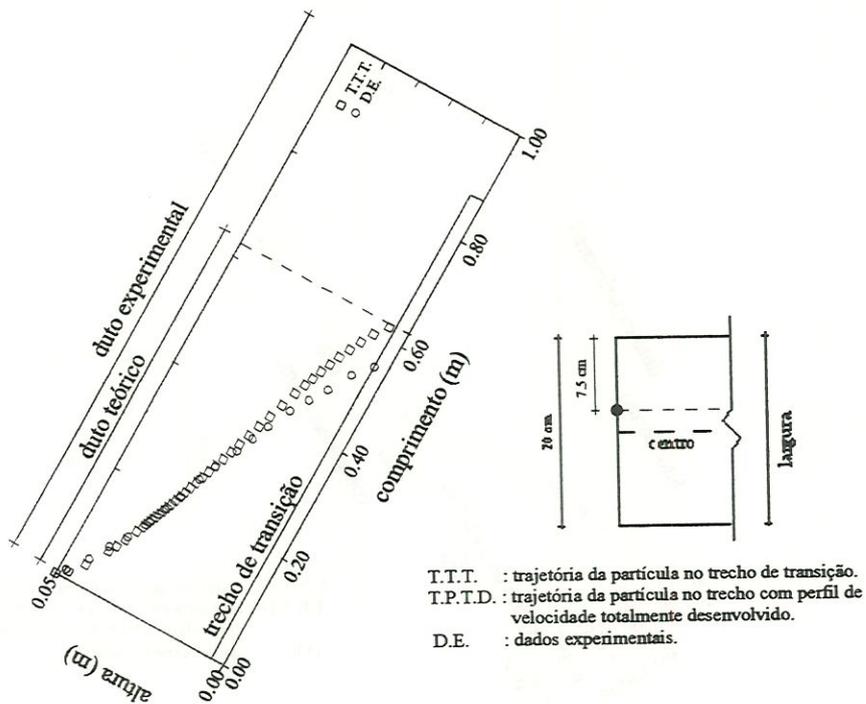


FIGURA D.42 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

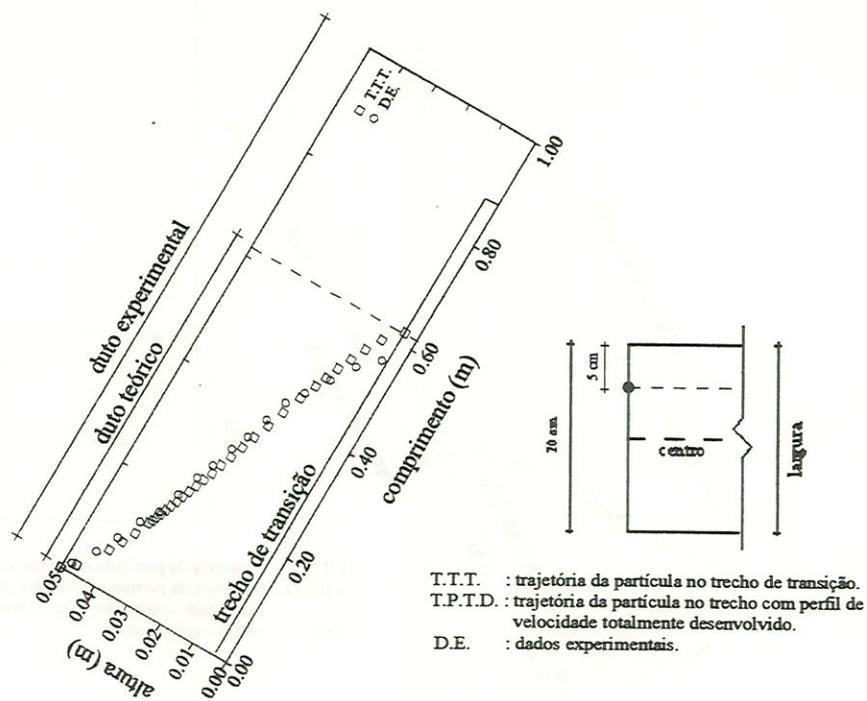


FIGURA D.43 - Trajetória da partícula 3

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

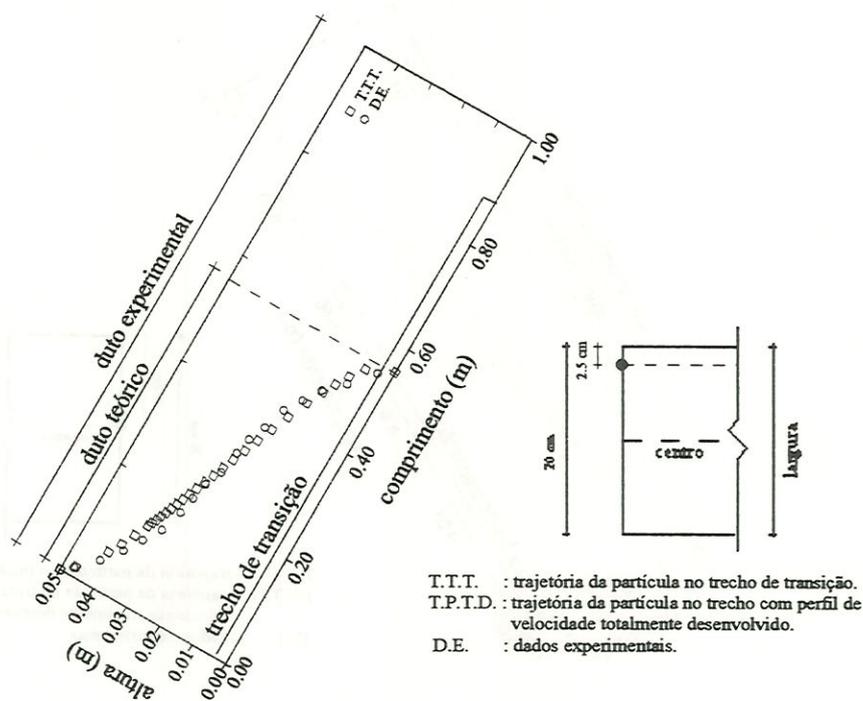


FIGURA D.44 - Trajetória da partícula 3

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

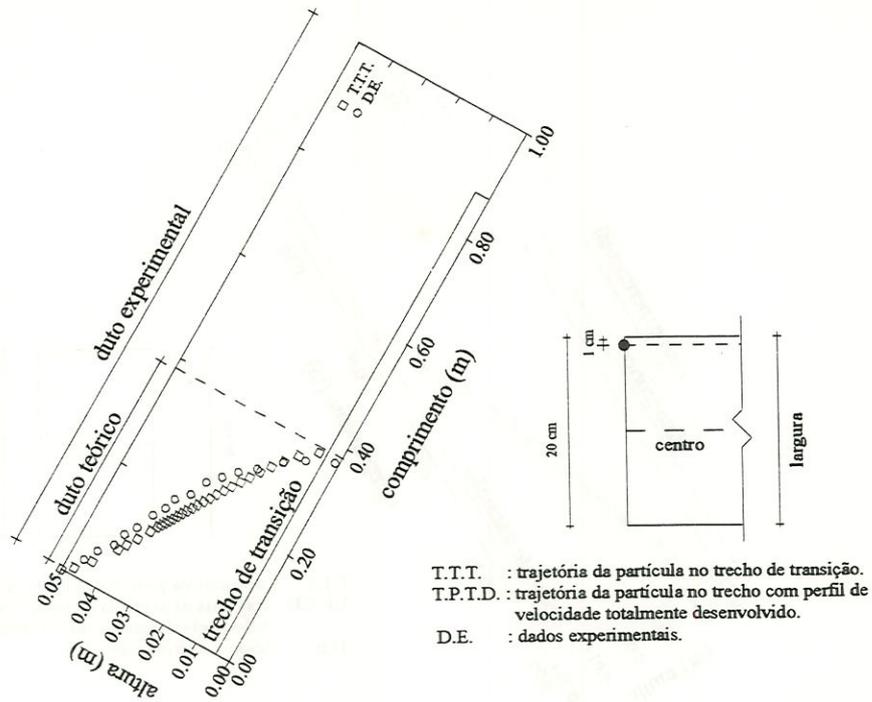


FIGURA D.45 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

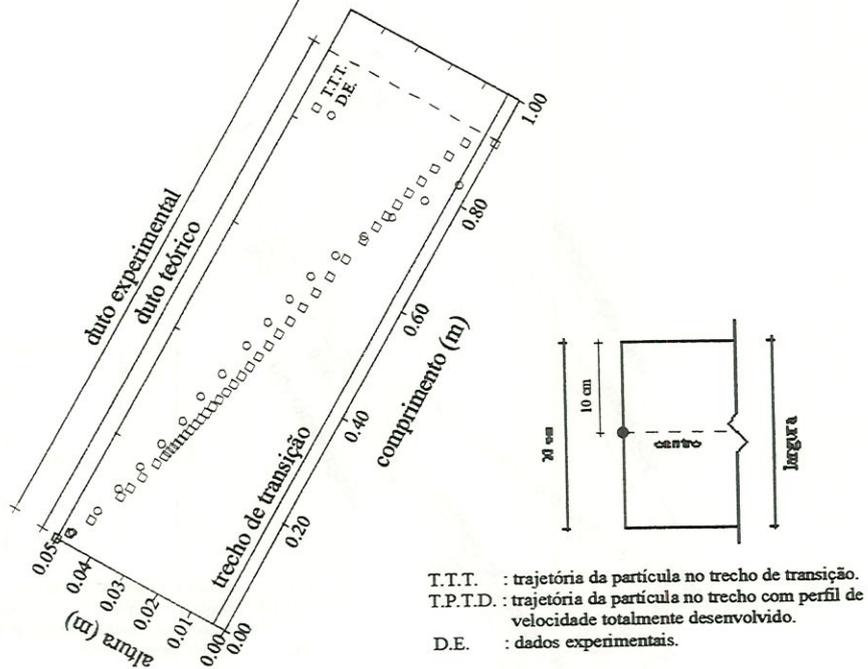


FIGURA D.46 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

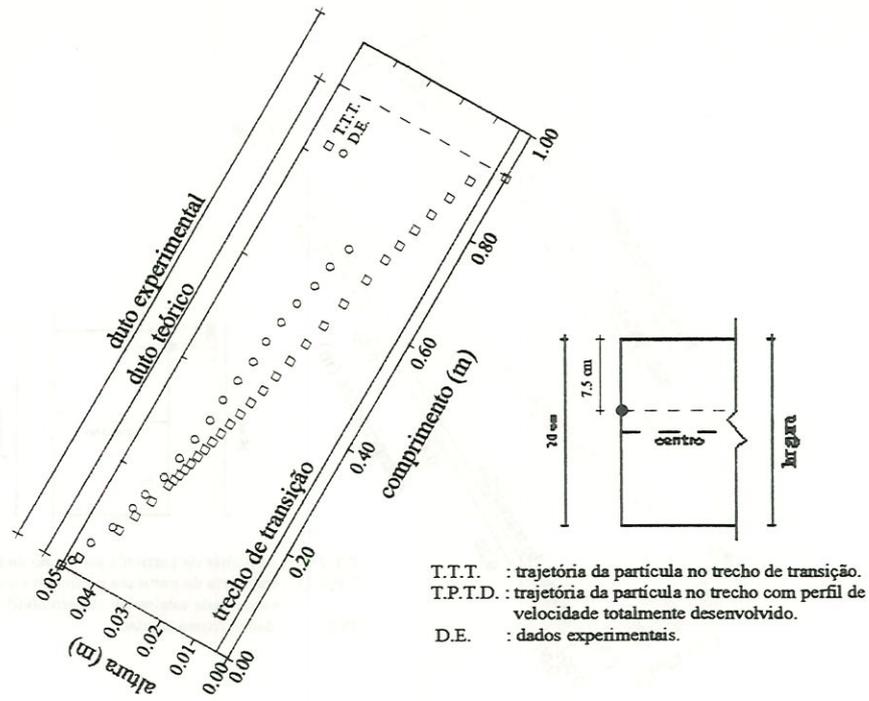


FIGURA D.47 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

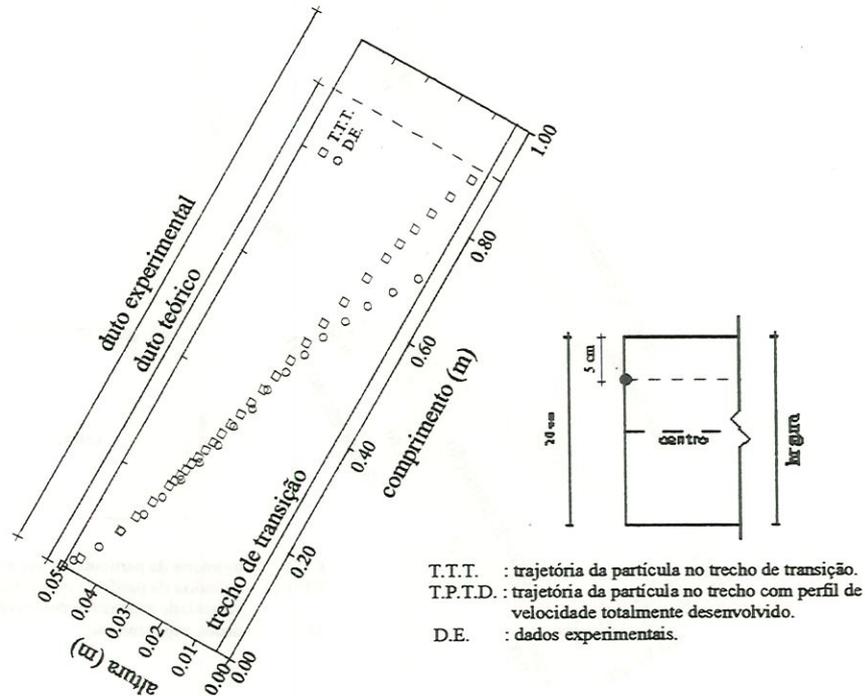


FIGURA D.48 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

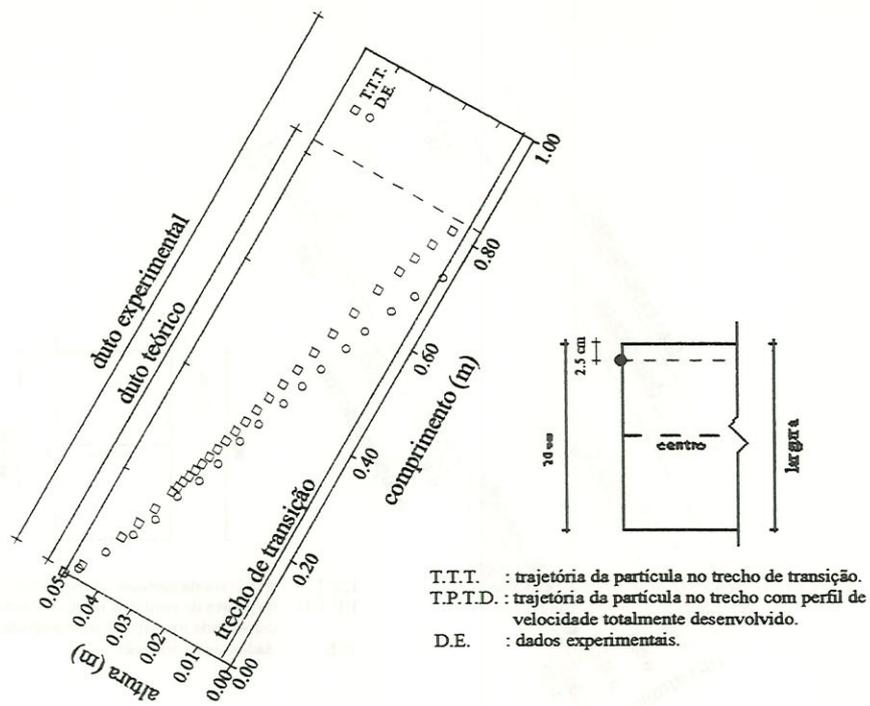


FIGURA D.49 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

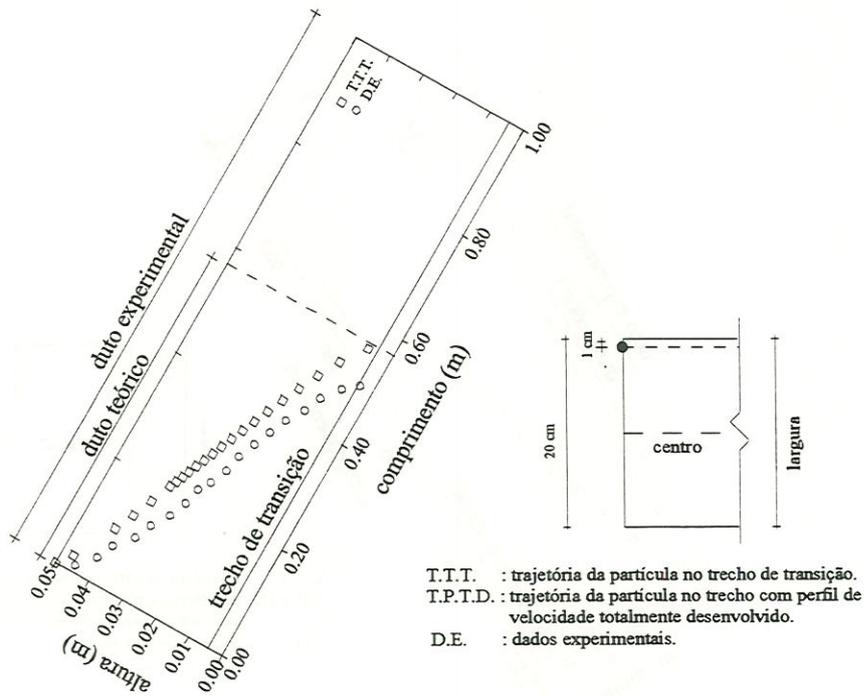


FIGURA D.50 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

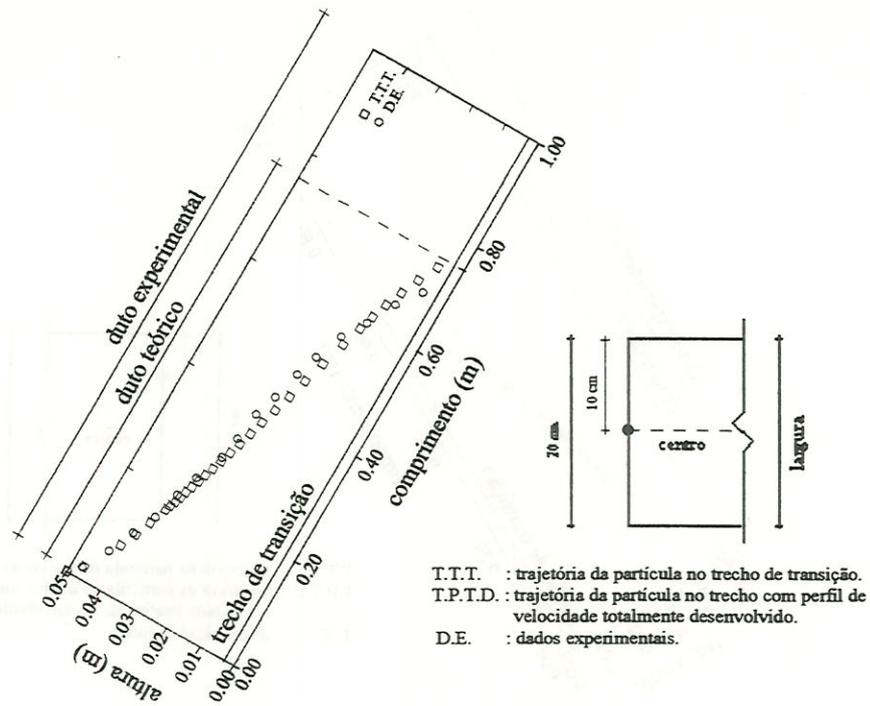


FIGURA D.51 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 3,50$ cm/min $Re = 331,28$

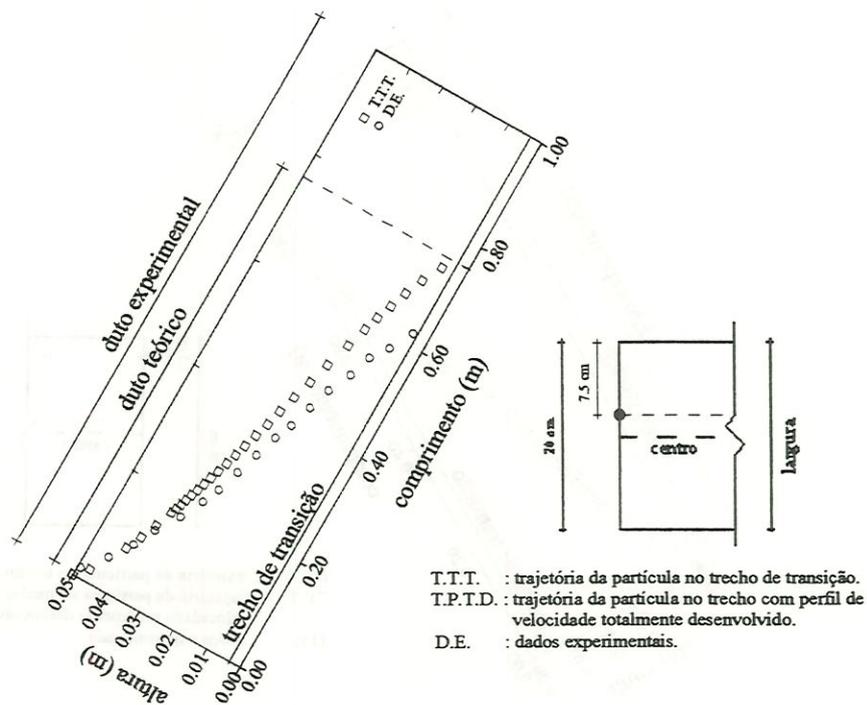


FIGURA D.52 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 3,50$ cm/min $Re = 331,28$

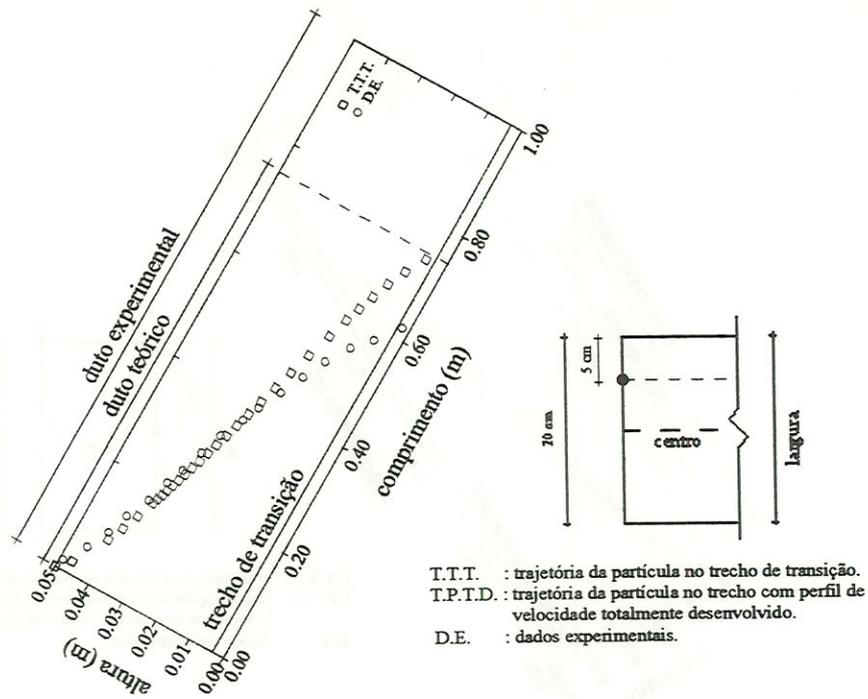


FIGURA D.53 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

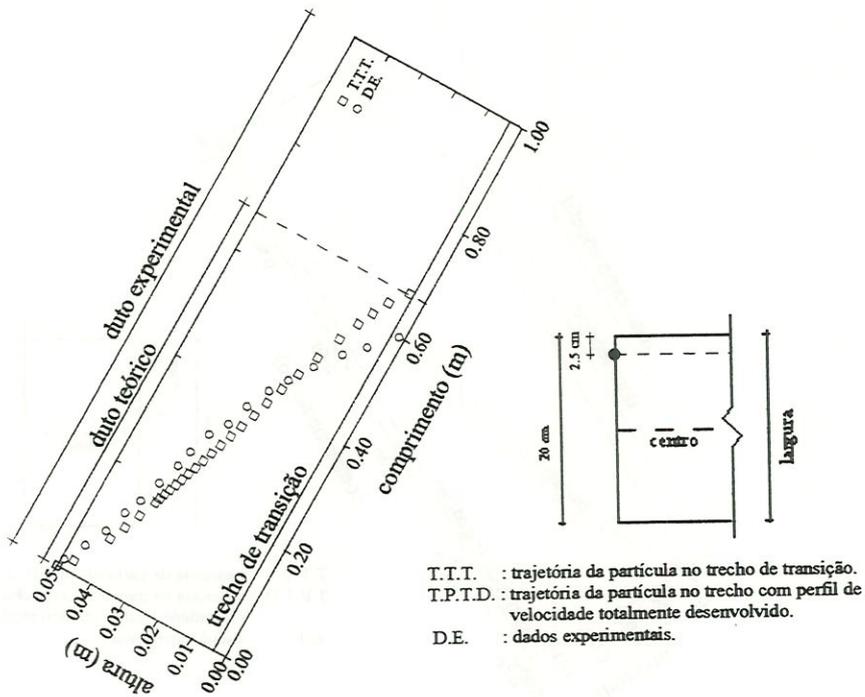


FIGURA D.54 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

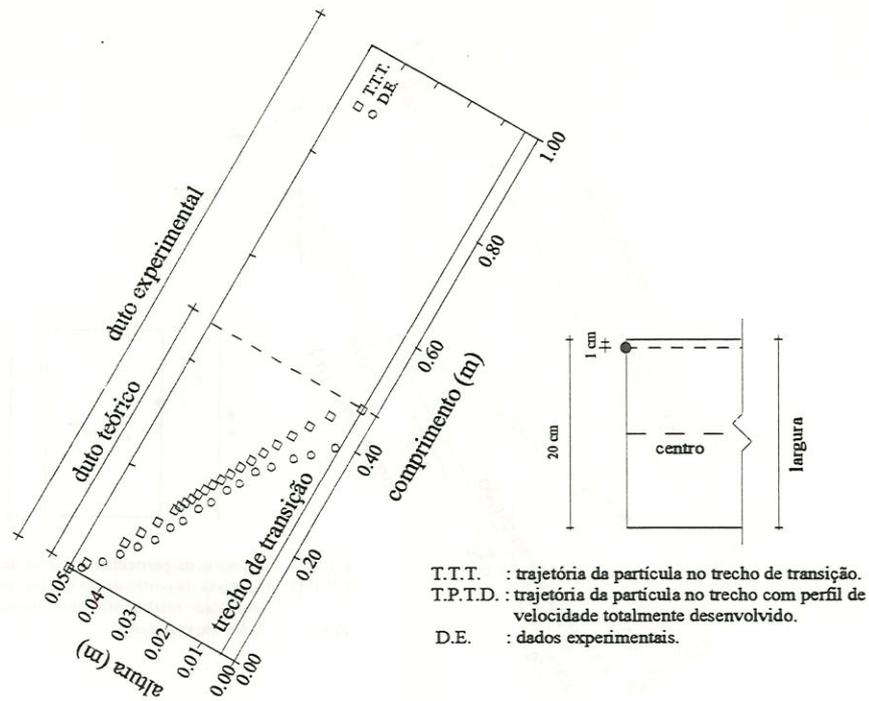


FIGURA D.55 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 3,50$ cm/min $Re = 331,28$

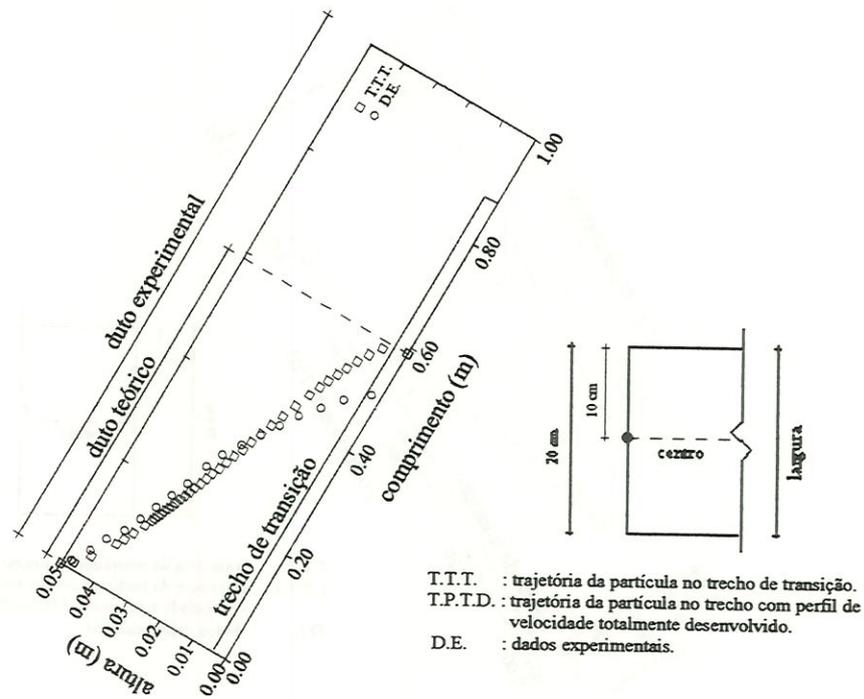


FIGURA D.56 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 0,90$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 3,50$ cm/min $Re = 264,55$

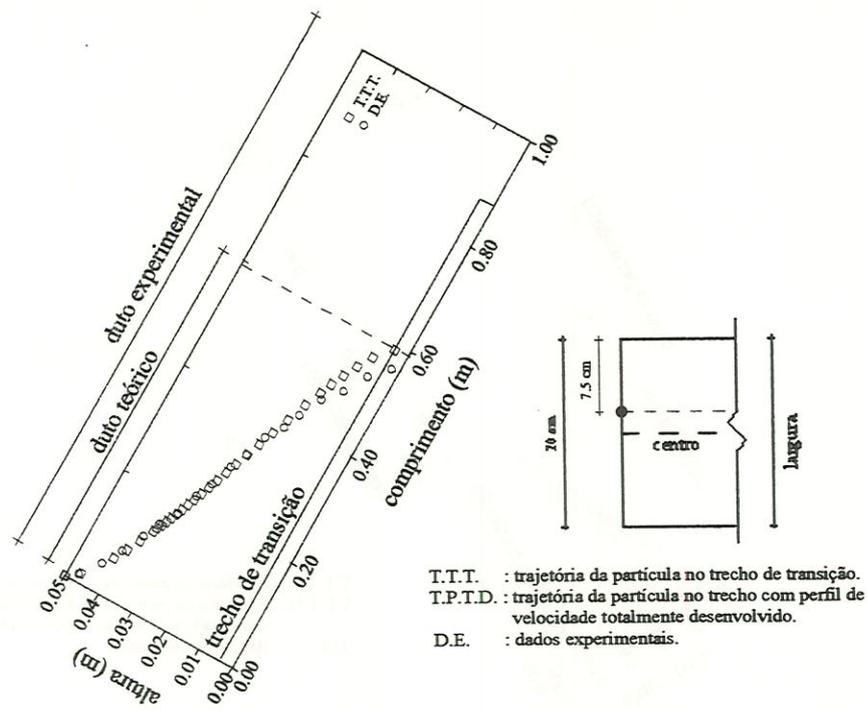


FIGURA D.57 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

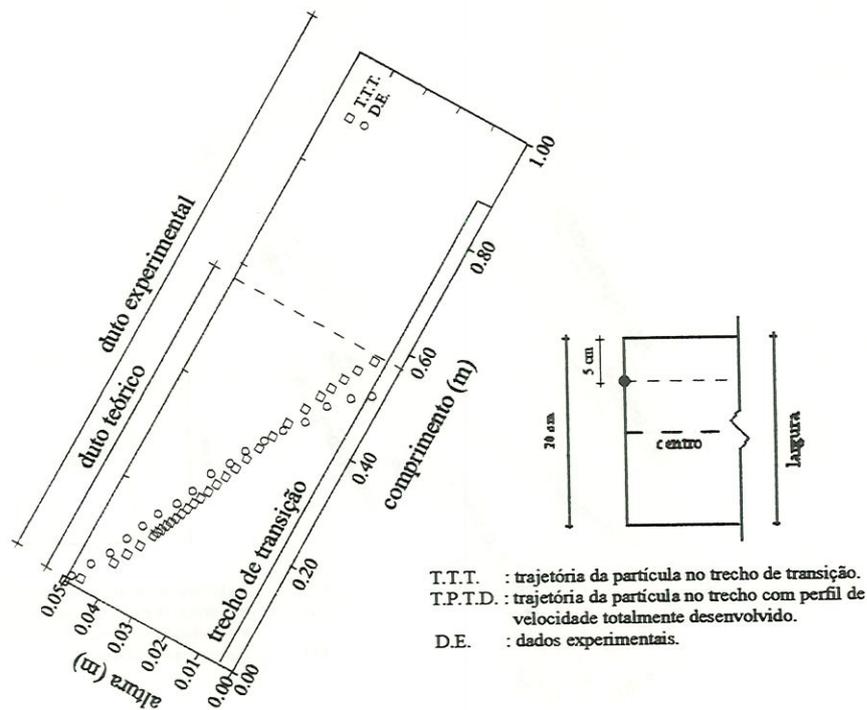


FIGURA D.58 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

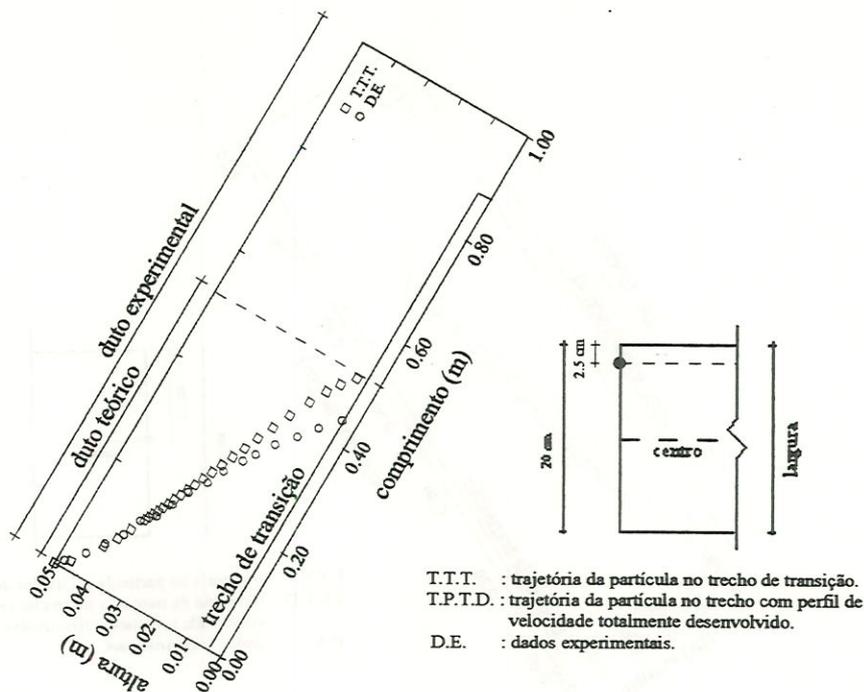


FIGURA D.59 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

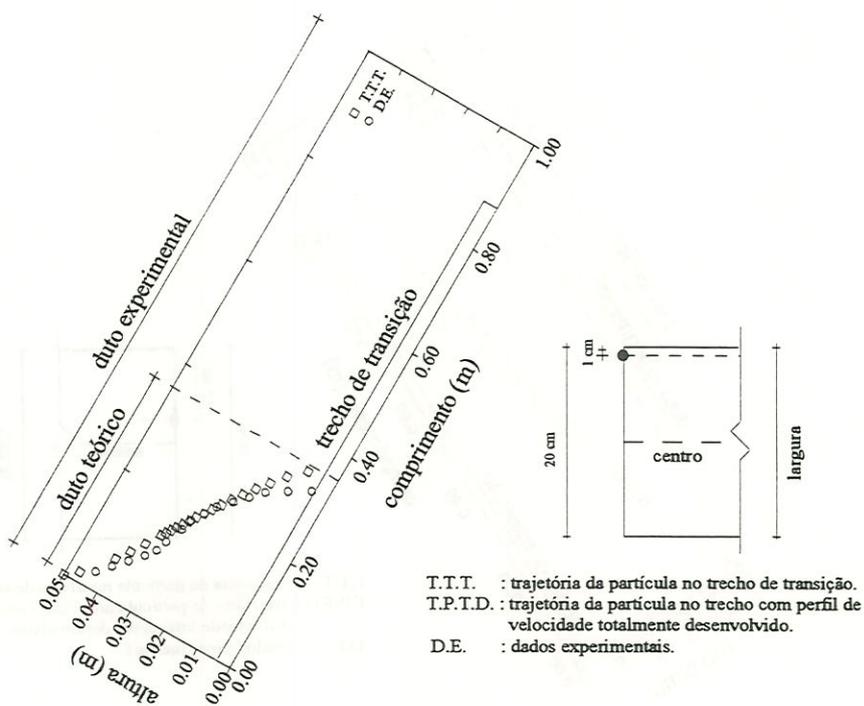


FIGURA D.60 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

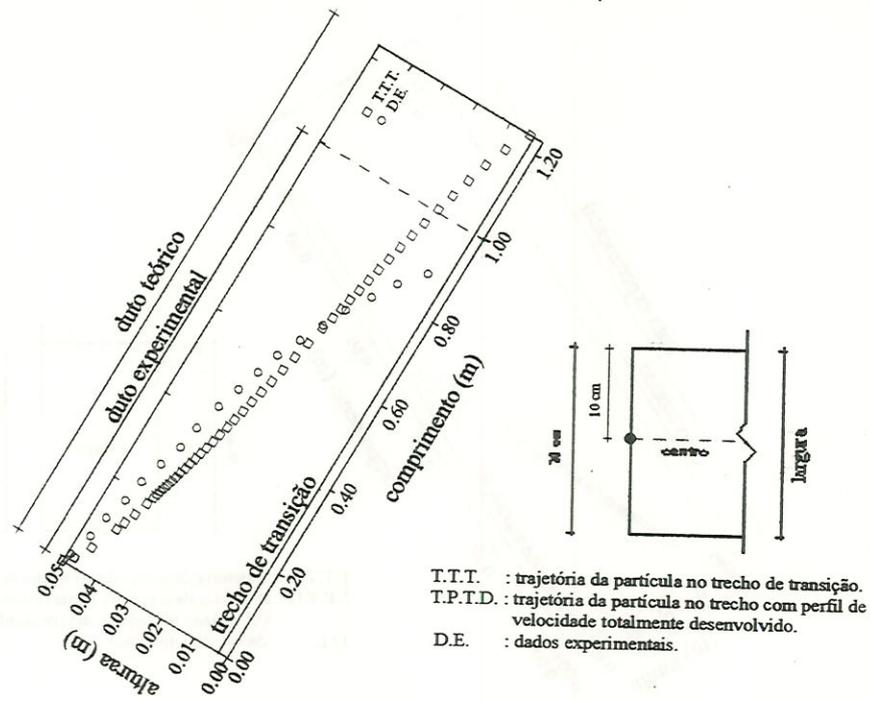


FIGURA D.61 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

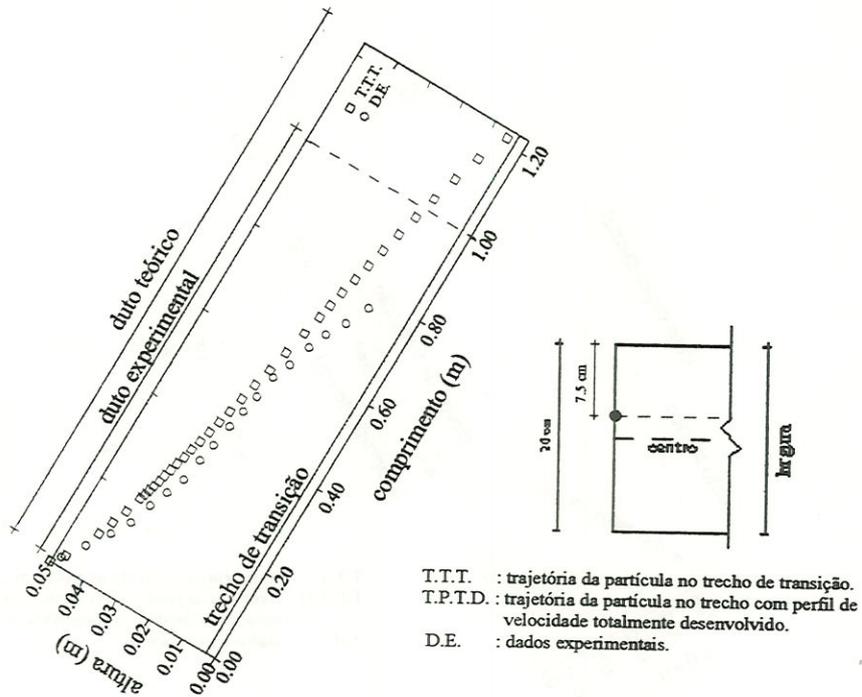


FIGURA D.62 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

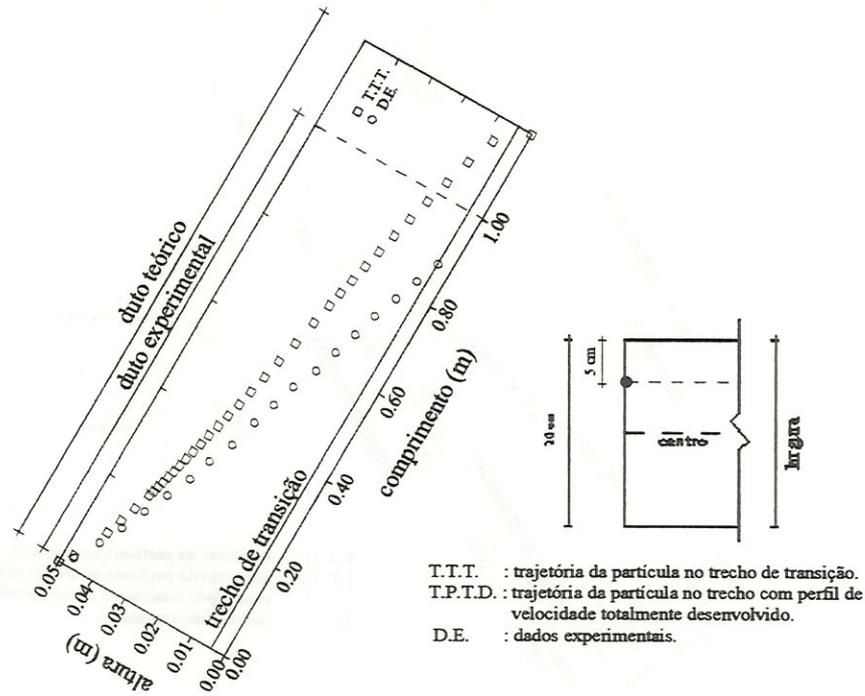


FIGURA D.63 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

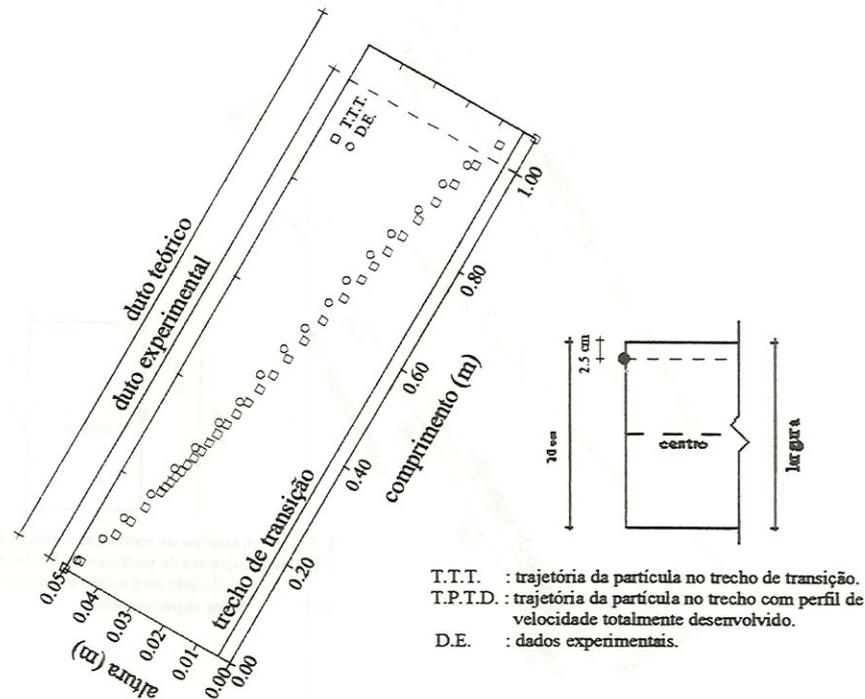


FIGURA D.64 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

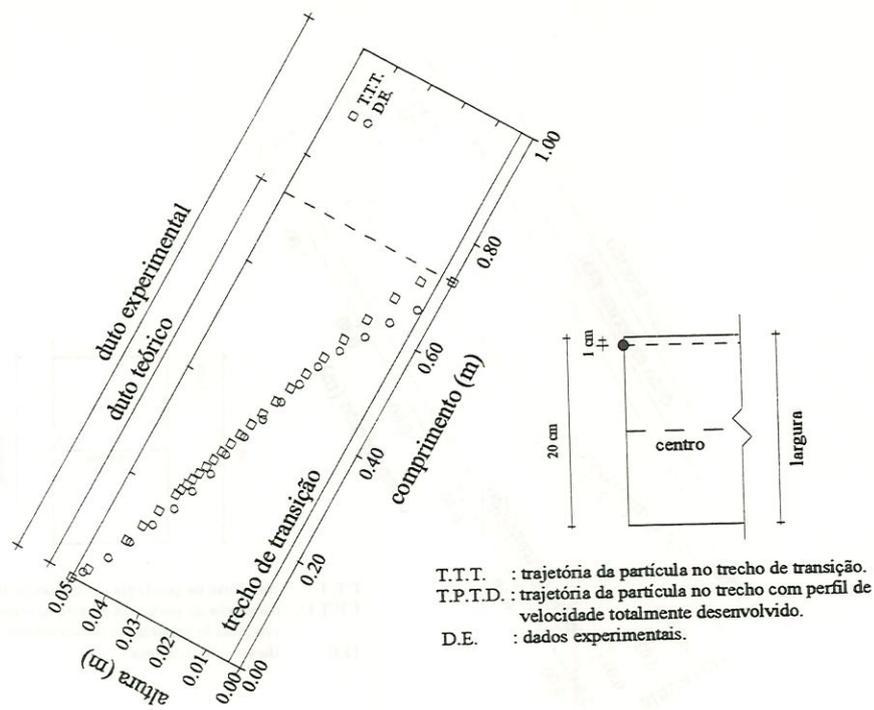


FIGURA D.65 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,36$ m
 $V_{em} = 30$ cm/min $V_s = 2,72$ cm/min $Re = 397,22$

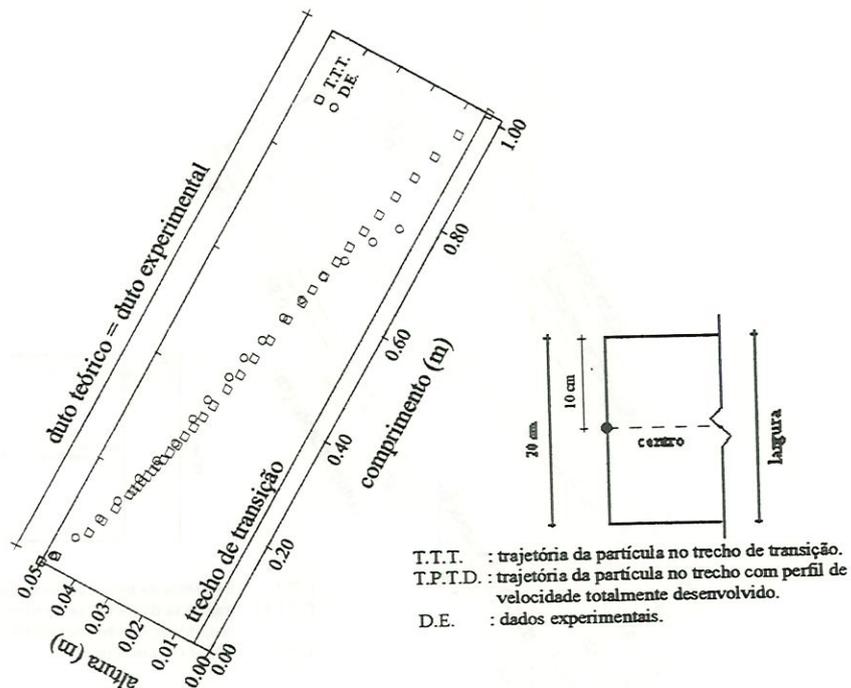


FIGURA D.66 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 2,72$ cm/min $Re = 331,28$

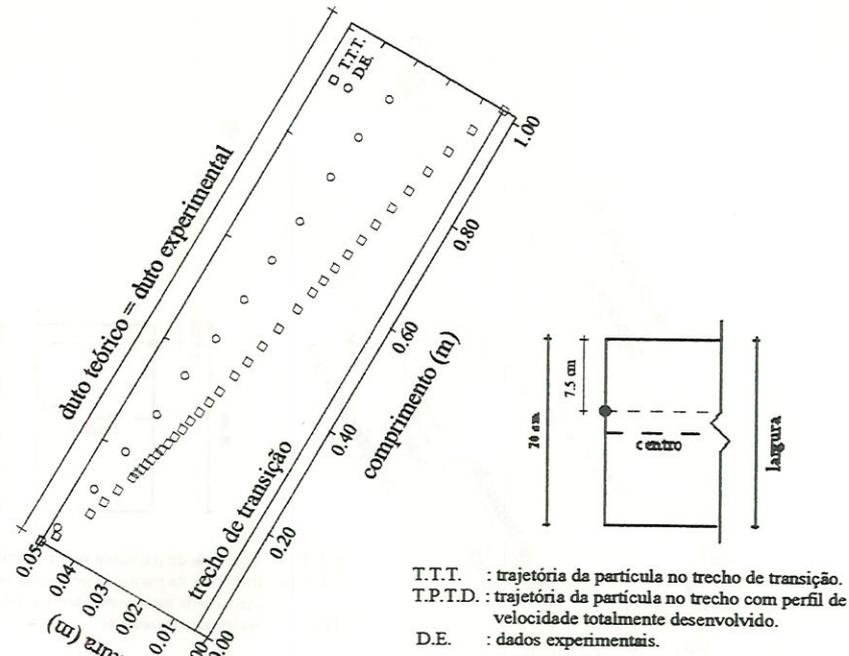


FIGURA D.67 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

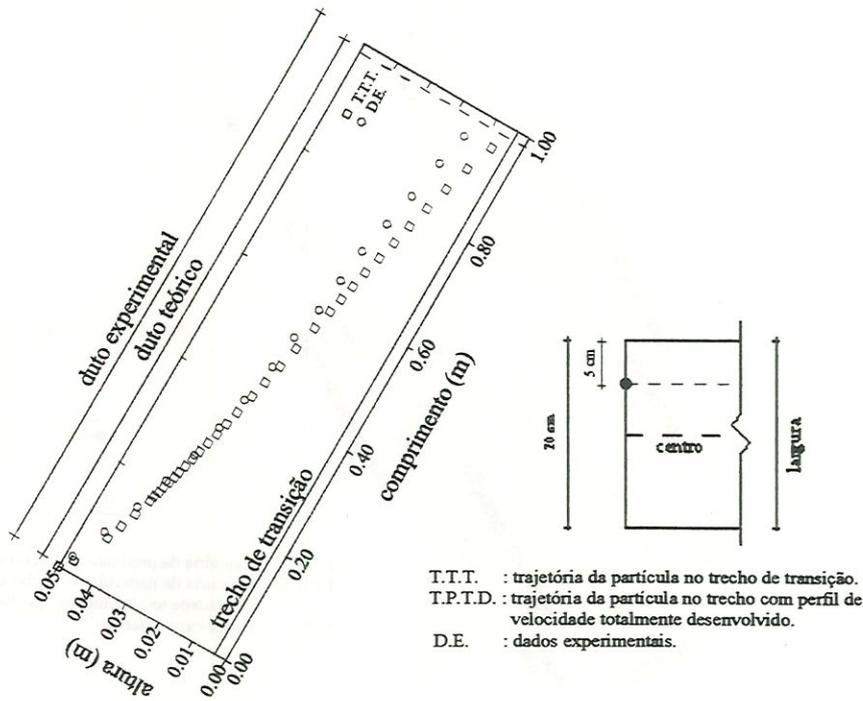


FIGURA D.68 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

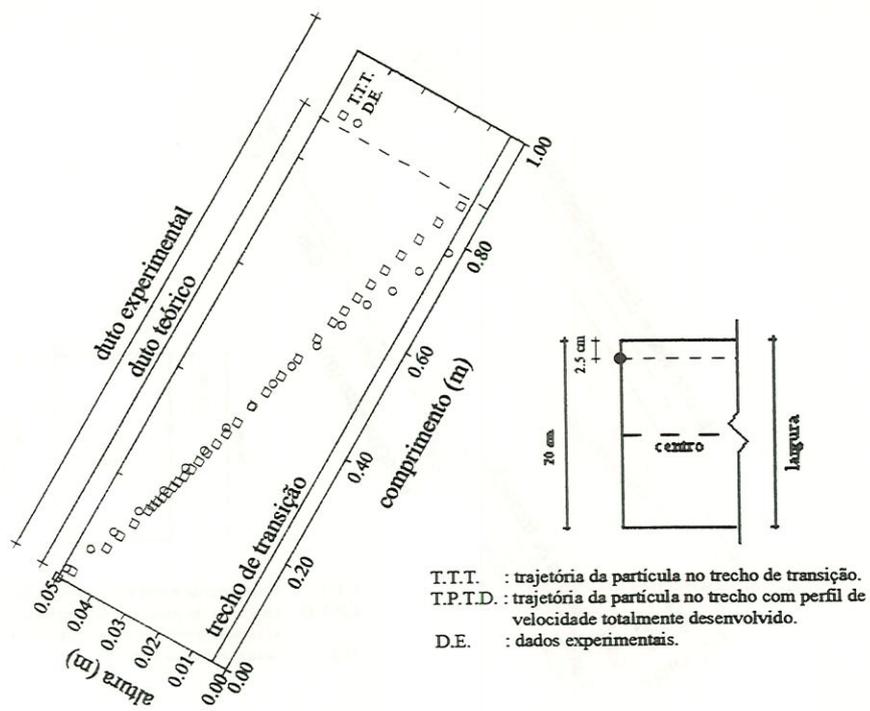


FIGURA D.69 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 2,72$ cm/min $Re = 331,28$

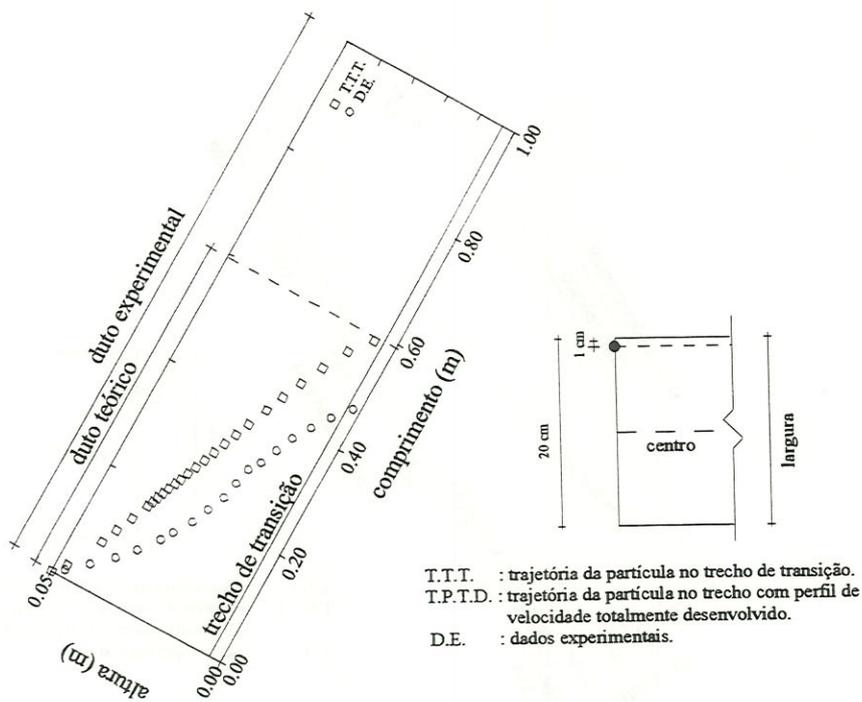


FIGURA D.70 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 1,13$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 2,72$ cm/min $Re = 331,28$

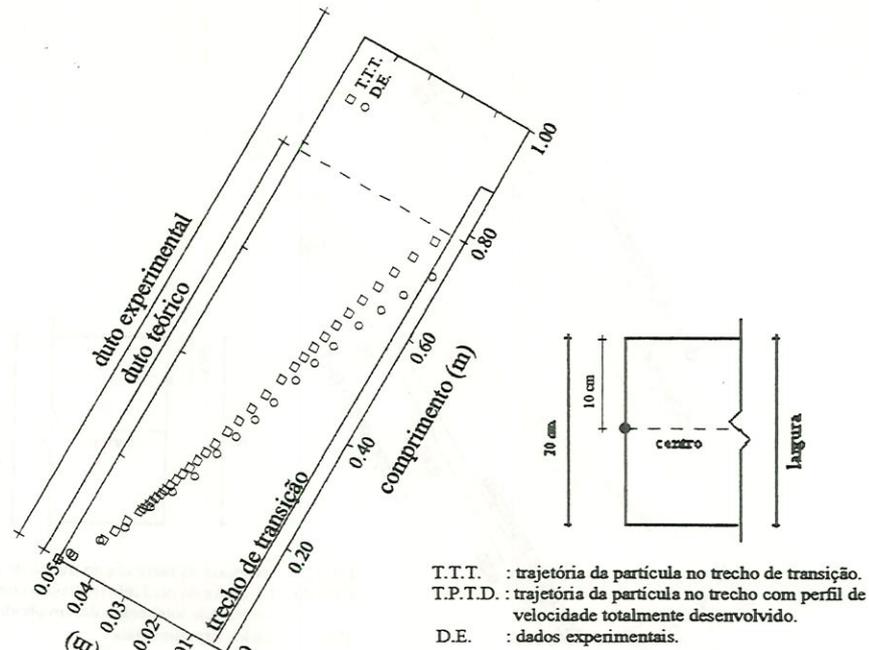


FIGURA D.71 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 0,90$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 2,72$ cm/min $Re = 264,55$

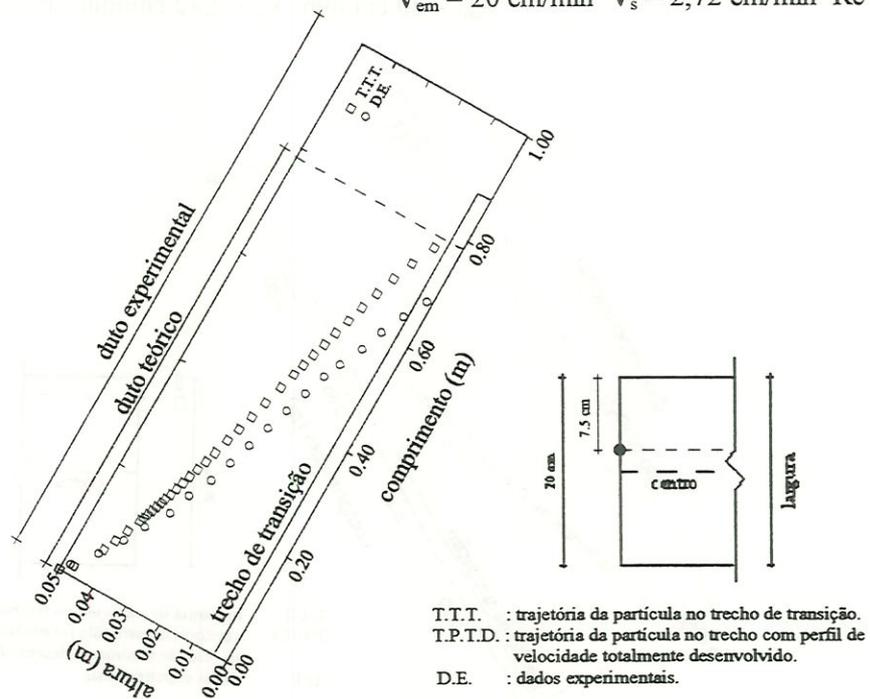


FIGURA D.72 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05$ m $b = 0,2$ m $D_c = 0,08$ m $l_r = 0,90$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 2,72$ cm/min $Re = 264,55$

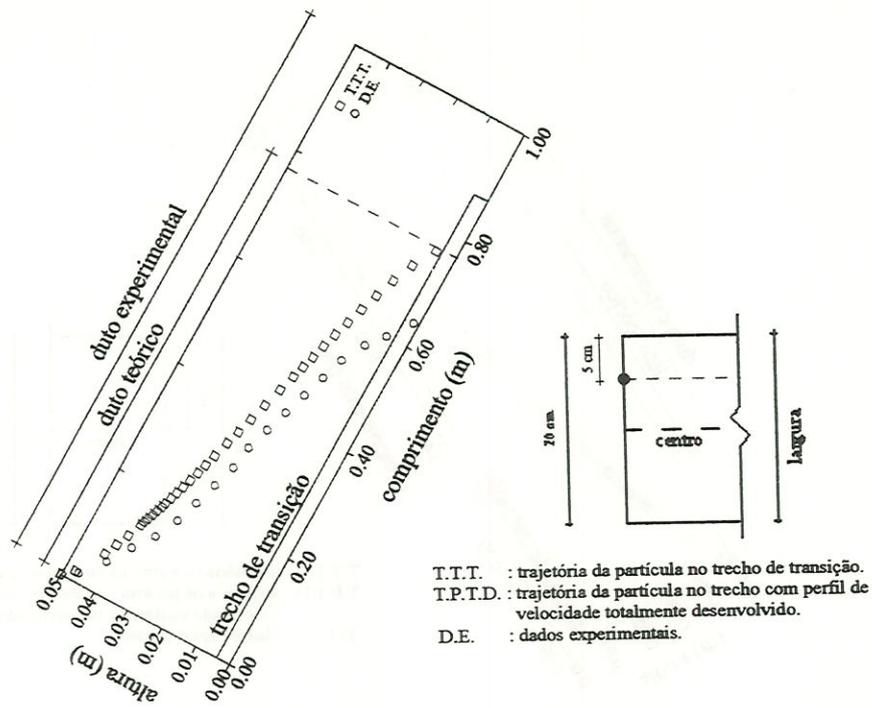


FIGURA D.73 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,2\text{ m}$ $D_c = 0,08\text{ m}$ $l_r = 0,90\text{ m}$
 $V_{cm} = 20\text{ cm/min}$ $V_s = 2,72\text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

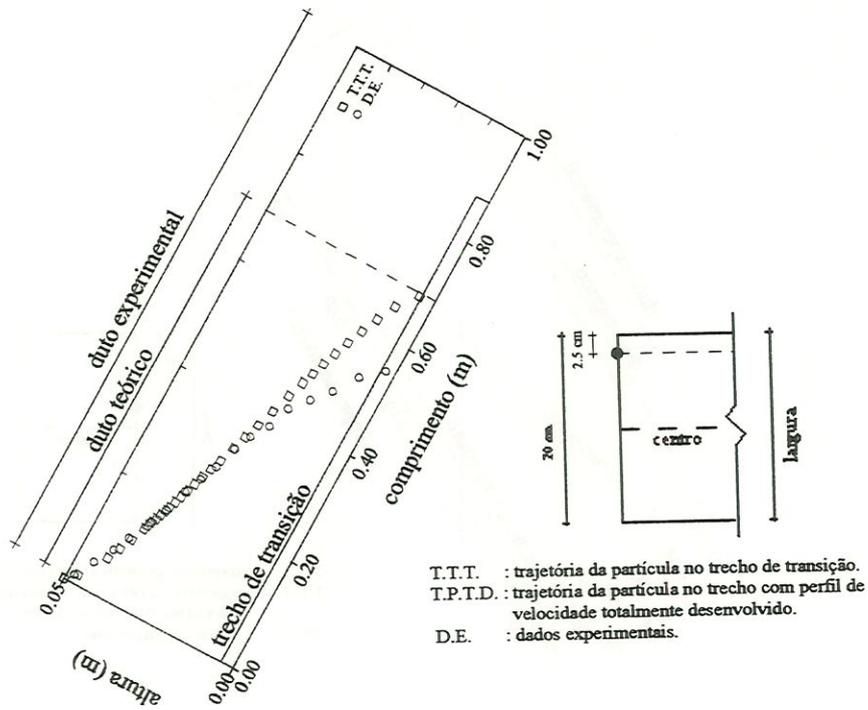


FIGURA D.74 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,2\text{ m}$ $D_c = 0,08\text{ m}$ $l_r = 0,90\text{ m}$
 $V_{cm} = 20\text{ cm/min}$ $V_s = 2,72\text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

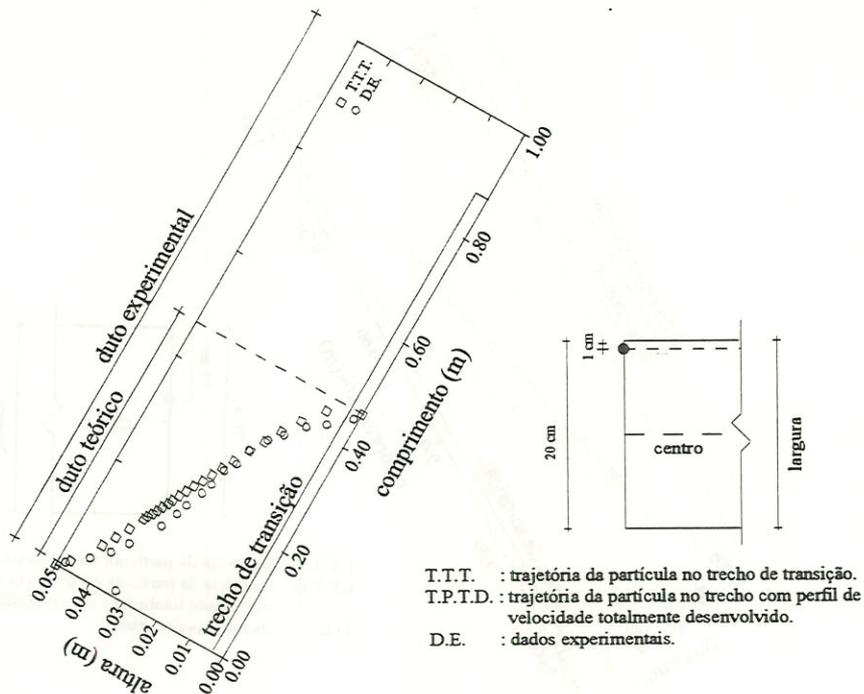


FIGURA D.75 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

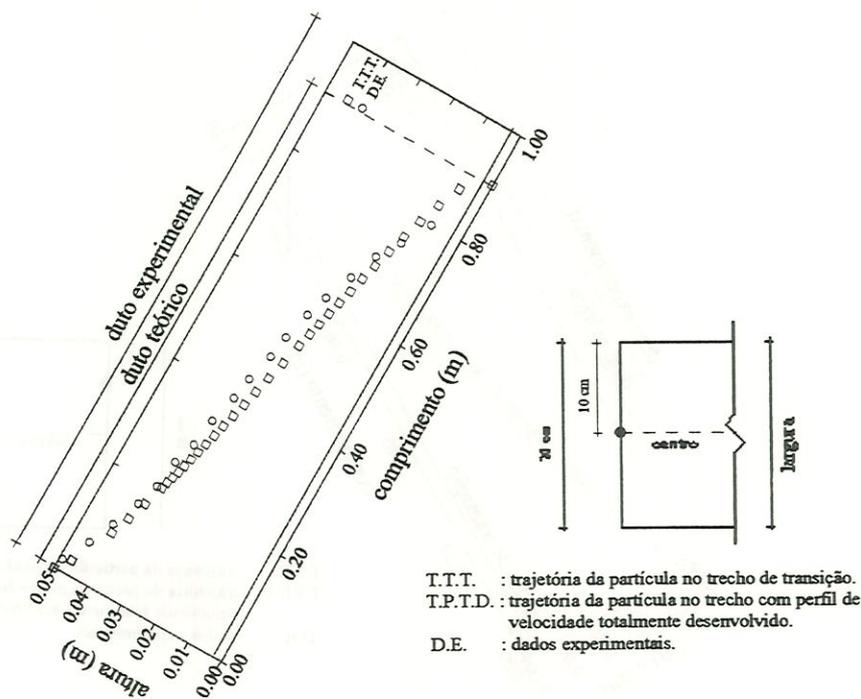


FIGURA D.76 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

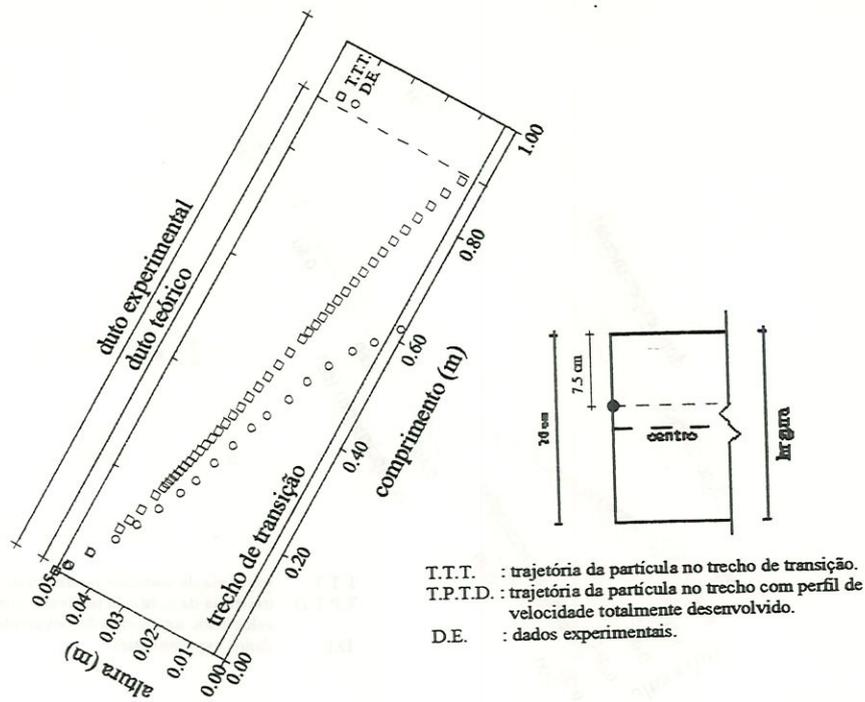


FIGURA D.77 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

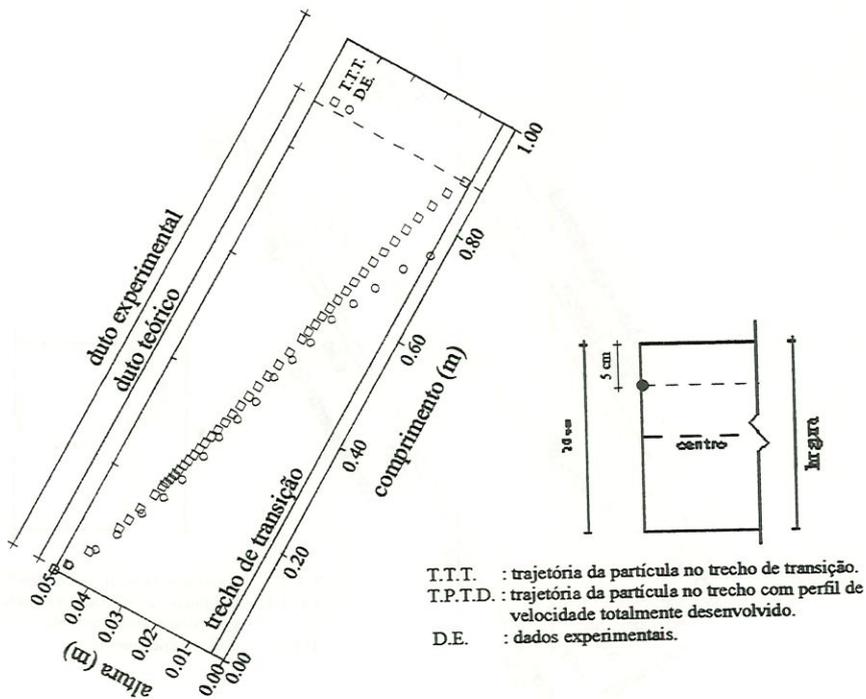


FIGURA D.78 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

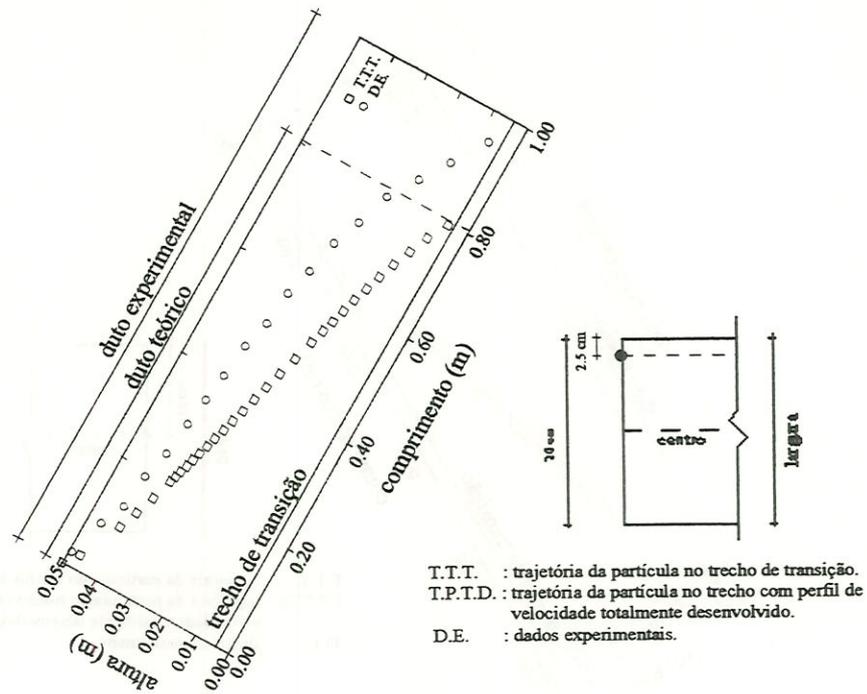


FIGURA D.79 - Trajetória da partícula 6

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

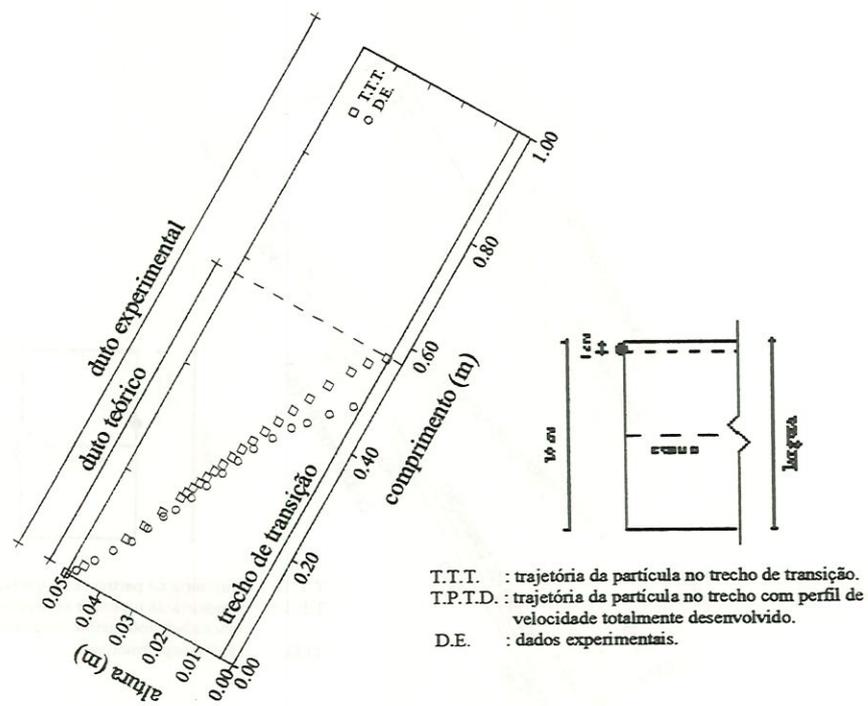


FIGURA D.80 - Trajetória da partícula 6

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

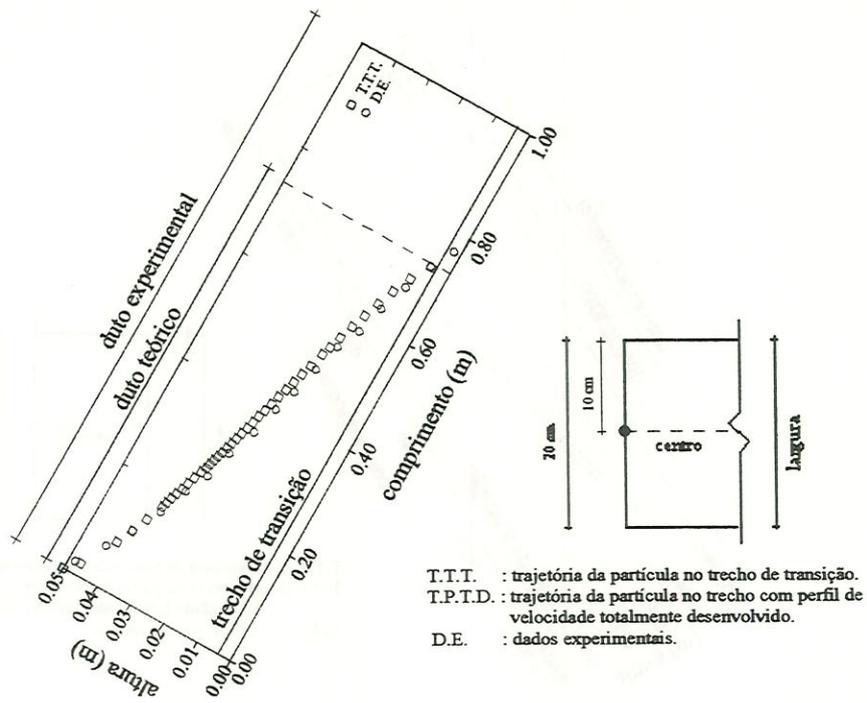


FIGURA D.81 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

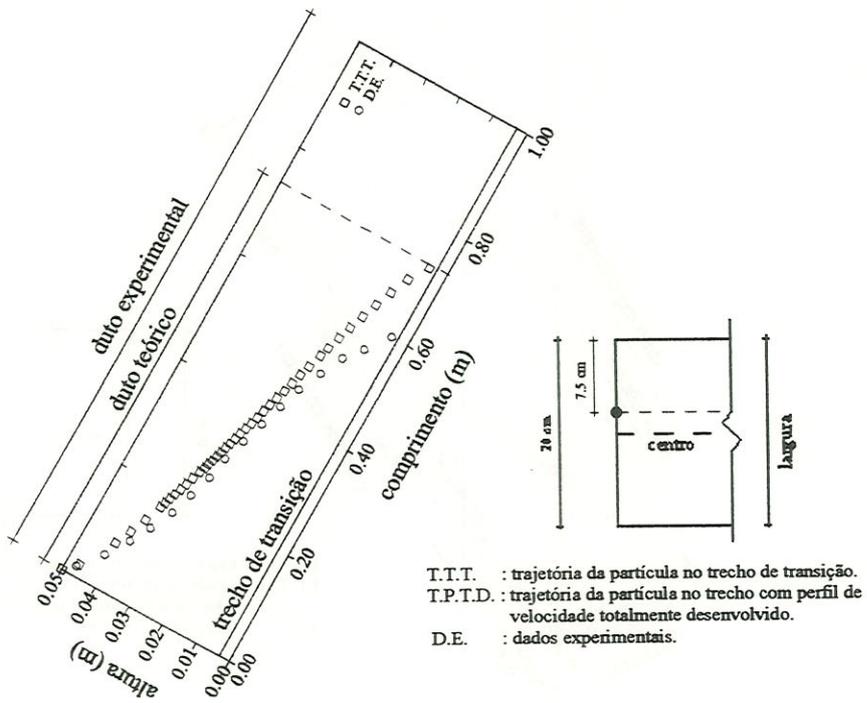


FIGURA D.82 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

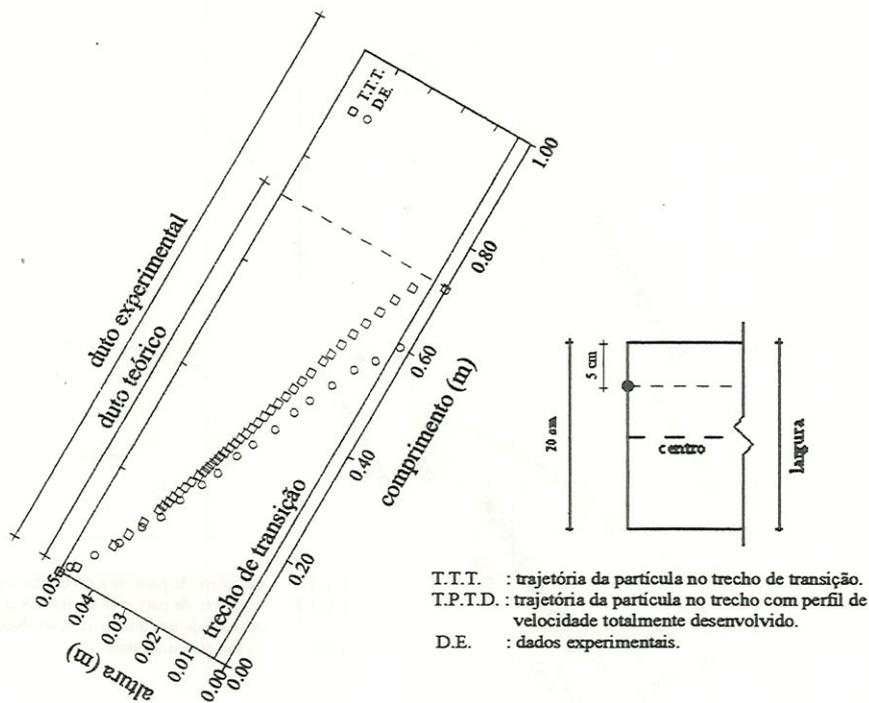


FIGURA D.83 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

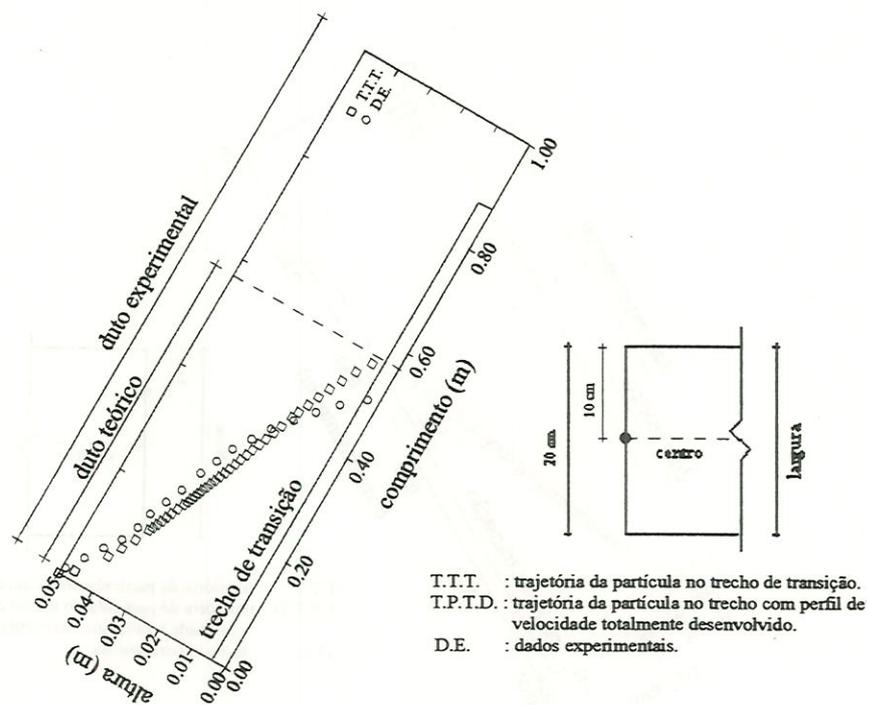


FIGURA D.84 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

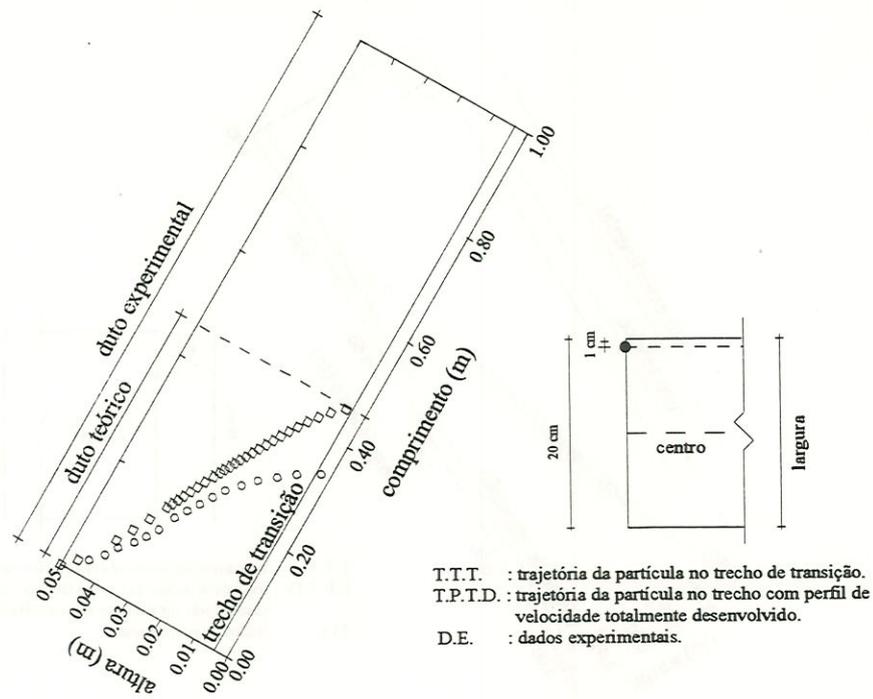


FIGURA D.85 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

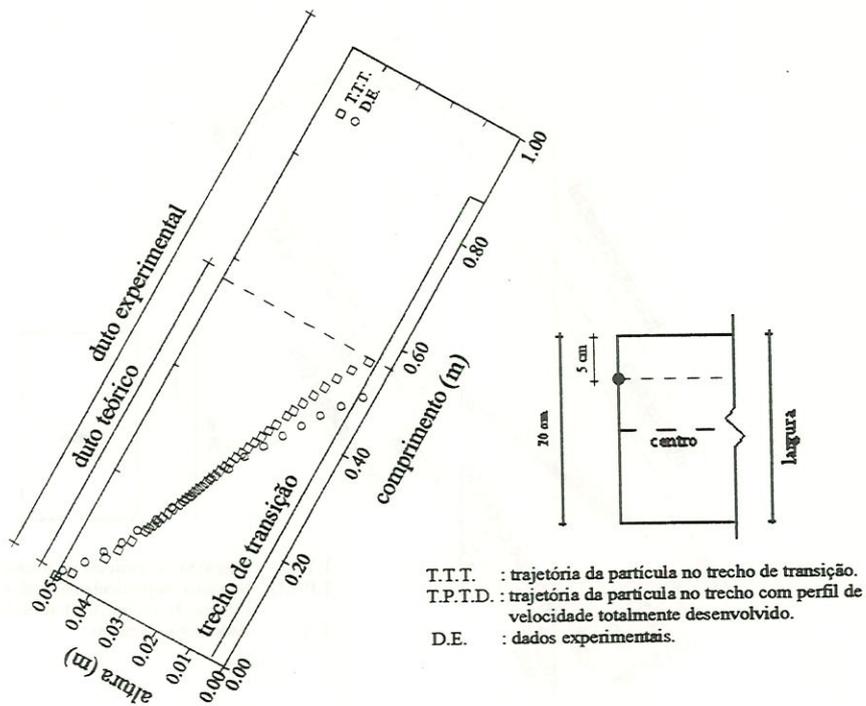


FIGURA D.86 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$



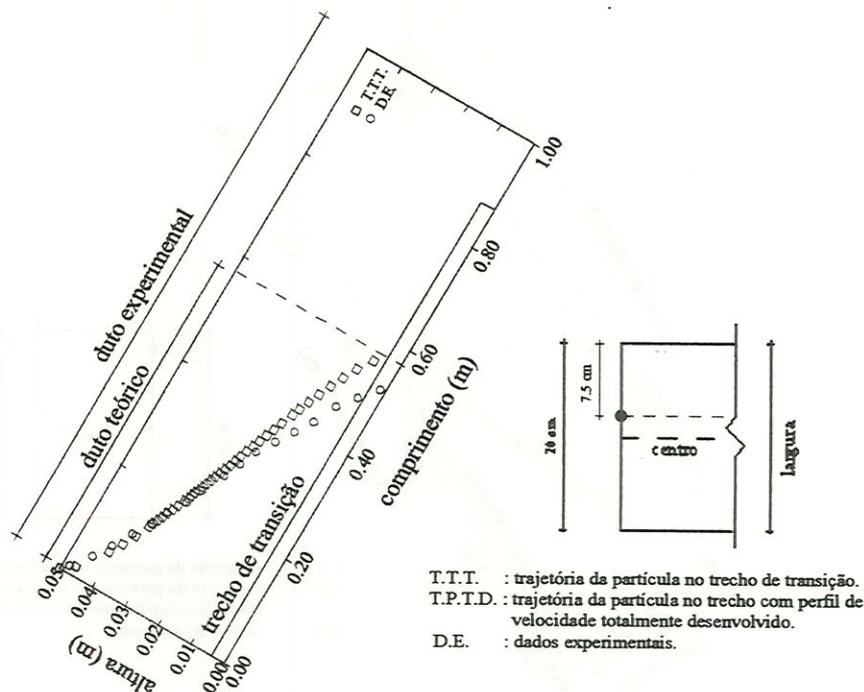


FIGURA D.87 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,2\text{ m}$ $D_c = 0,08\text{ m}$ $l_r = 0,90\text{ m}$
 $V_{em} = 20\text{ cm/min}$ $V_s = 3,56\text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

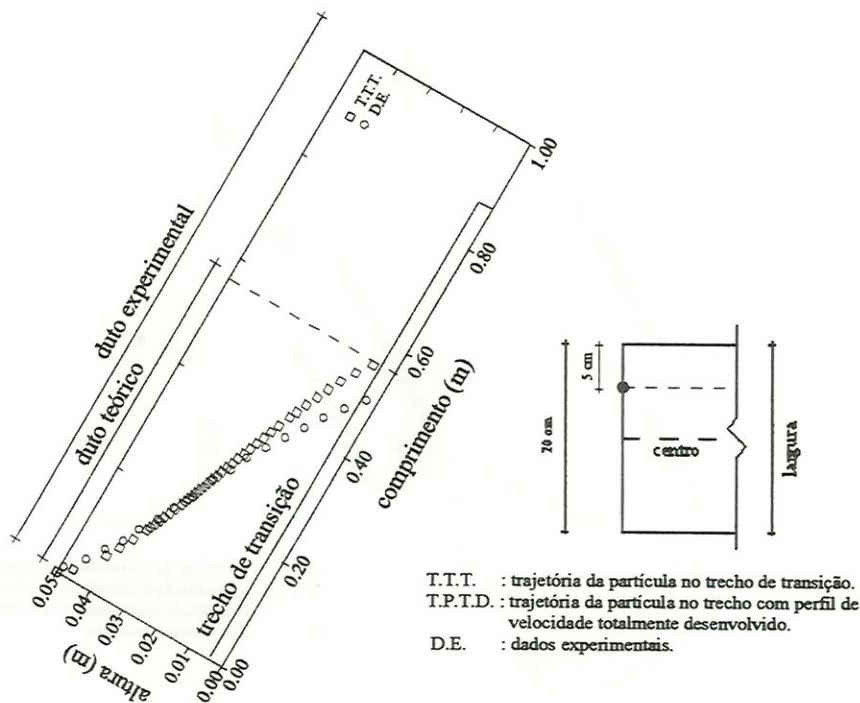


FIGURA D.88 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,2\text{ m}$ $D_c = 0,08\text{ m}$ $l_r = 0,90\text{ m}$
 $V_{em} = 20\text{ cm/min}$ $V_s = 3,56\text{ cm/min}$ $Re = 264,55$



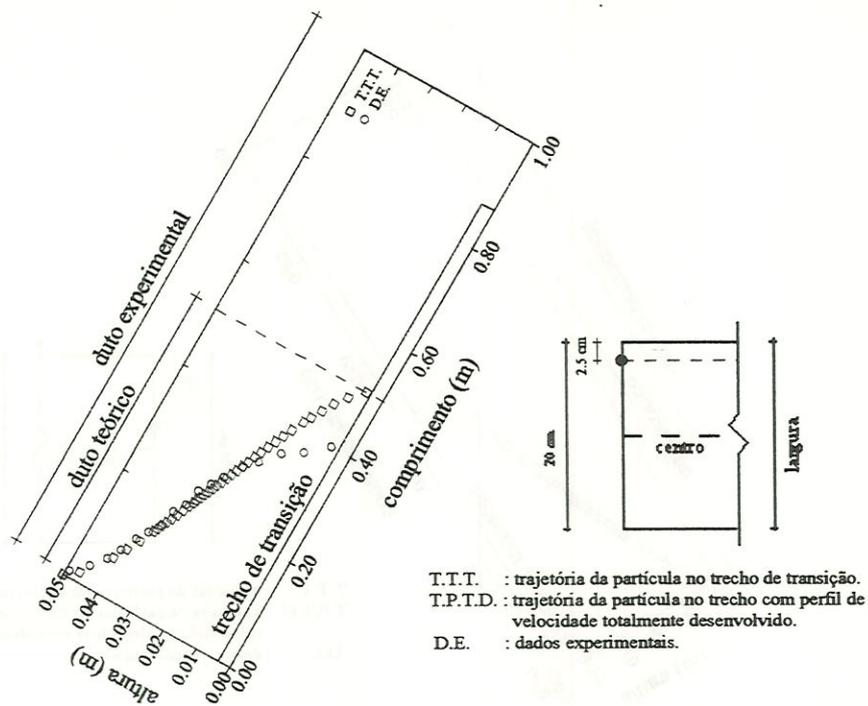


FIGURA D.89 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

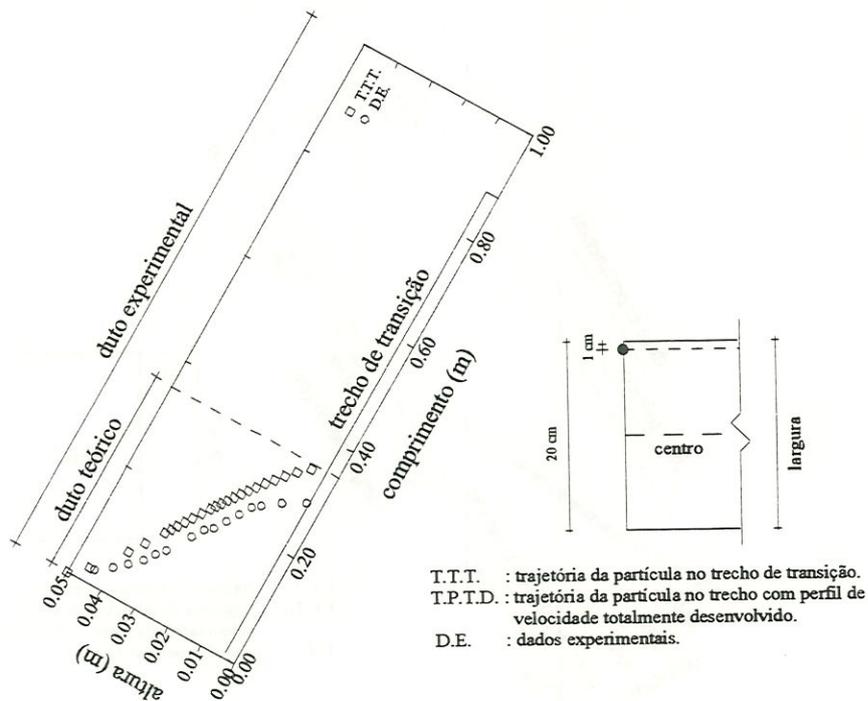


FIGURA D.90 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

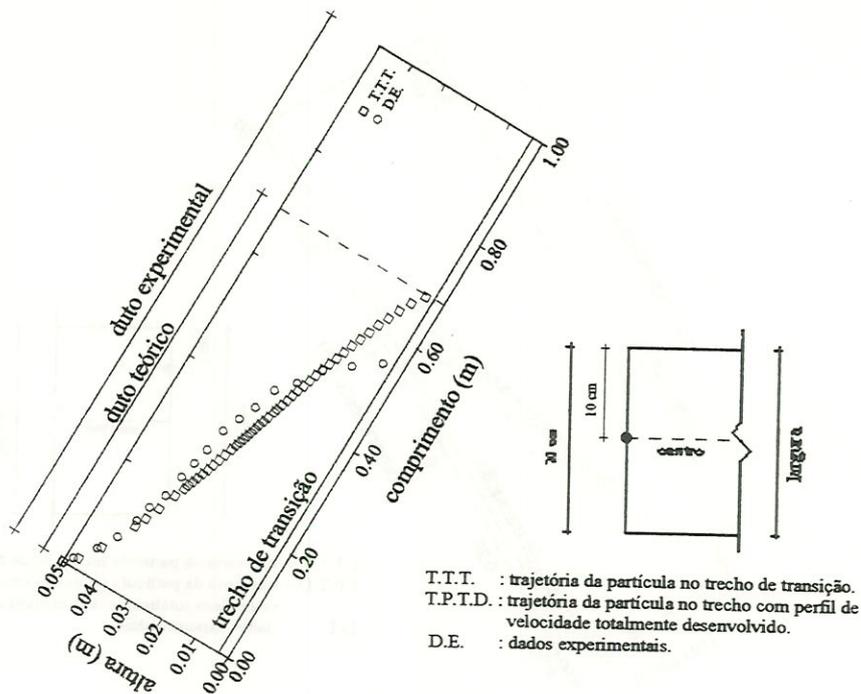


FIGURA D.91 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

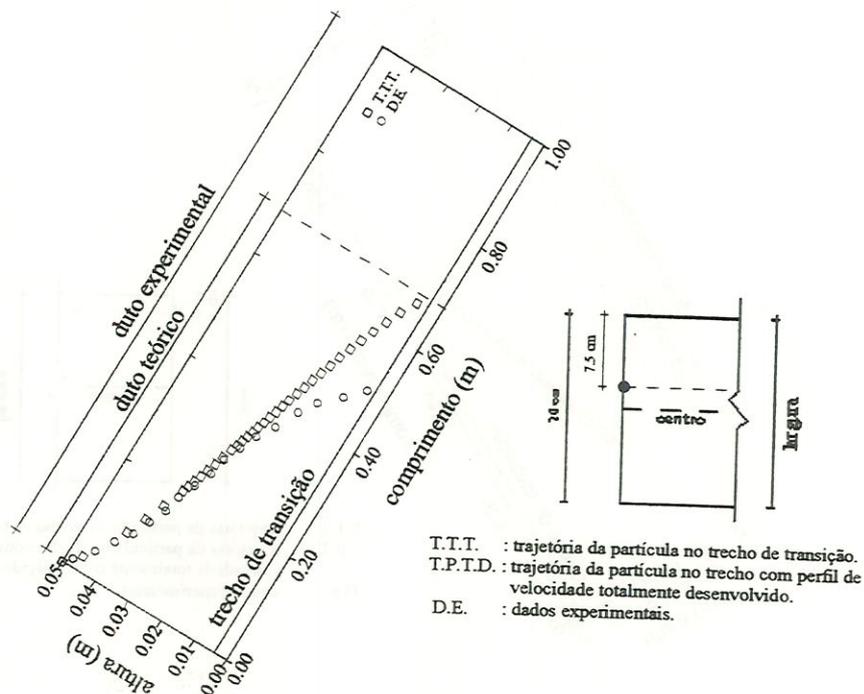


FIGURA D.92 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

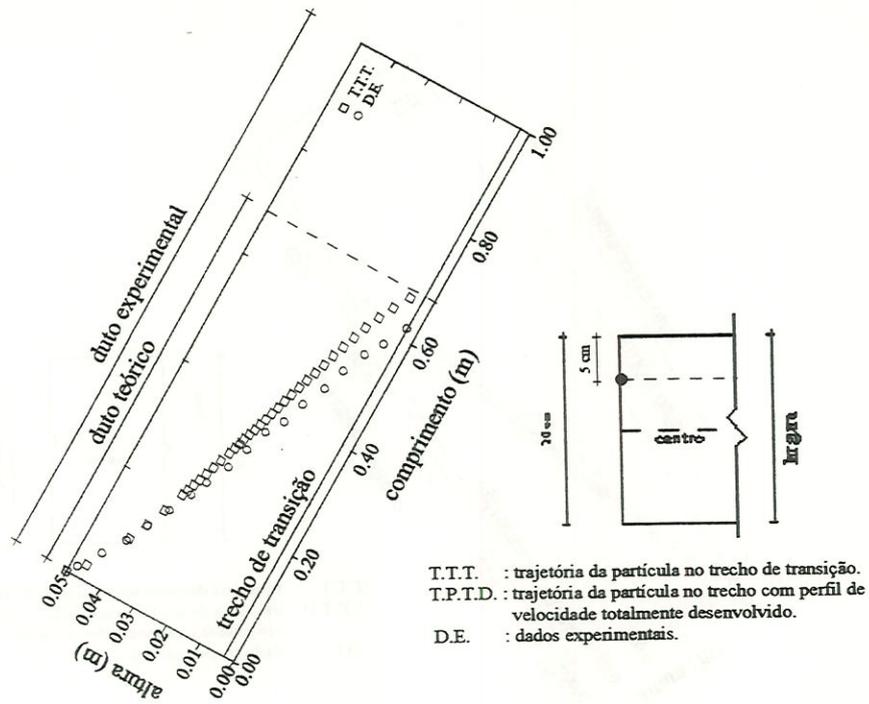


FIGURA D.93 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

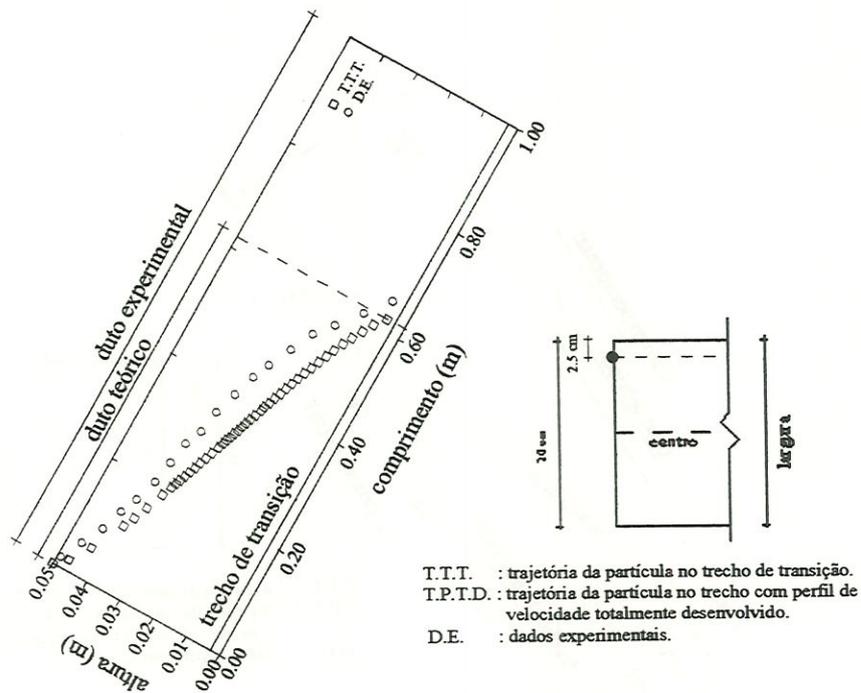


FIGURA D.94 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

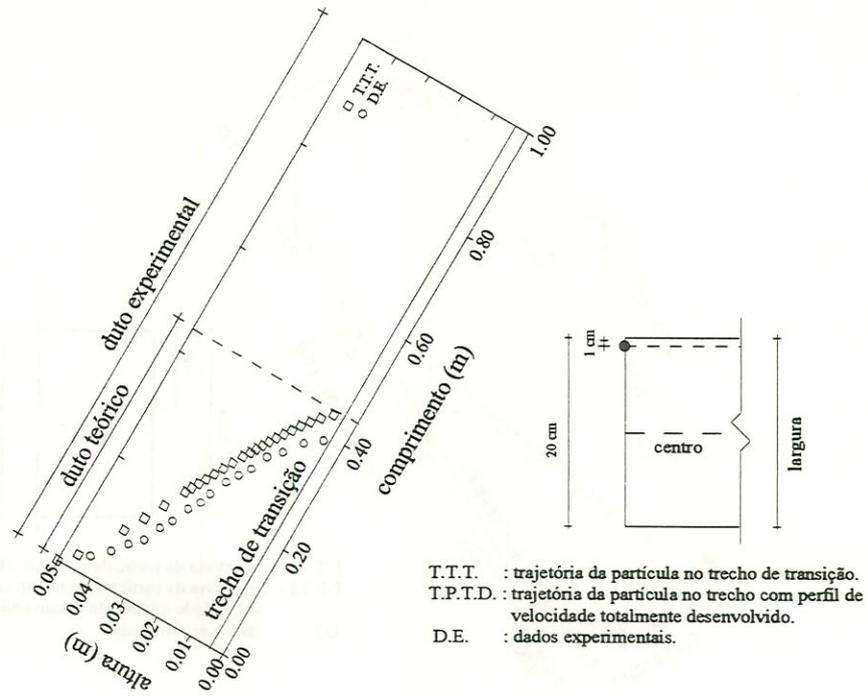


FIGURA D.95 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

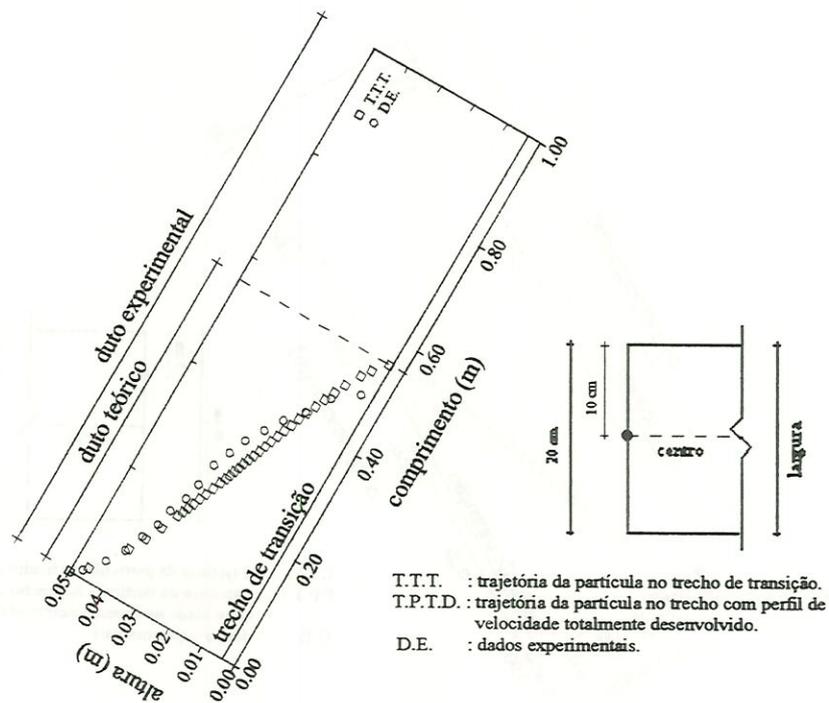


FIGURA D.96 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

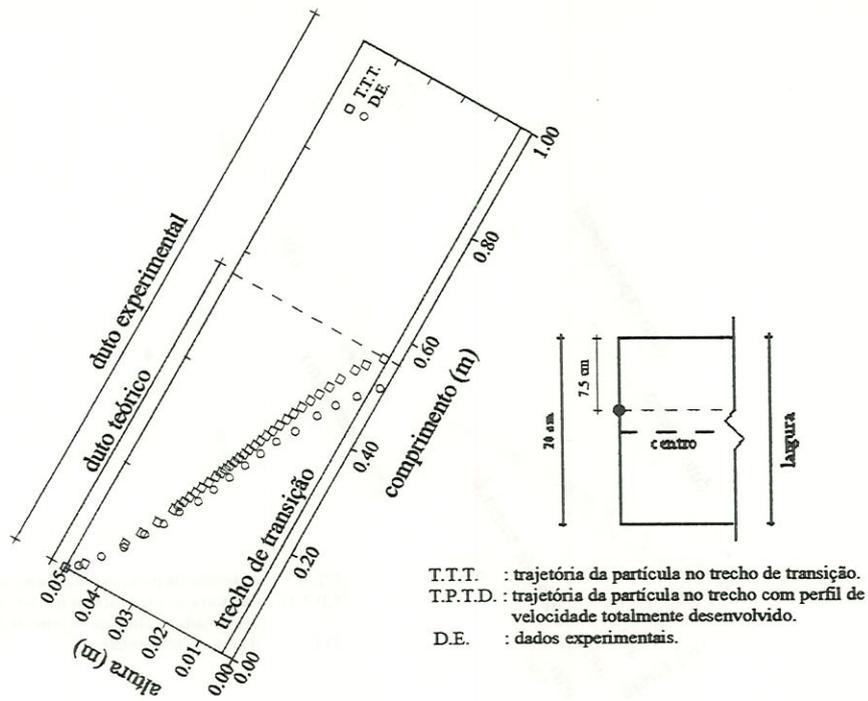


FIGURA D.97 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

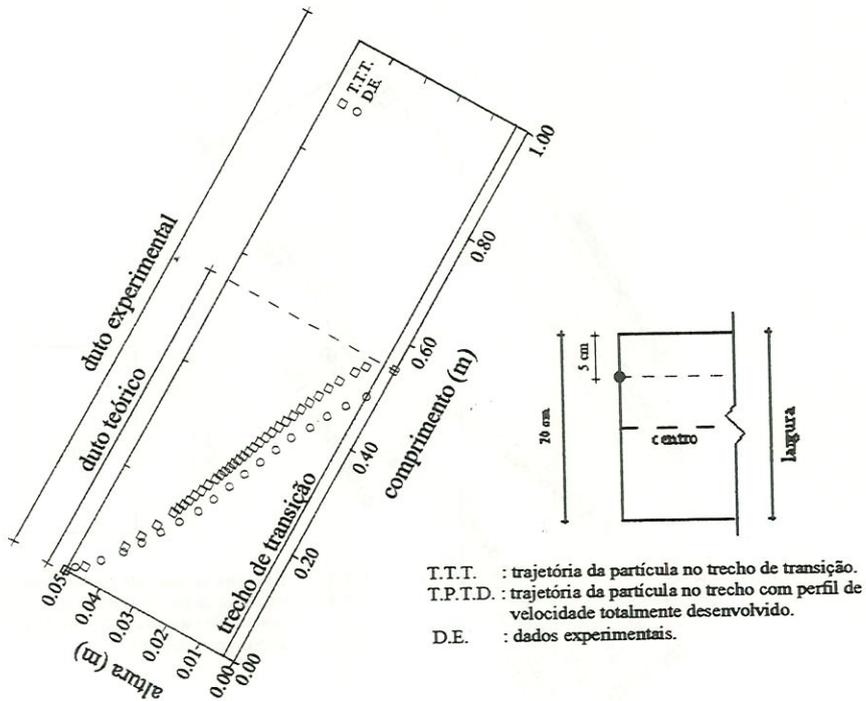


FIGURA D.98 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

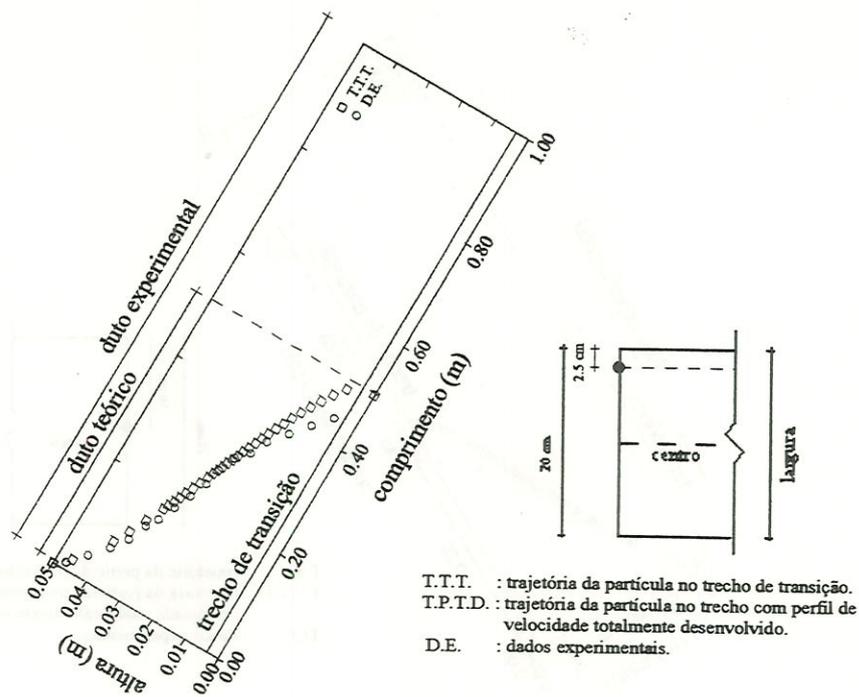


FIGURA D.99 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

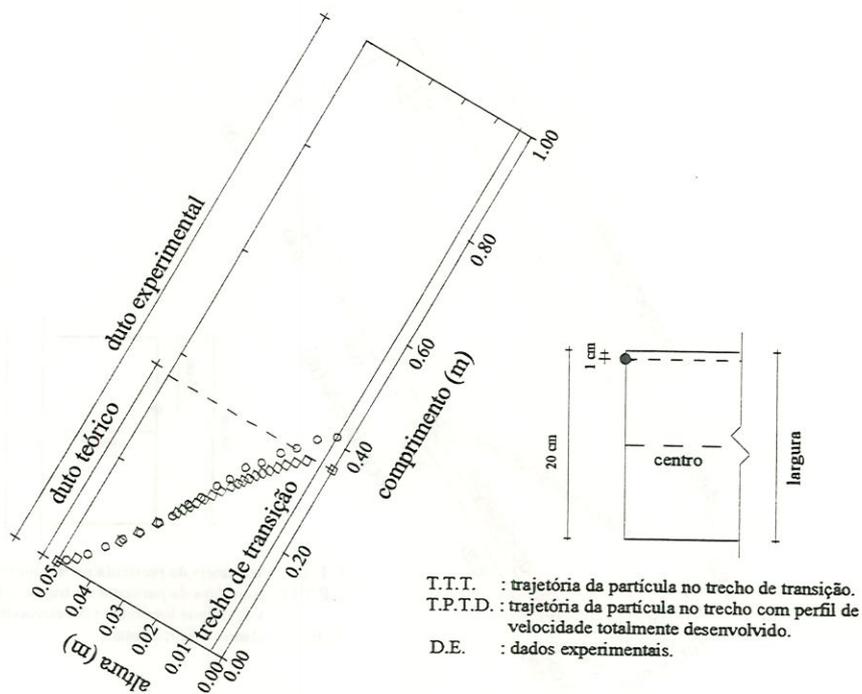


FIGURA D.100 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

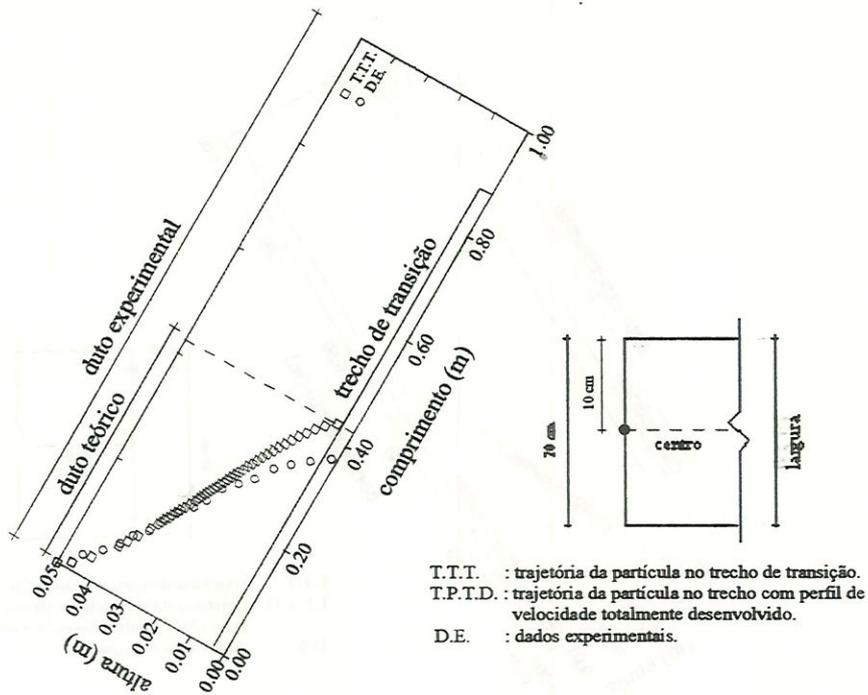


FIGURA D.101 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

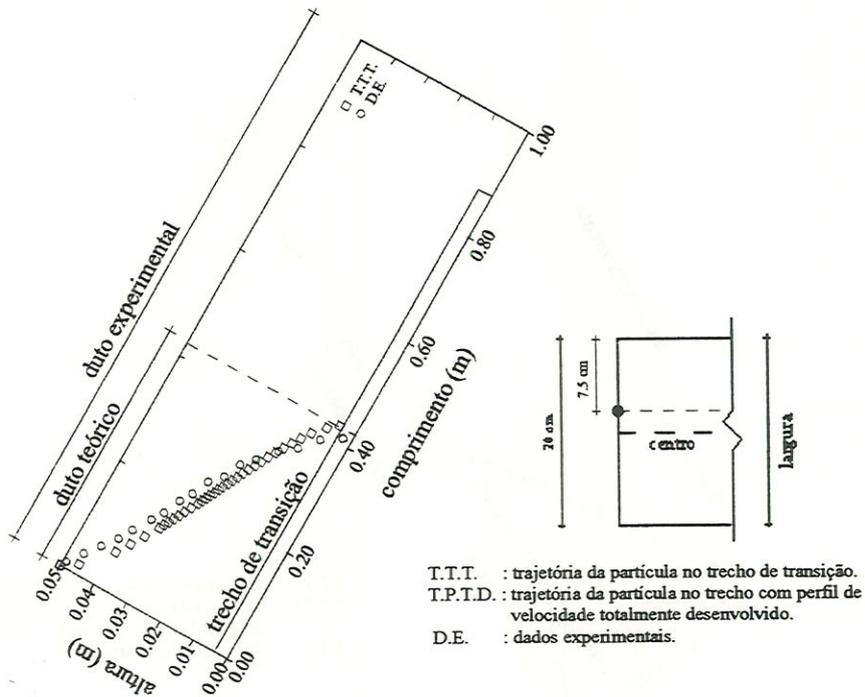


FIGURA D.102 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

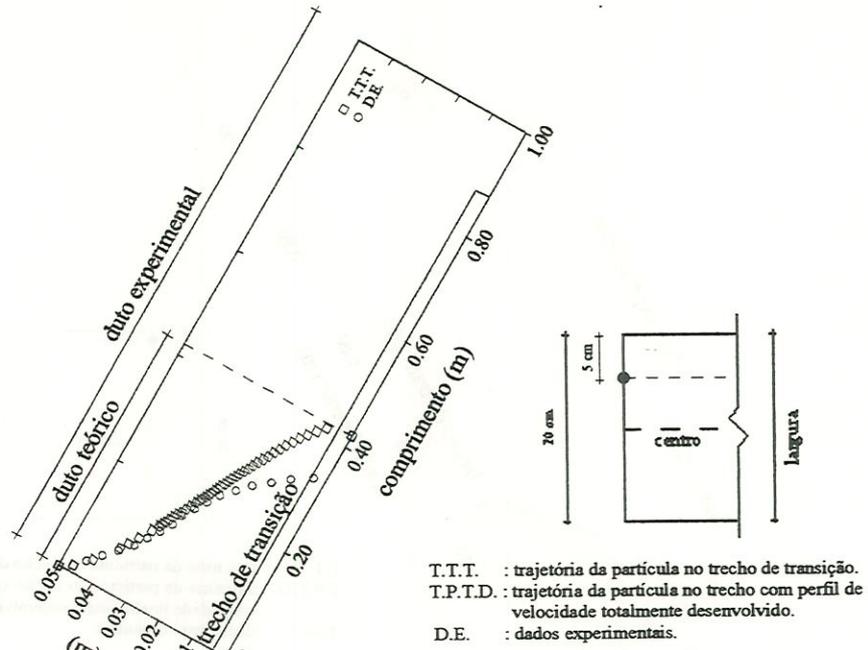


FIGURA D.103 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

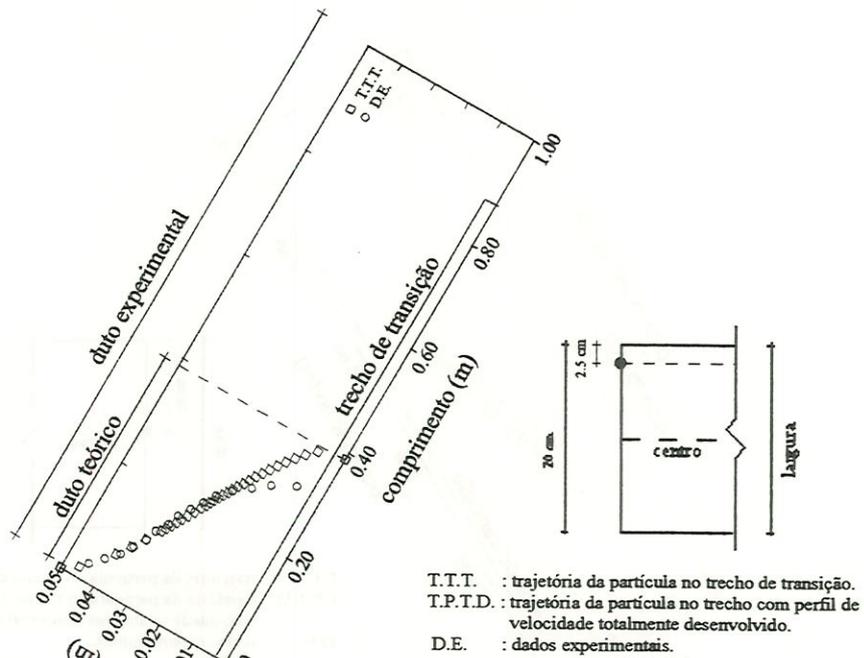


FIGURA D.104 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

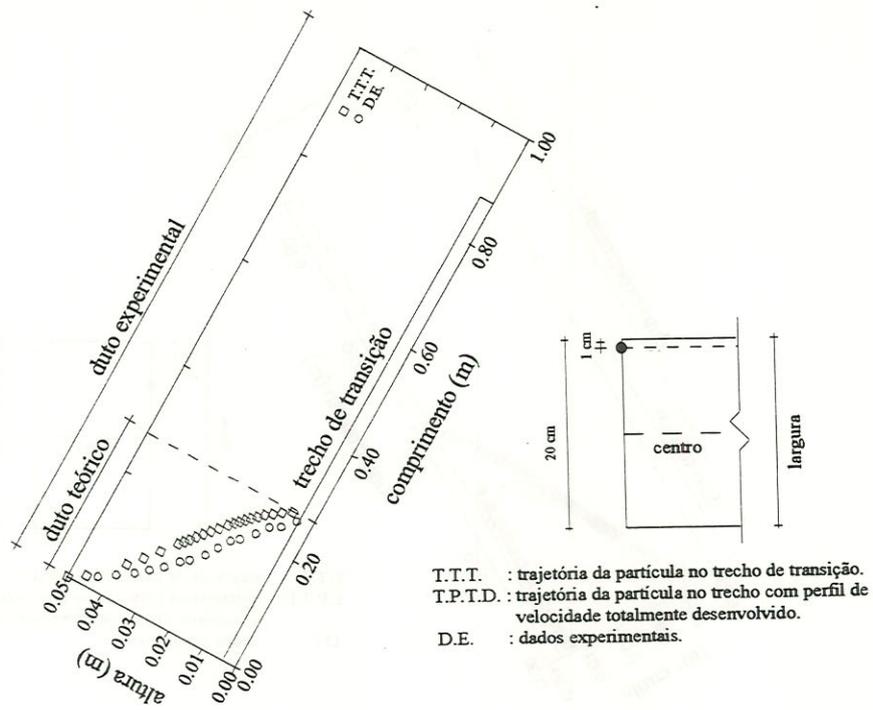


FIGURA D.105 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

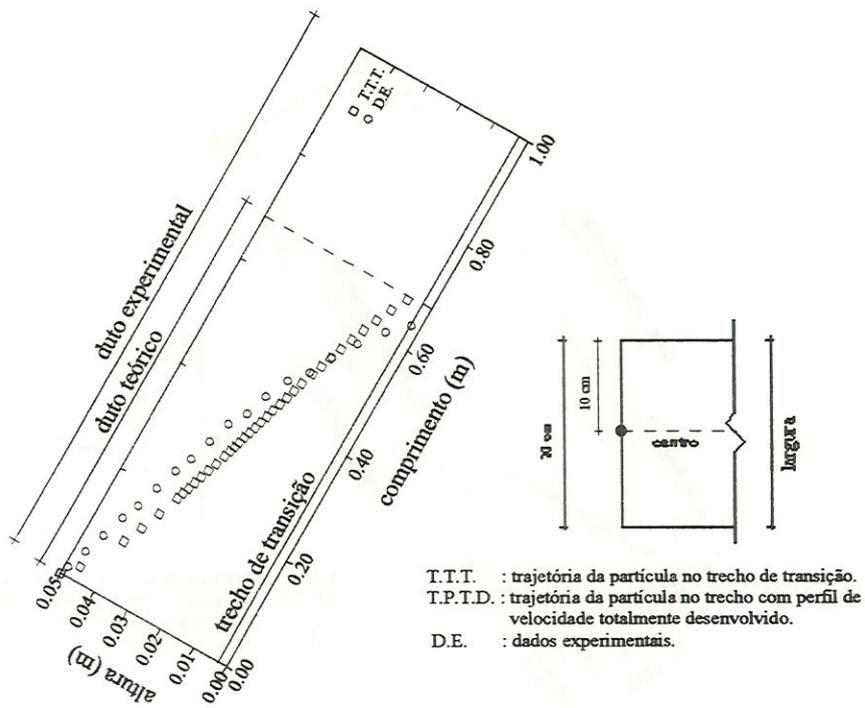


FIGURA D.106 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

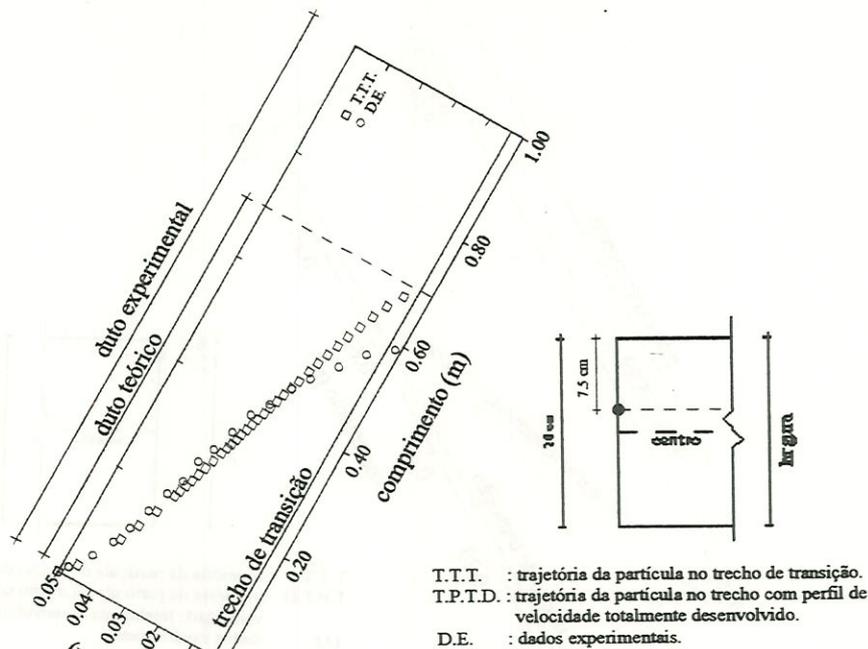


FIGURA D.107 - Trajetória da partícula 8

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

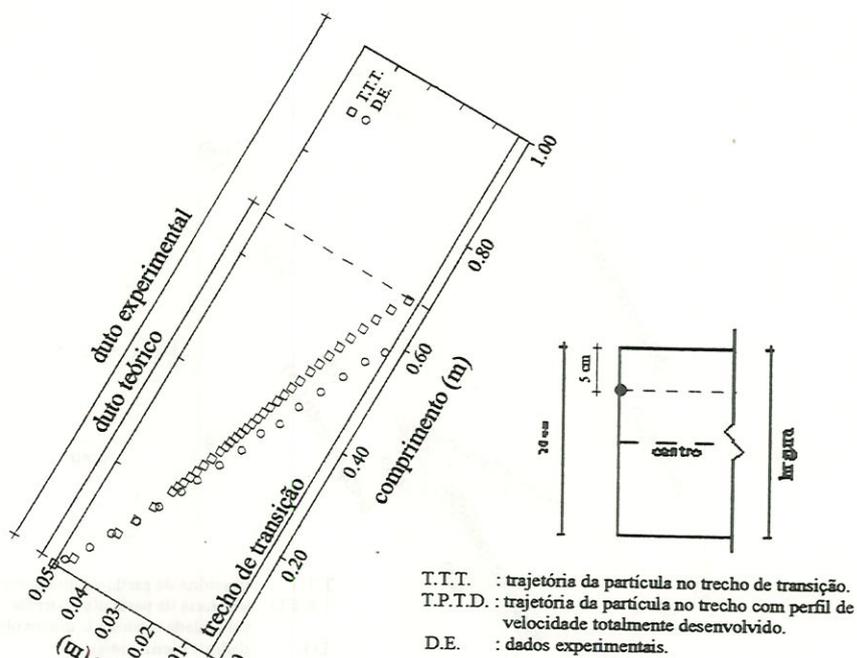


FIGURA D.108 - Trajetória da partícula 8

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

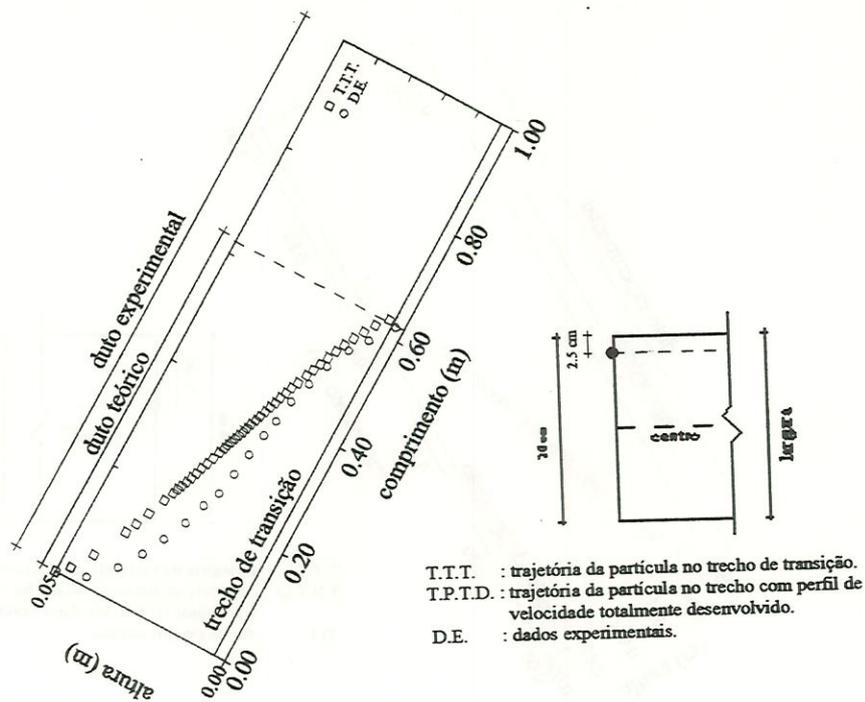


FIGURA D.109 – Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

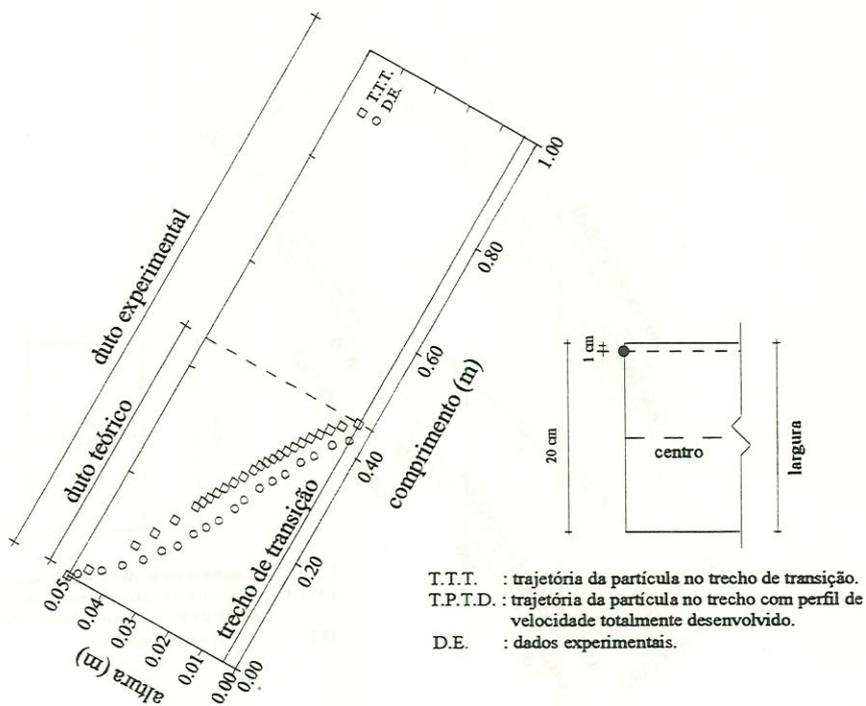


FIGURA D.110 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

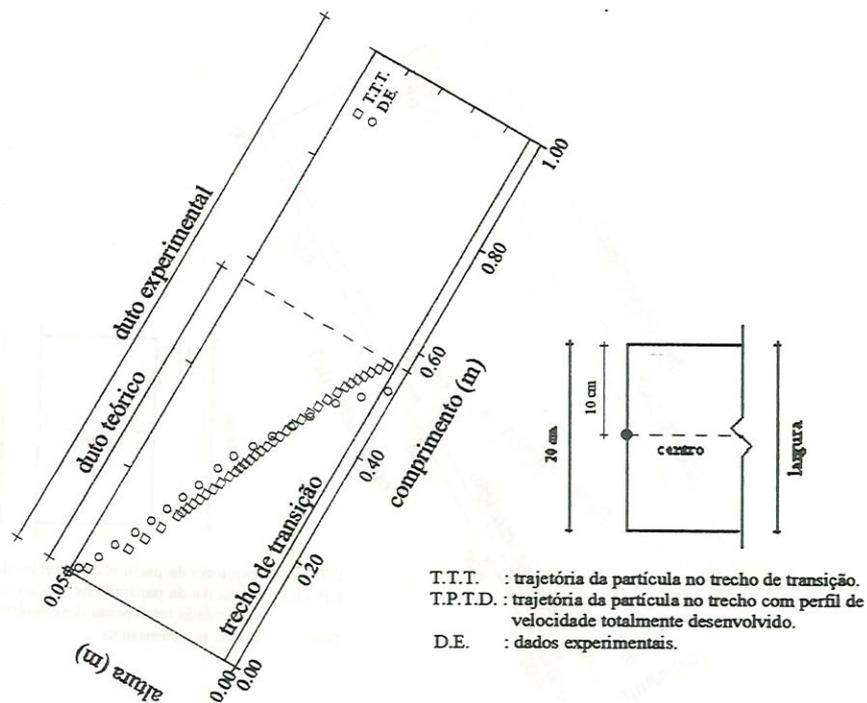


FIGURA D.111 – Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

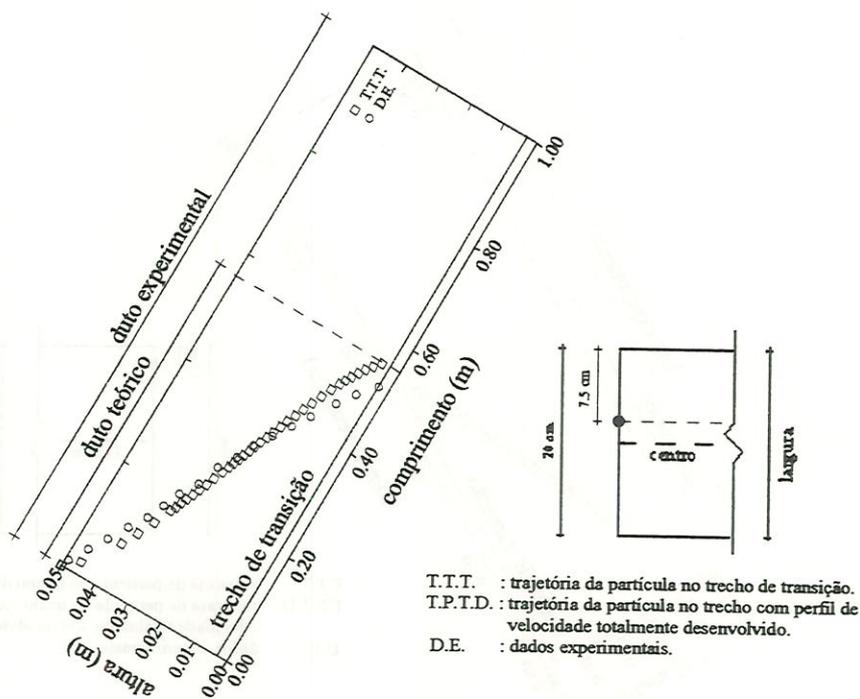


FIGURA D.112 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

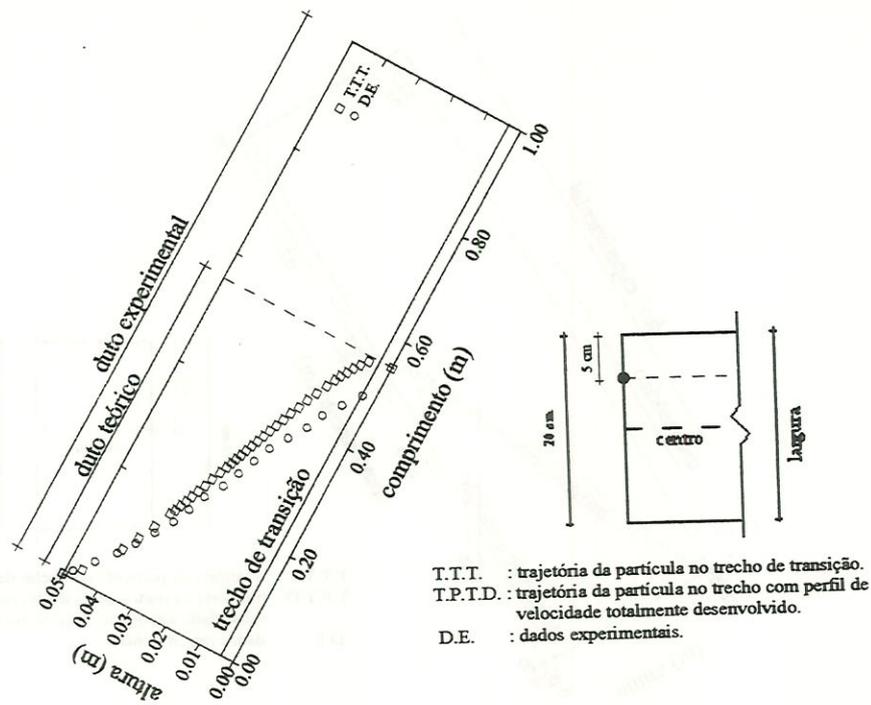


FIGURA D.113 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

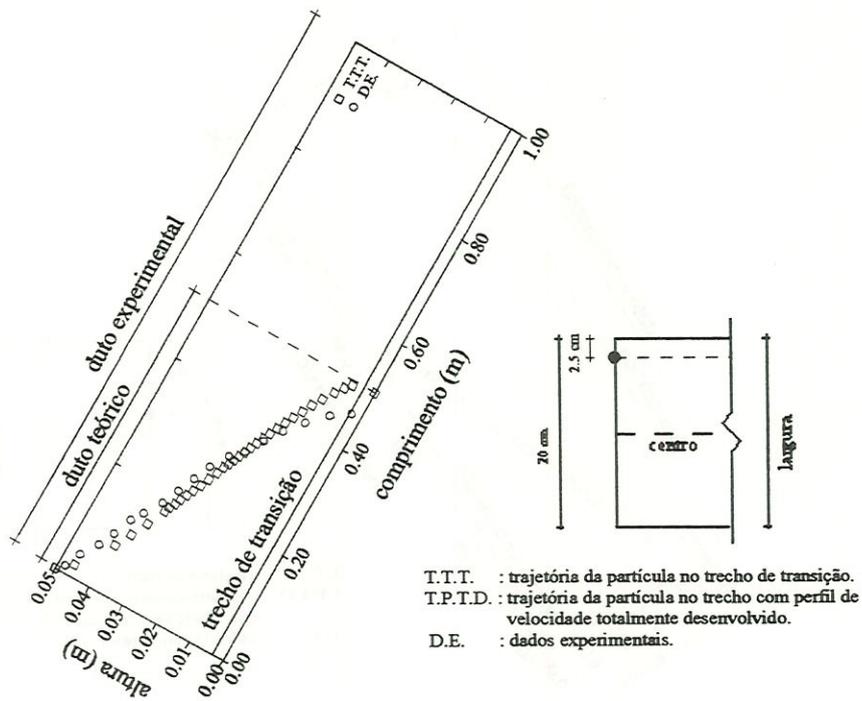


FIGURA D.114 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

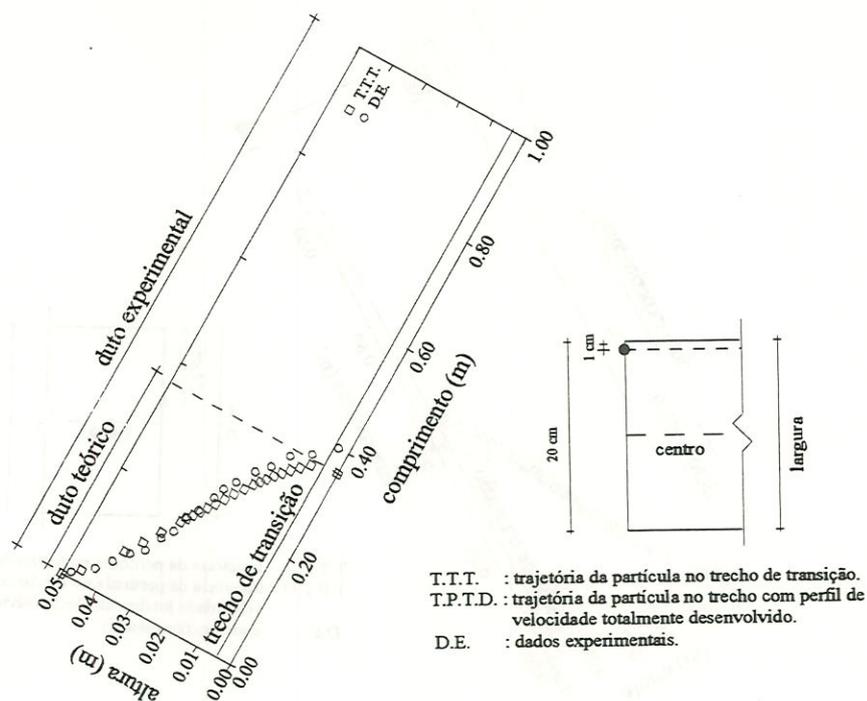


FIGURA D.115 - Trajetória da partícula 8

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

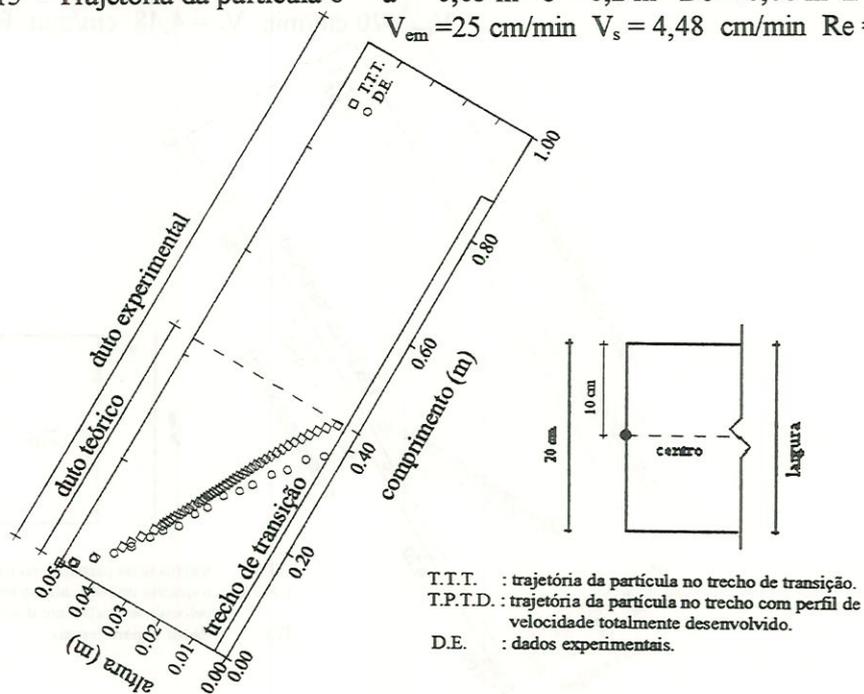


FIGURA D.116 - Trajetória da partícula 8

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

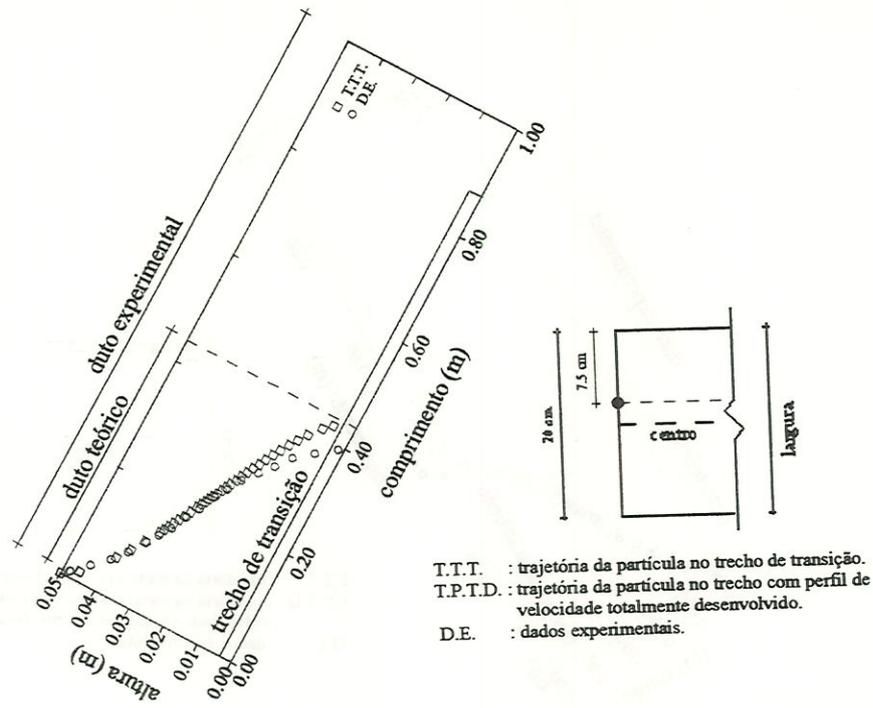


FIGURA D.117 - Trajetória da partícula 8

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{cm} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

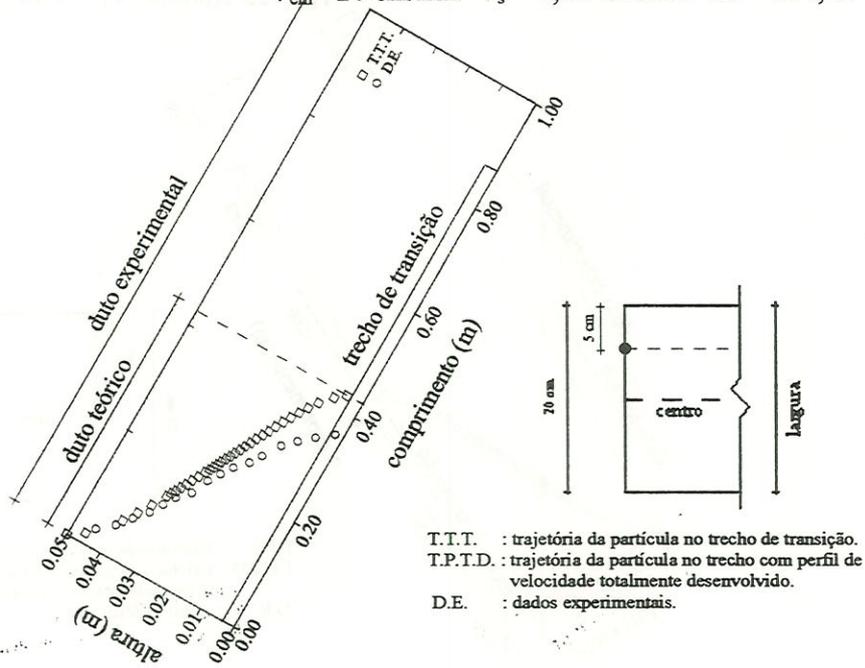


FIGURA D.118 - Trajetória da partícula 8

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{cm} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

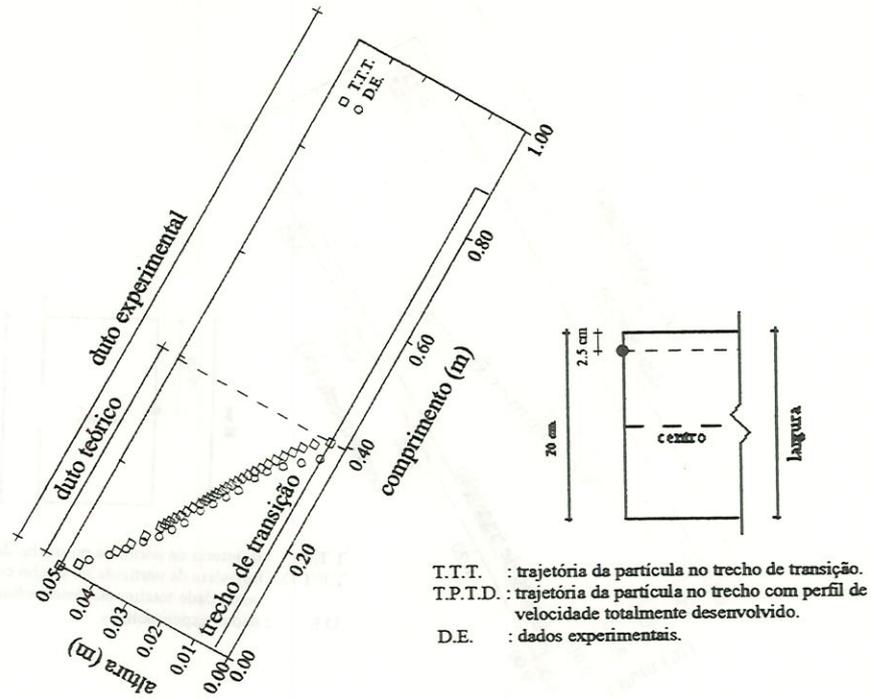


FIGURA D.119 - Trajetória da partícula 8

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

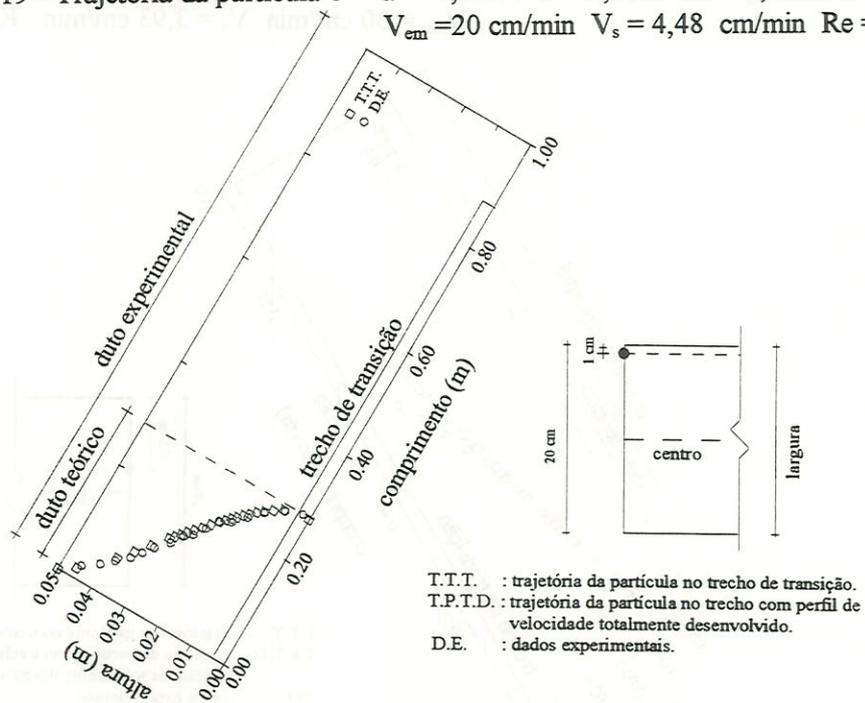


FIGURA D.120 - Trajetória da partícula 8

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

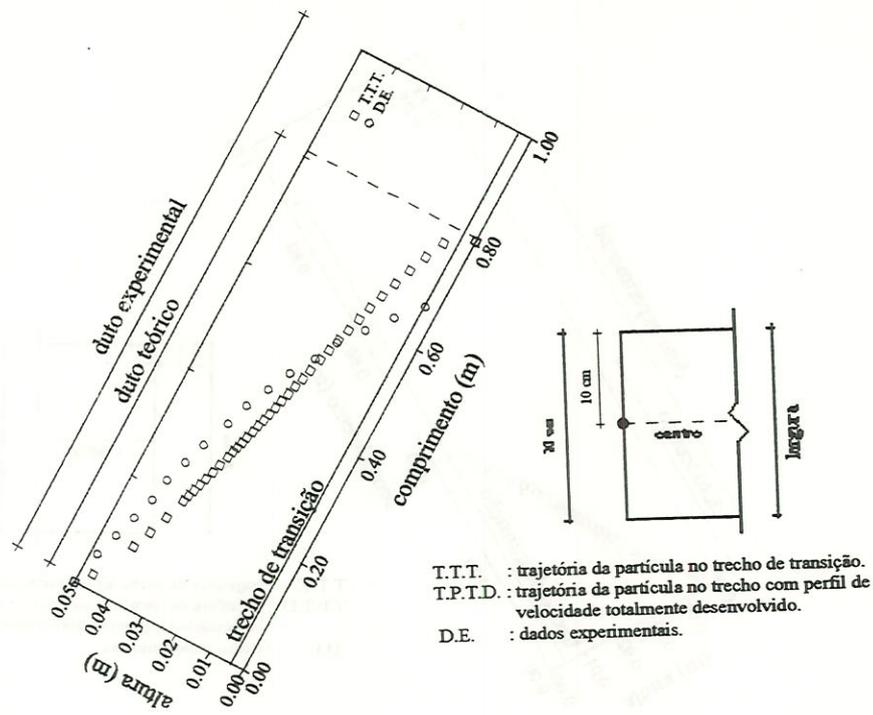


FIGURA D.121 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

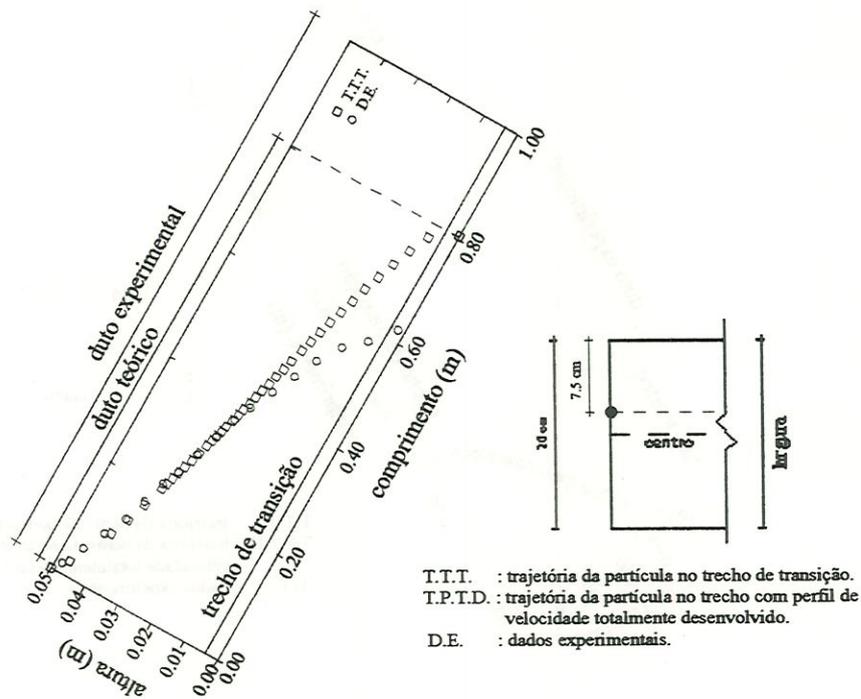


FIGURA D.122 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

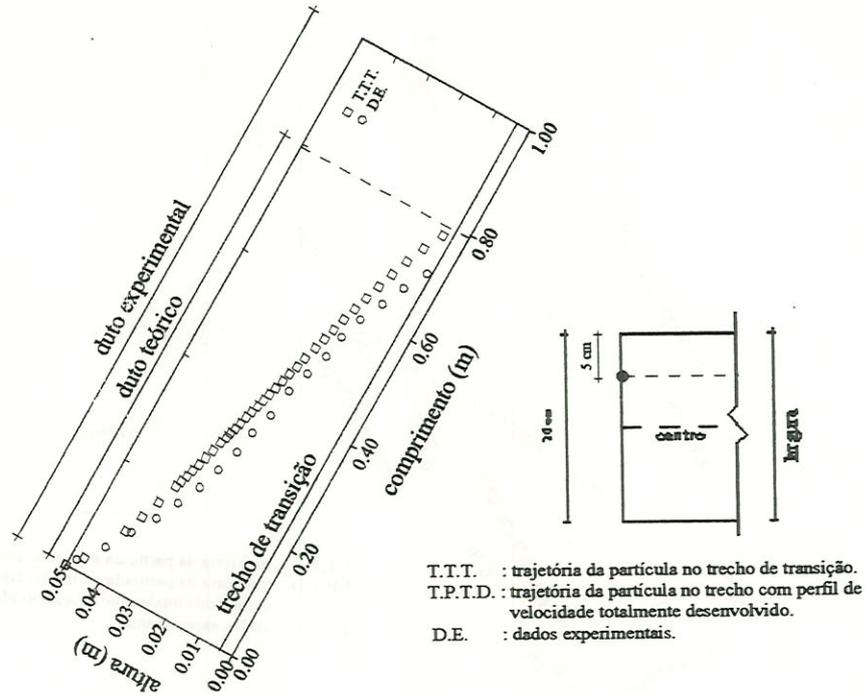


FIGURA D.123 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,2\text{ m}$ $D_c = 0,08\text{ m}$ $l_r = 1,36\text{ m}$
 $V_{em} = 30\text{ cm/min}$ $V_s = 3,93\text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

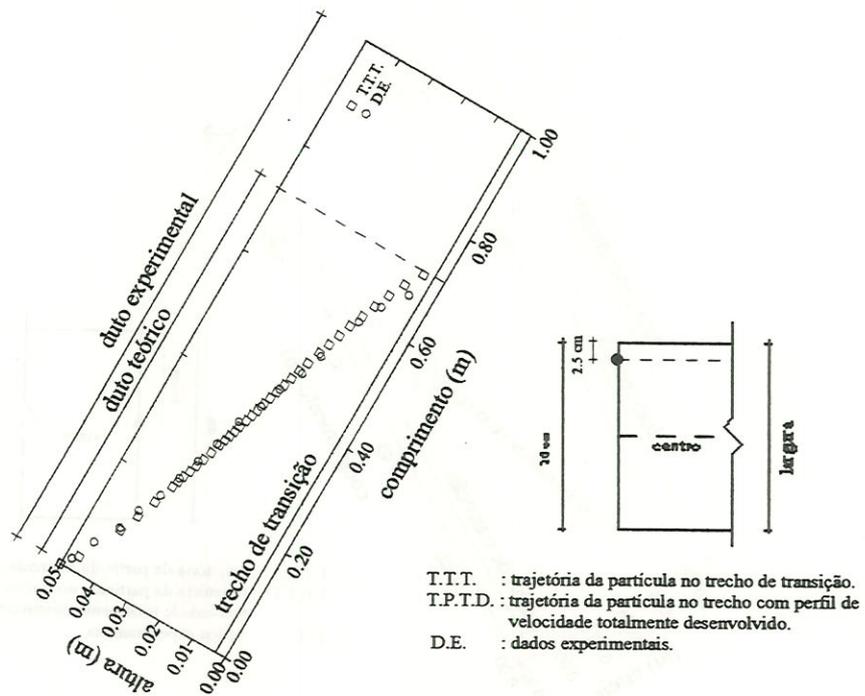


FIGURA D.124 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05\text{ m}$ $b = 0,2\text{ m}$ $D_c = 0,08\text{ m}$ $l_r = 1,36\text{ m}$
 $V_{em} = 30\text{ cm/min}$ $V_s = 3,93\text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

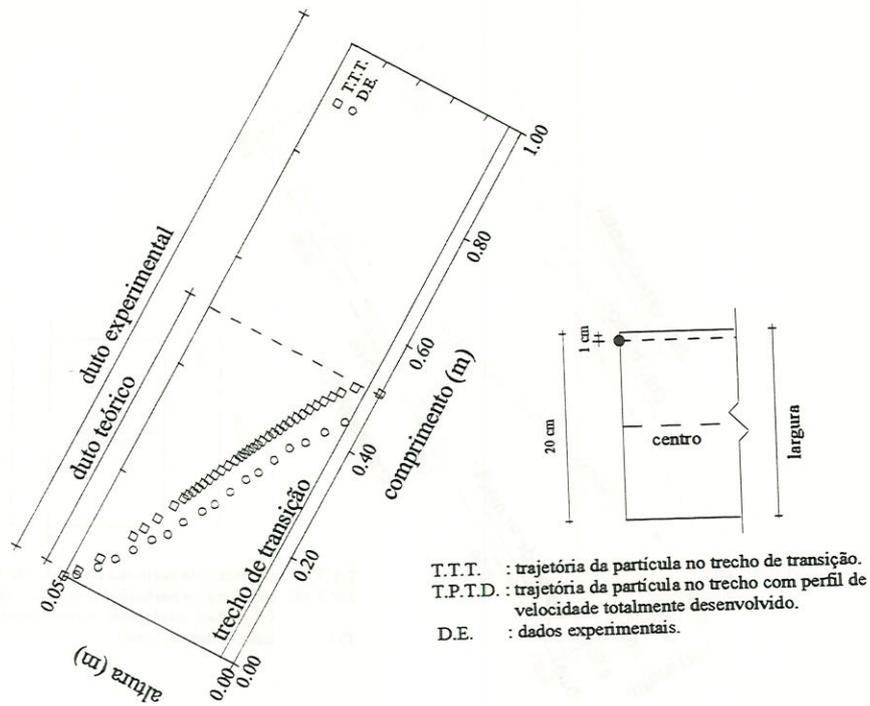


FIGURA D.125 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,36 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 397,22$

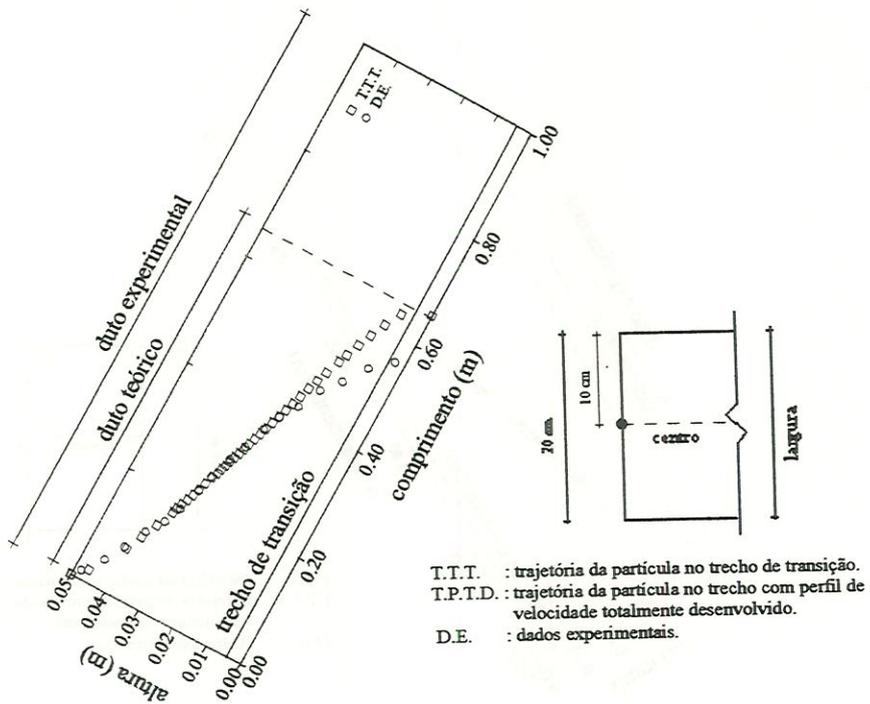


FIGURA D.126 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

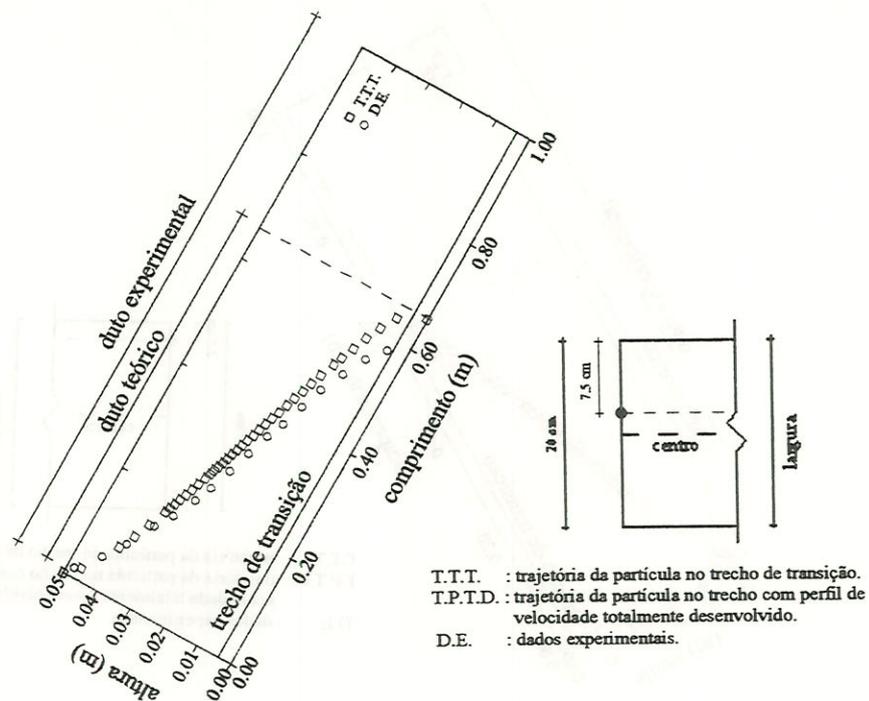


FIGURA D.127 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

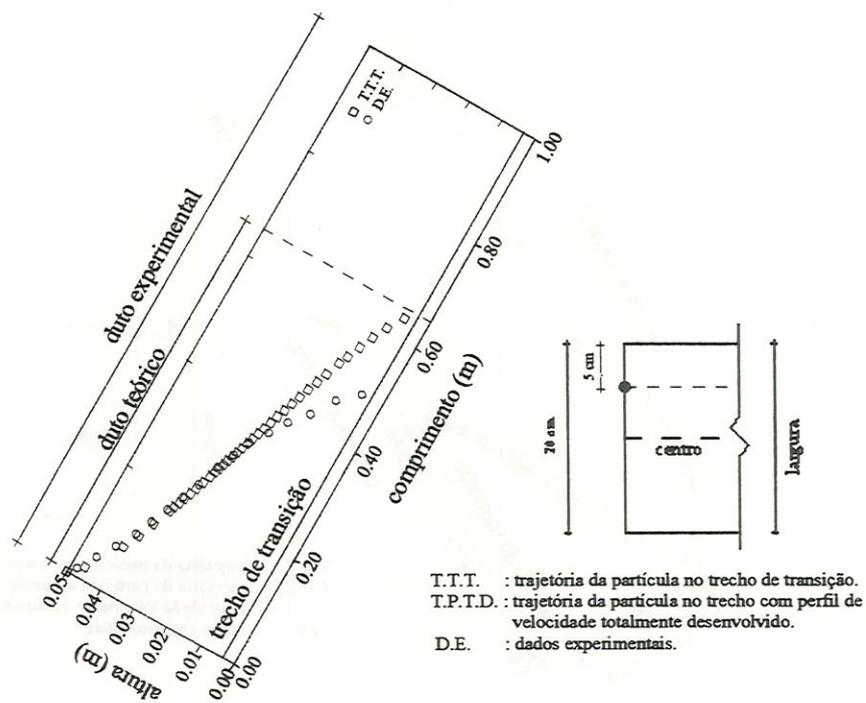


FIGURA D.128 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

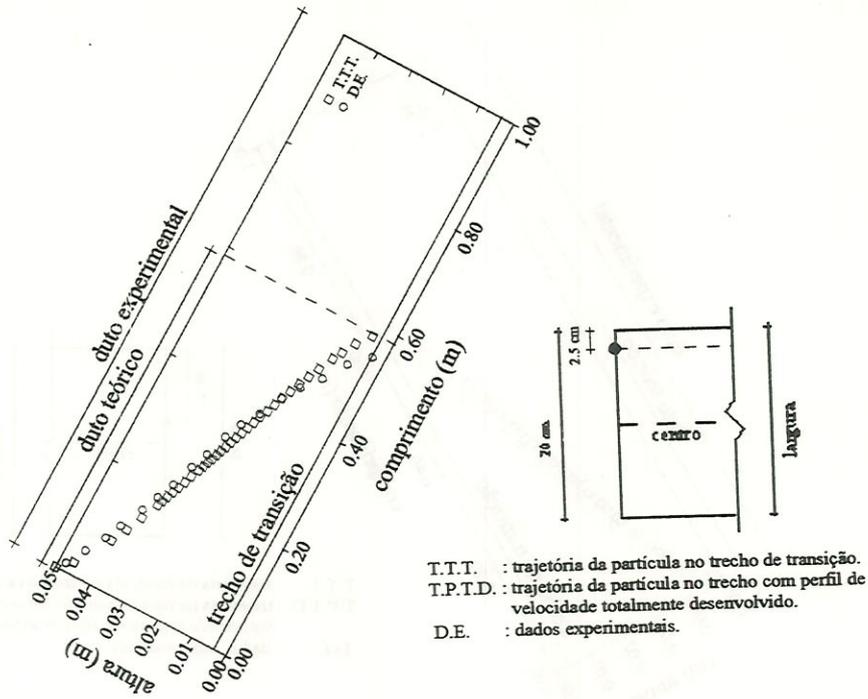


FIGURA D.129 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

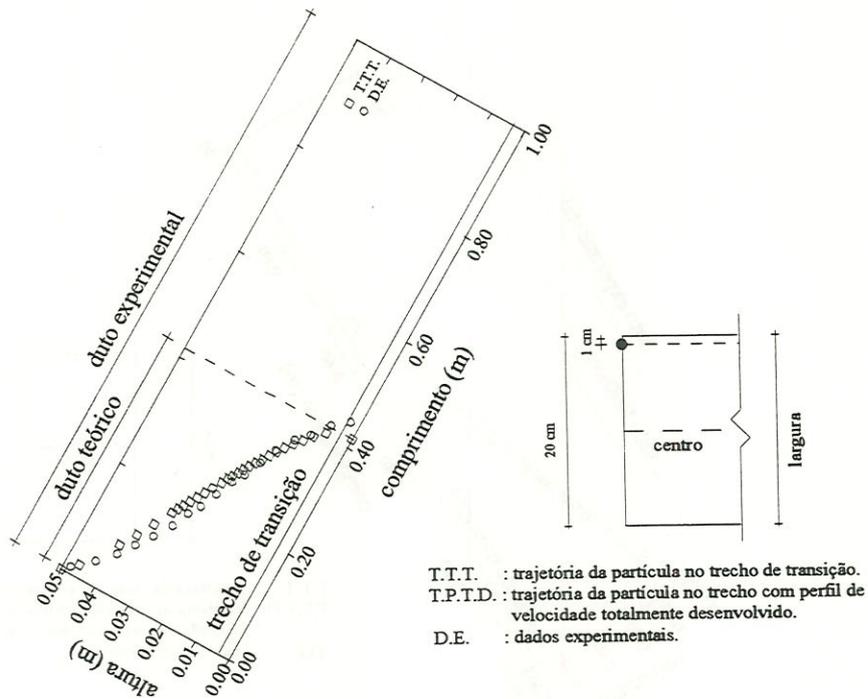


FIGURA D.130 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 1,13 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 331,28$

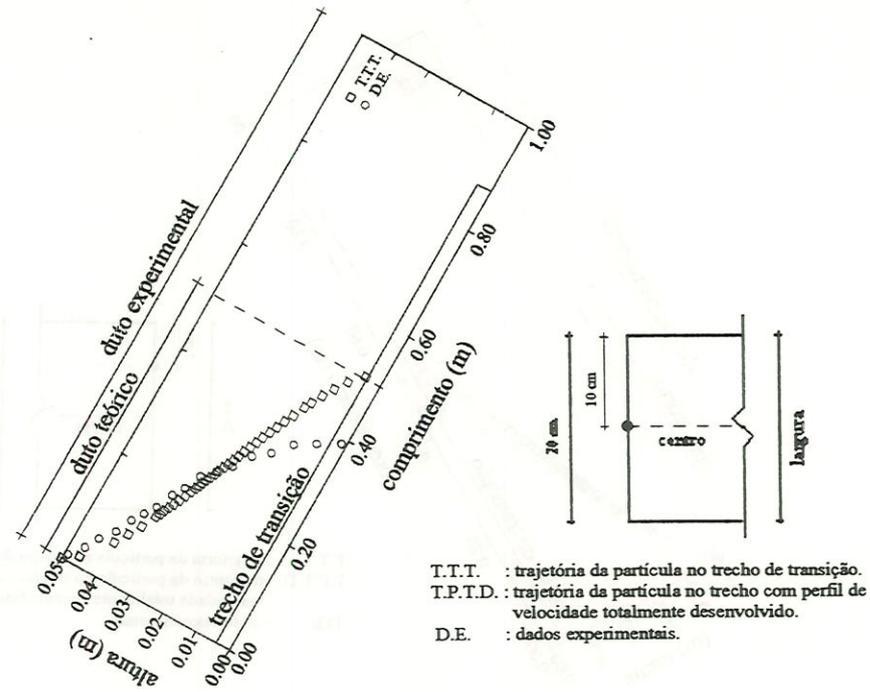


FIGURA D.131 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

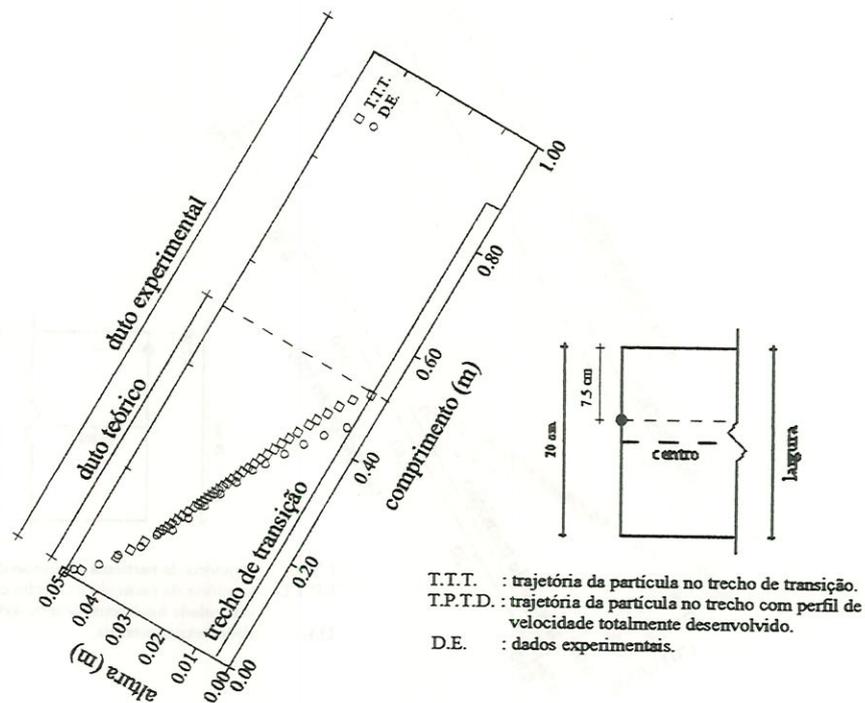


FIGURA D.132 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

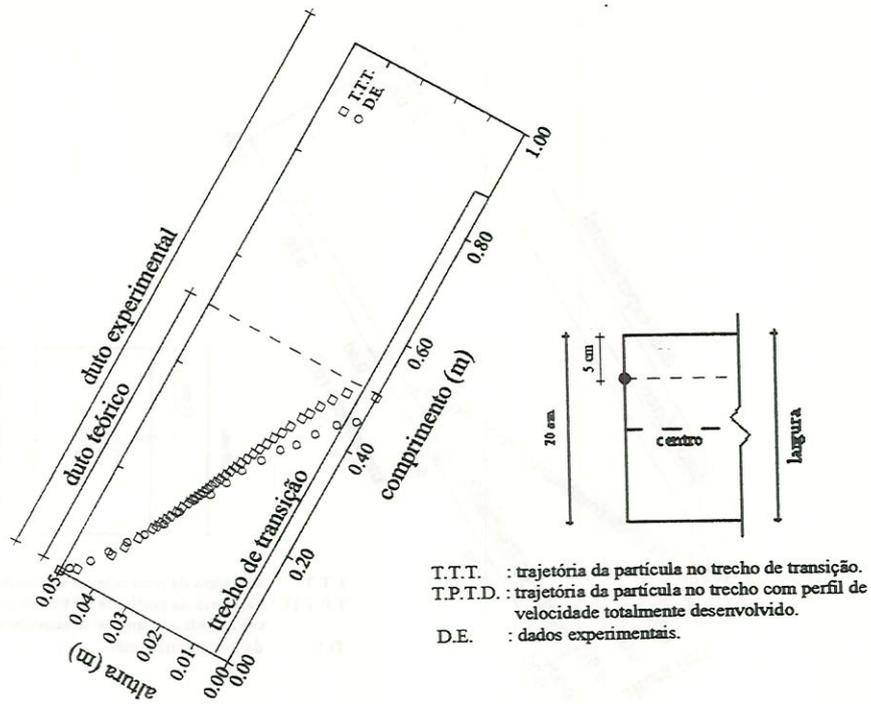


FIGURA D.133 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

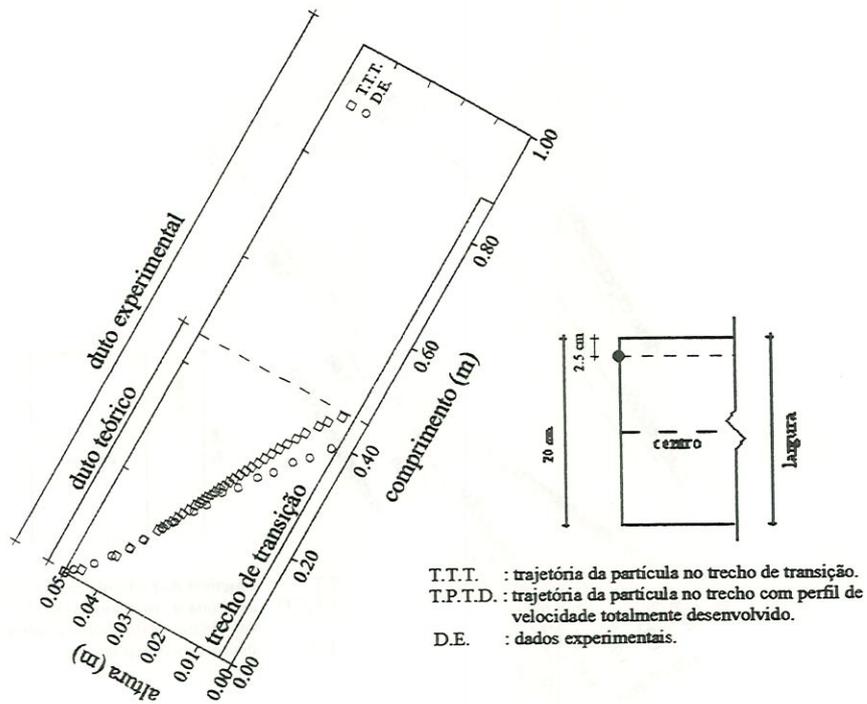


FIGURA D.134 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$

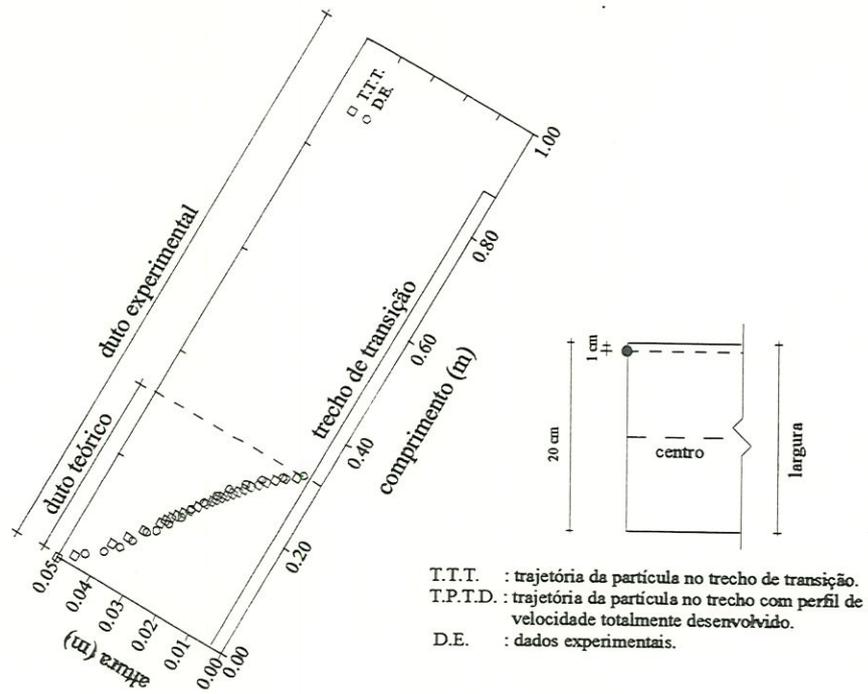


FIGURA D.135 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,2 \text{ m}$ $D_c = 0,08 \text{ m}$ $l_r = 0,90 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 264,55$



FIGURE 1.1. Technical drawing or map showing various lines and shapes.

FIGURE 1.2. Technical drawing or map showing various lines and shapes.

ANEXO E

Tabela E.1 Descrição das figuras para o duto 5X50 cm²

Velocidade sedimentação cm/min	Velocidade escoamento cm/min	25 cm	17 cm	9 cm
(1) 2,24	30	Figura E.1	Figura E.2	Figura E.3
	25	Figura E.4	Figura E.5	Figura E.6
	20	Figura E.7	Figura E.8	Figura E.9
(2) 5,20	30	Figura E.10	Figura E.11	Figura E.12
	25	Figura E.13	Figura E.14	Figura E.15
	20	Figura E.16	Figura E.17	Figura E.18
(3) 3,32	30	Figura E.19	Figura E.20	Figura E.21
	25	Figura E.22	Figura E.23	Figura E.24
	20	Figura E.25	Figura E.26	Figura E.27
(4) 3,50	30	Figura E.28	Figura E.29	Figura E.30
	25	Figura E.31	Figura E.32	Figura E.33
	20	Figura E.34	Figura E.35	Figura E.36
(5) 2,72	30	Figura E.37	Figura E.38	Figura E.39
	25	Figura E.40	Figura E.41	Figura E.42
	20	Figura E.43	Figura E.44	Figura E.45
(6) 3,56	30	Figura E.46	Figura E.47	Figura E.48
	25	Figura E.49	Figura E.50	Figura E.51
	20	Figura E.52	Figura E.53	Figura E.54
(7) 4,52	30	Figura E.55	Figura E.56	Figura E.57
	25	Figura E.58	Figura E.59	Figura E.60
	20	Figura E.61	Figura E.62	Figura E.63
(8) 4,48	30	Figura E.64	Figura E.65	Figura E.66
	25	Figura E.67	Figura E.68	Figura E.69
	20	Figura E.70	Figura E.71	Figura E.72
(9) 3,93	30	Figura E.73	Figura E.74	Figura E.75
	25	Figura E.76	Figura E.77	Figura E.78
	20	Figura E.79	Figura E.80	Figura E.81

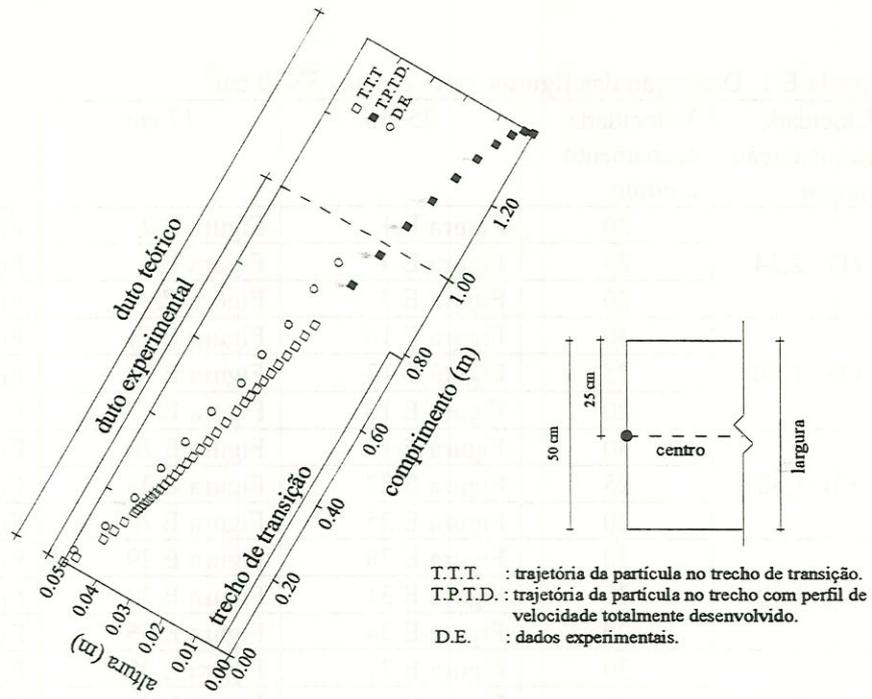


FIGURA E.1 - Trajetória da partícula 1

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

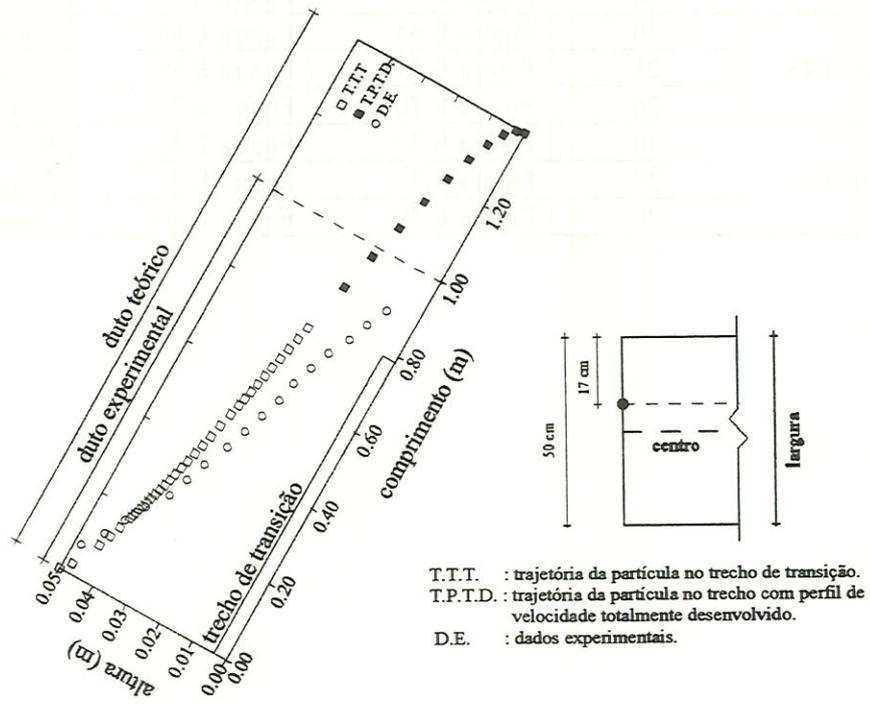


FIGURA E.2 - Trajetória da partícula 1

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

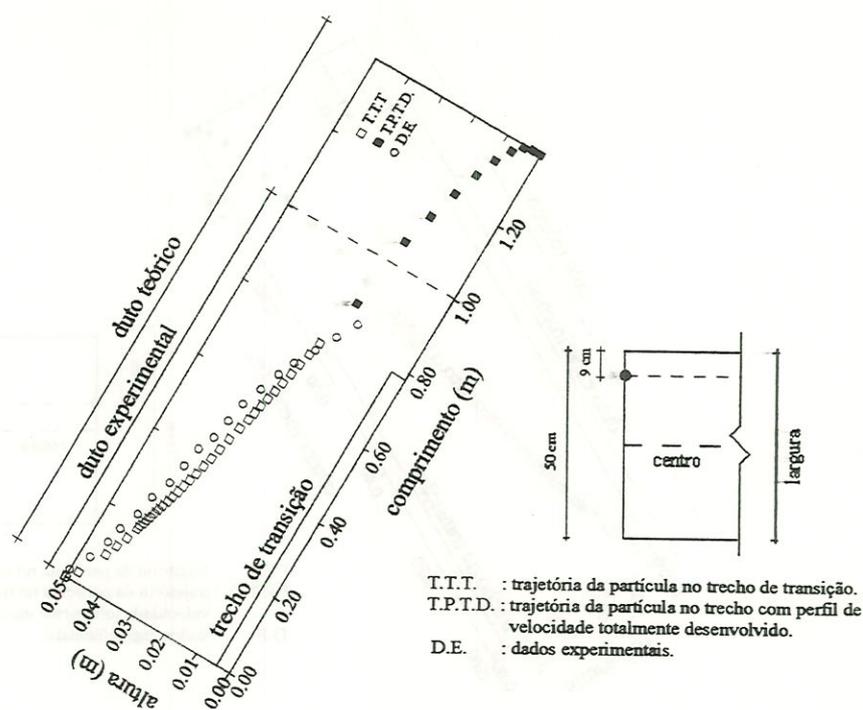


FIGURA E.3 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

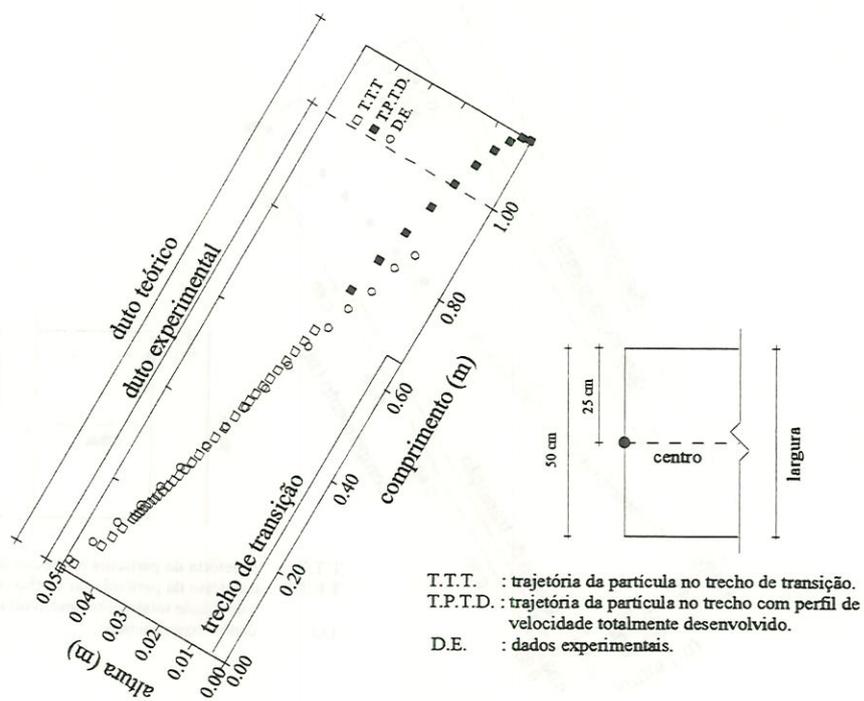


FIGURA E.4 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

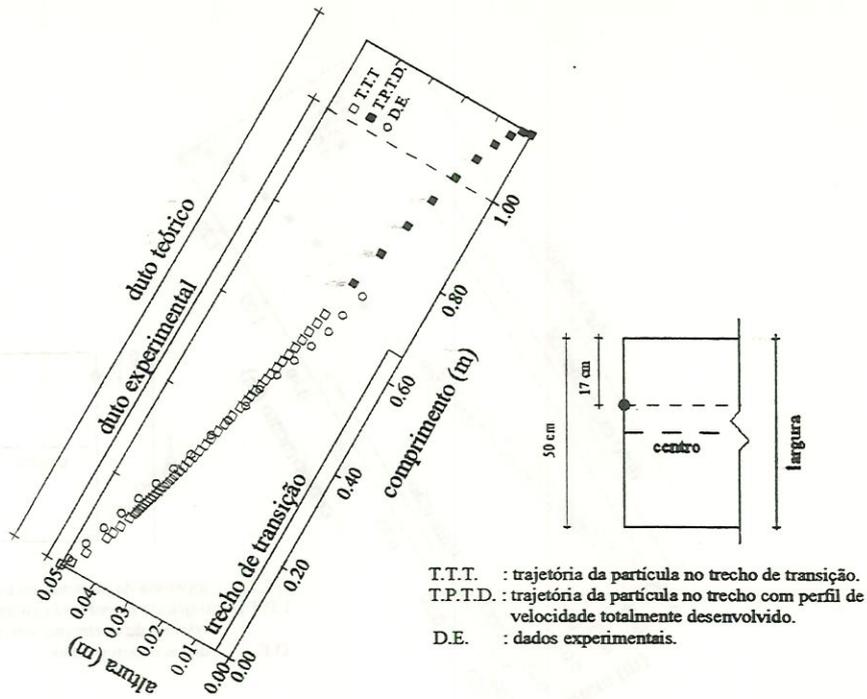


FIGURA E.5 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

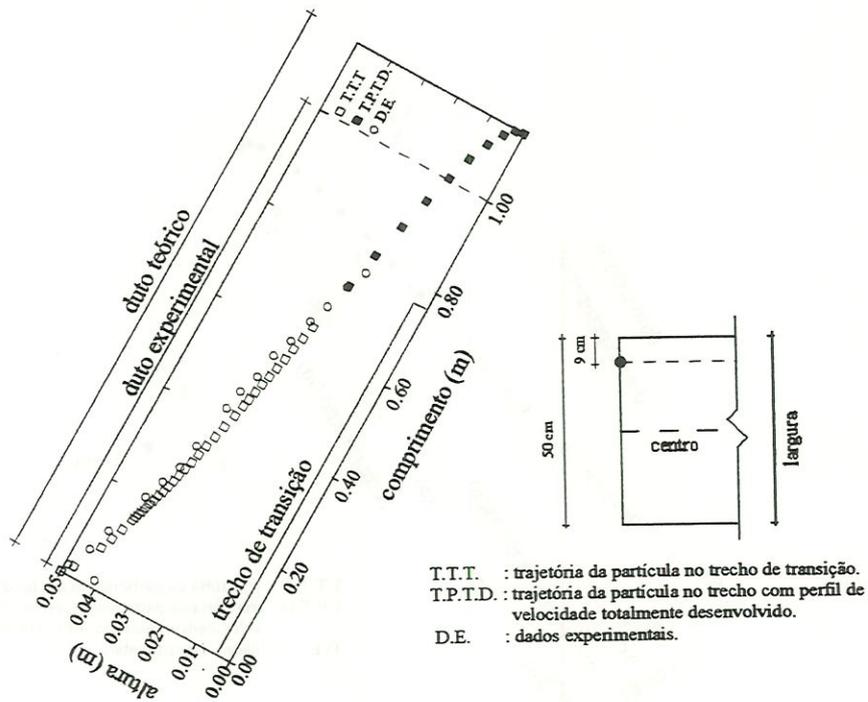


FIGURA E.6 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

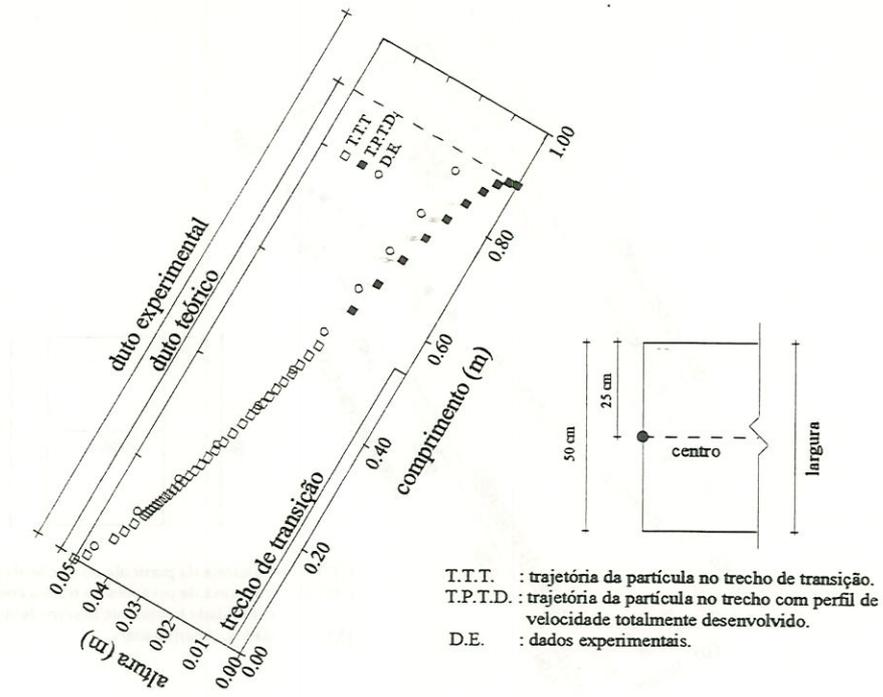


FIGURA E.7 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

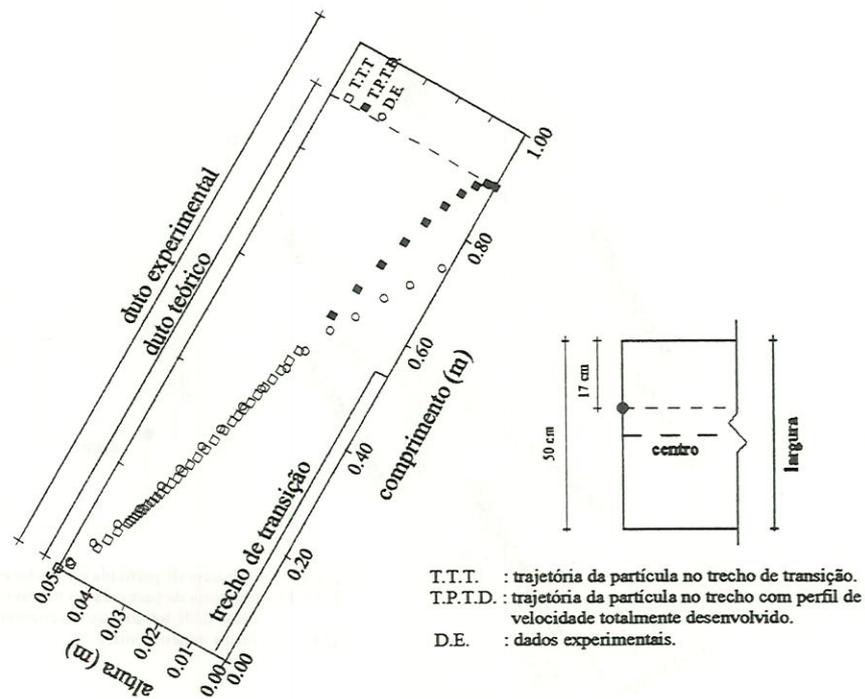


FIGURA E.8 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

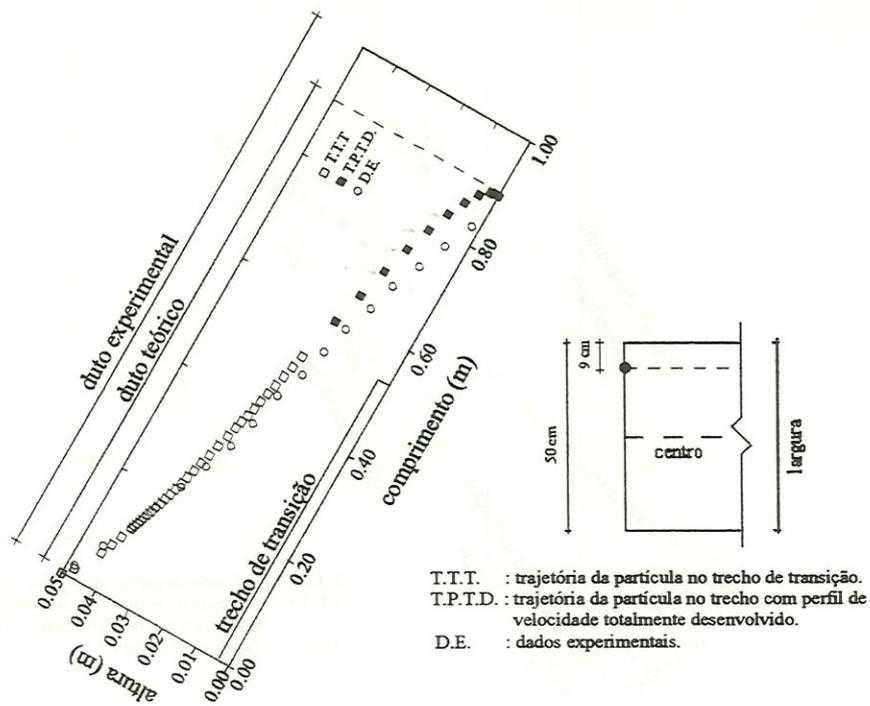


FIGURA E.9 - Trajetória da partícula 1 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,24 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

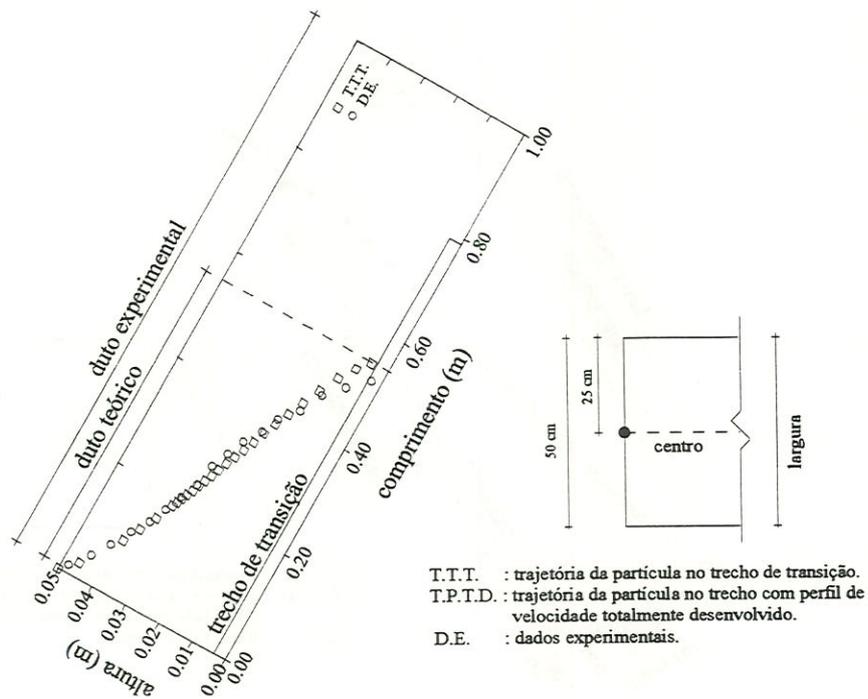


FIGURA E.10 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

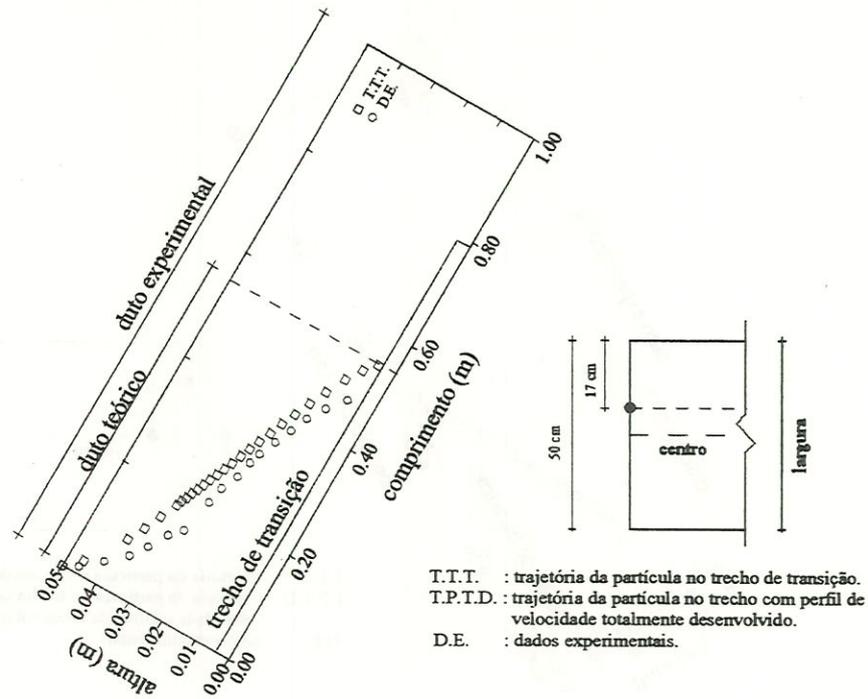


FIGURA E.11 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

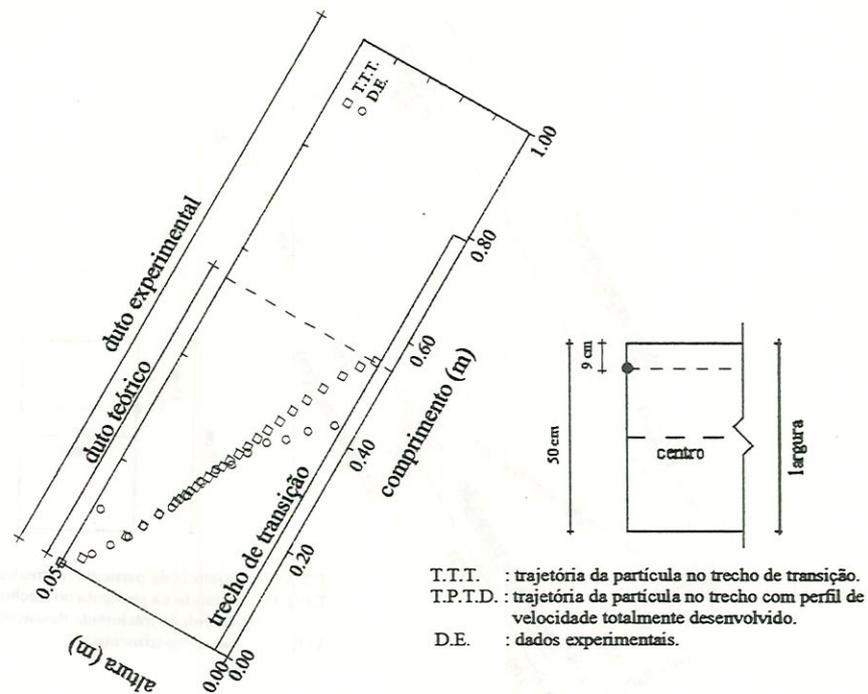


FIGURA E.12 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

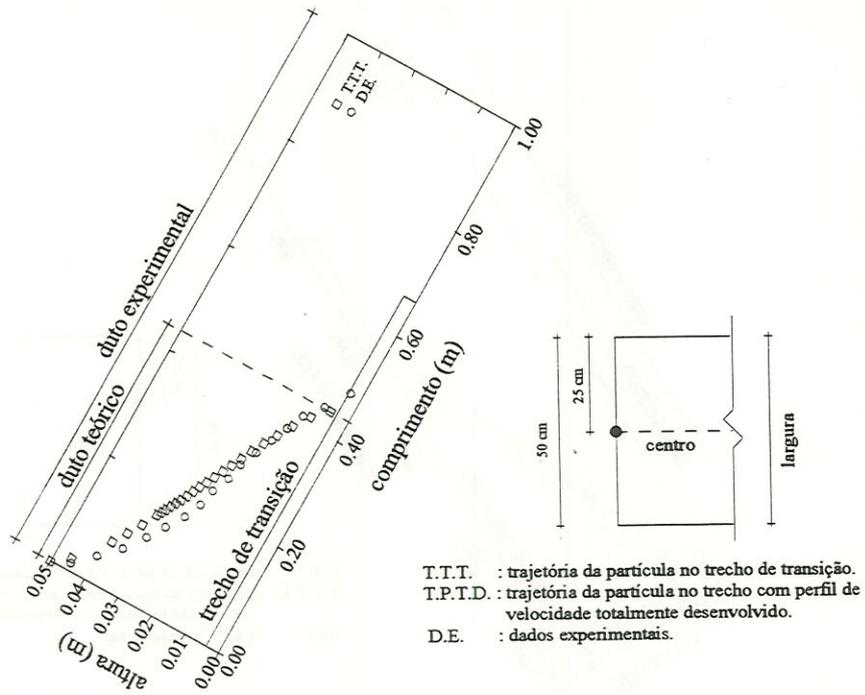


FIGURA E.13 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

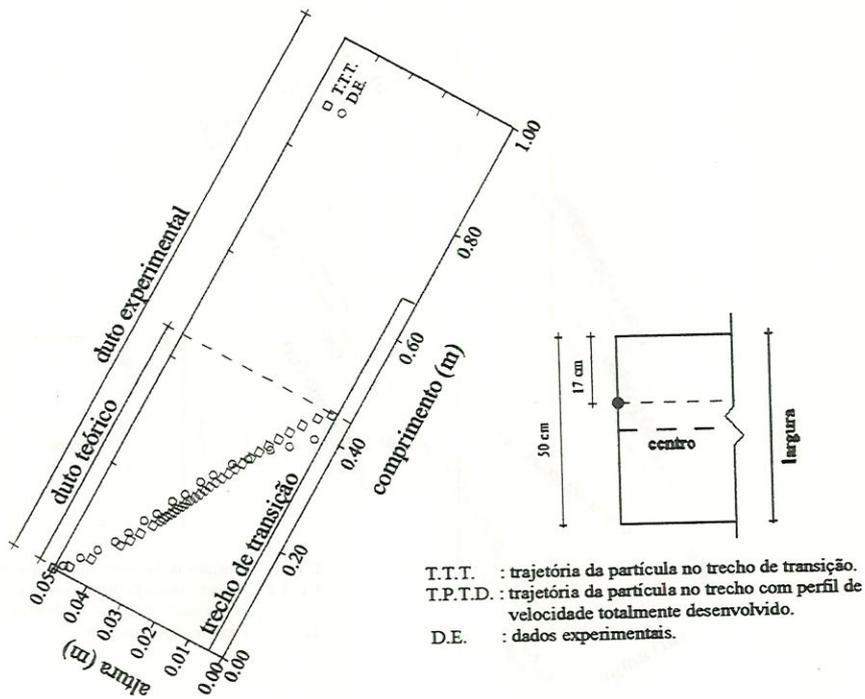


FIGURA E.14 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

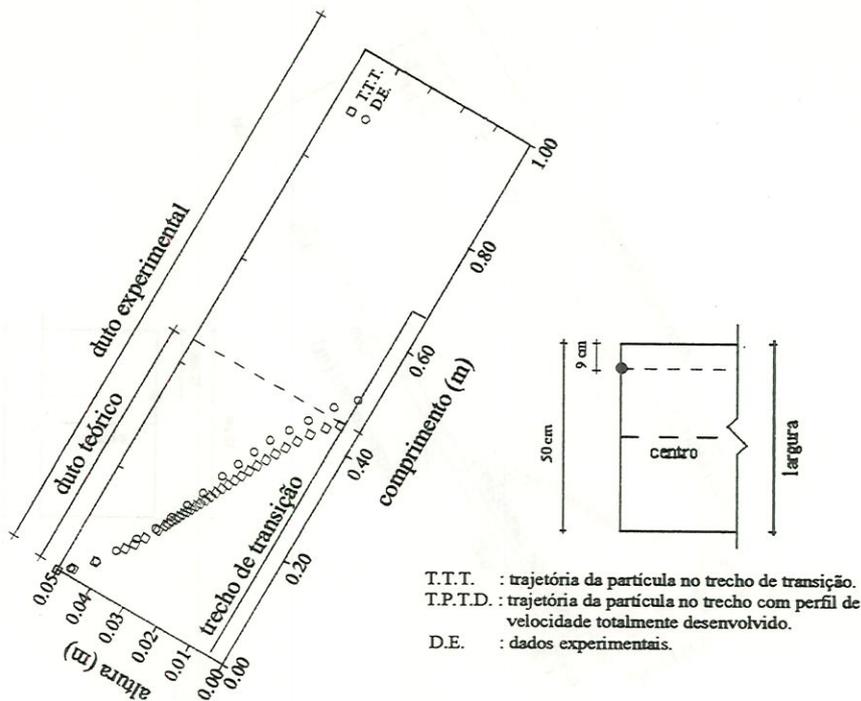


FIGURA E.15 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

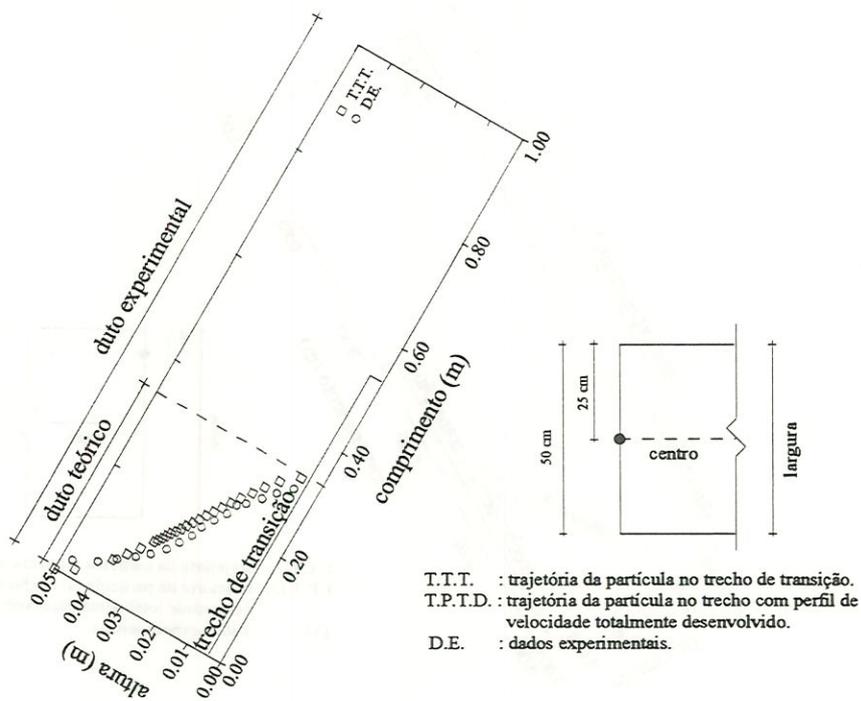


FIGURA E.16 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

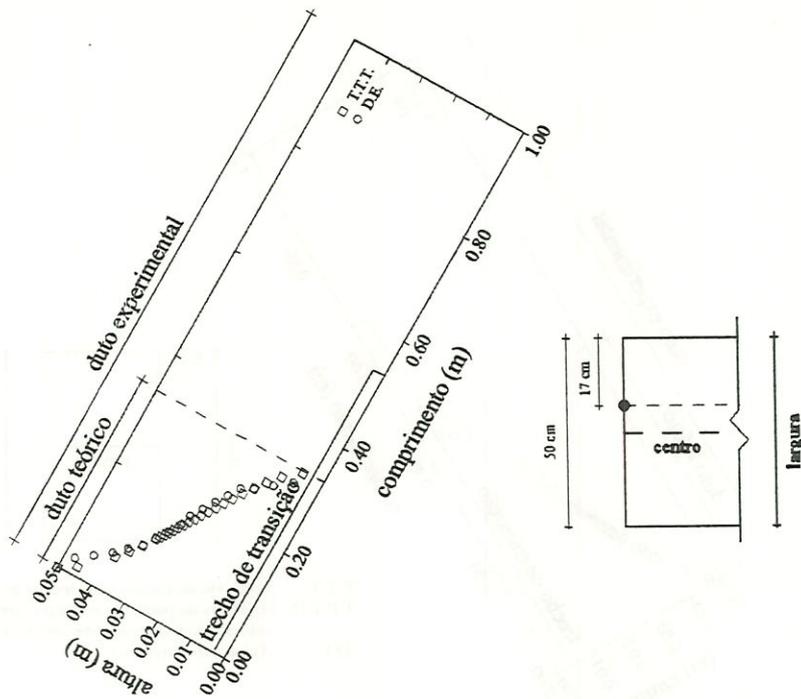
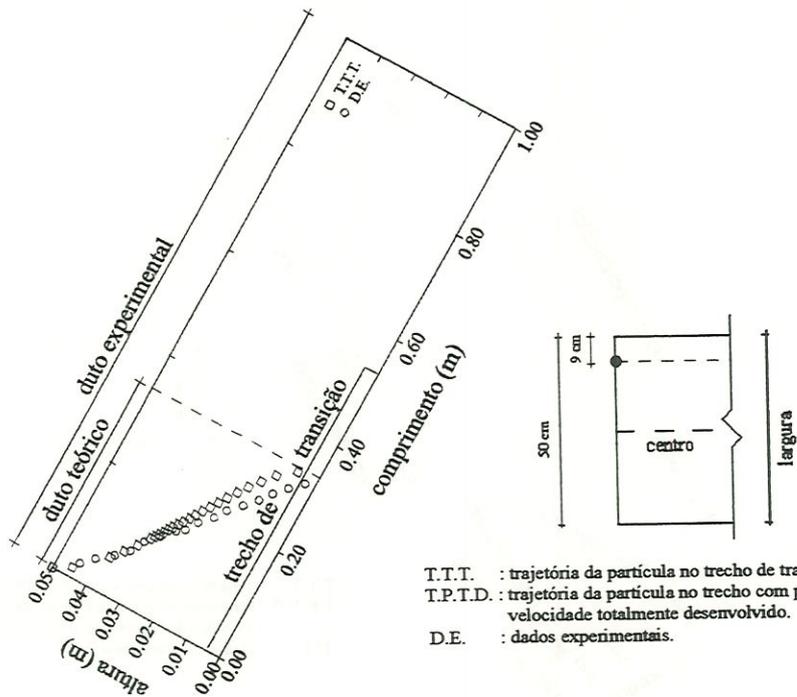


FIGURA E.17 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$



T.T.T. : trajetória da partícula no trecho de transição.
 T.P.T.D. : trajetória da partícula no trecho com perfil de velocidade totalmente desenvolvido.
 D.E. : dados experimentais.

FIGURA E.18 - Trajetória da partícula 2 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 5,20 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

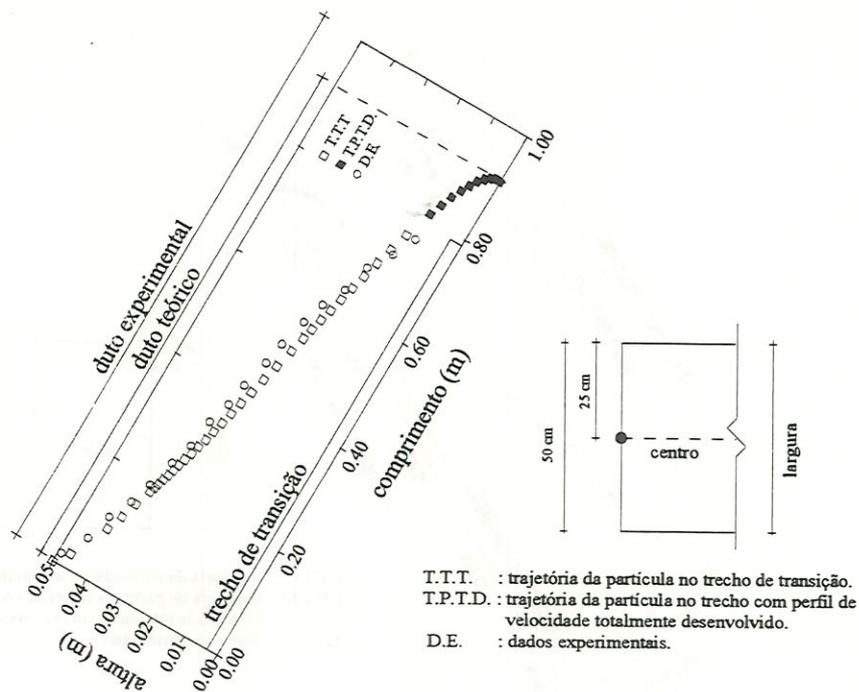


FIGURA E.19 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

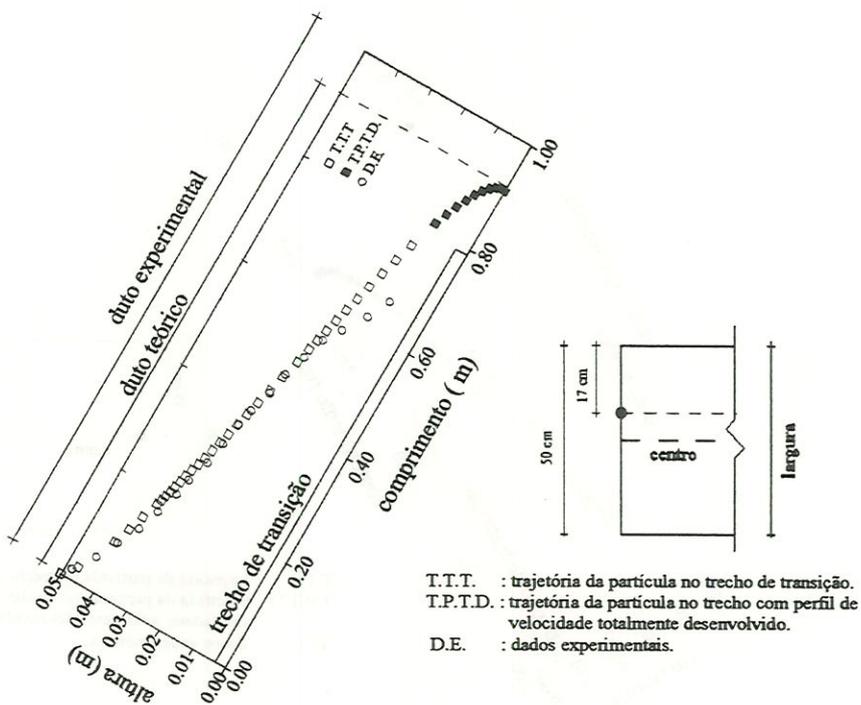


FIGURA E.20 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

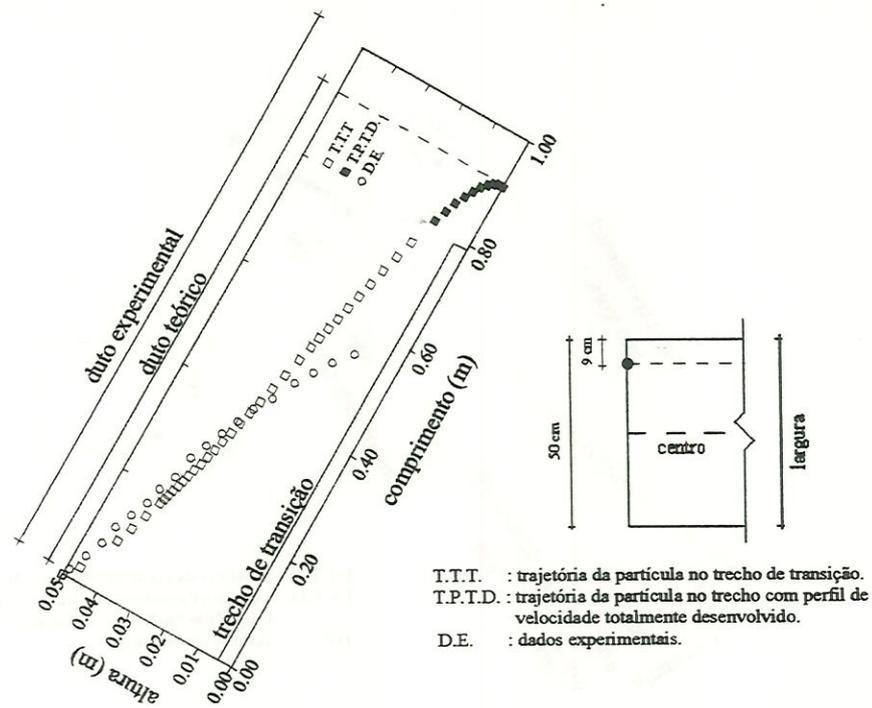


FIGURA E.21 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

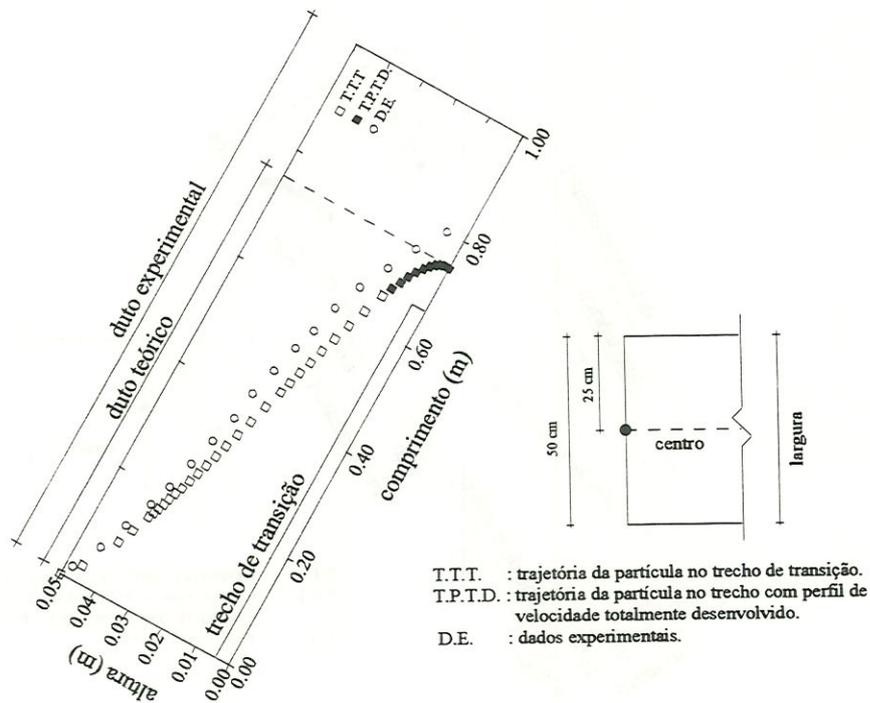


FIGURA E.22 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

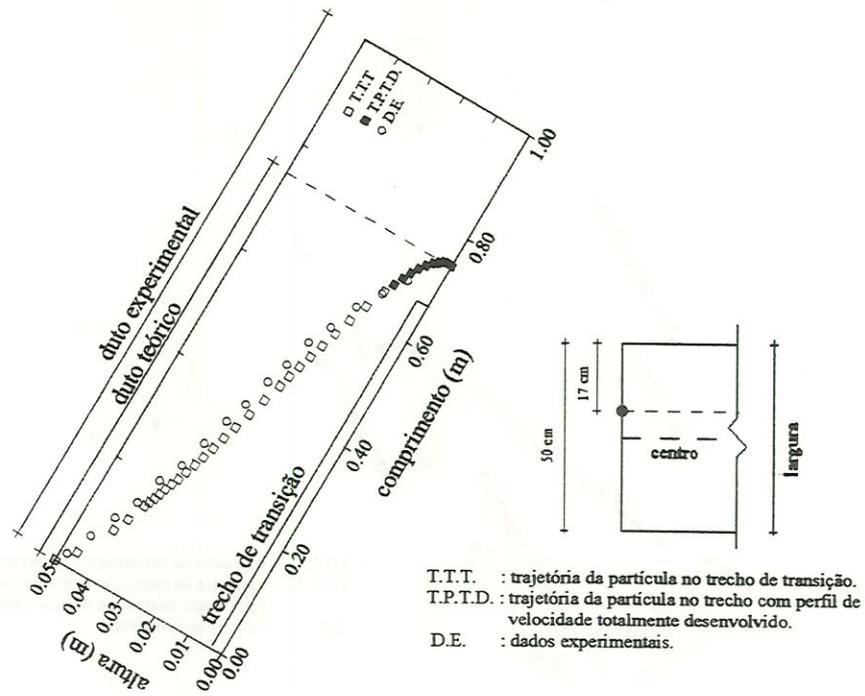


FIGURA E.23 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

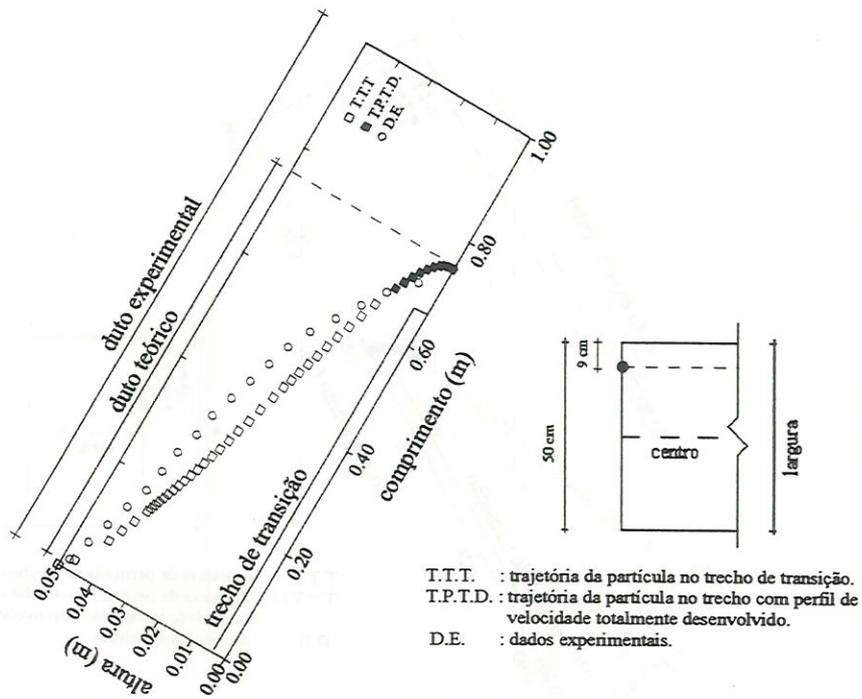


FIGURA E.24 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

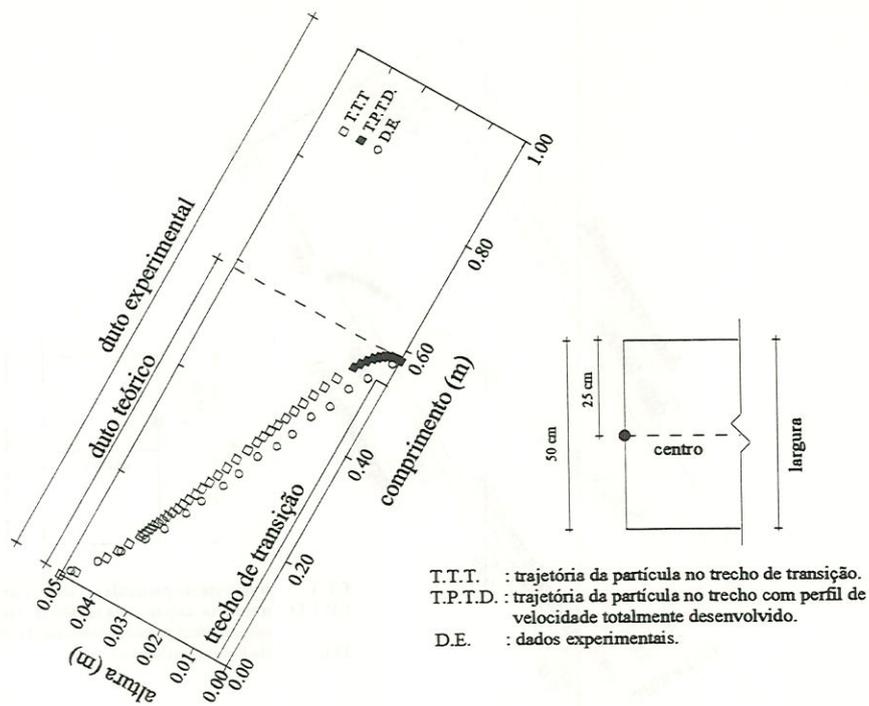


FIGURA E.25 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

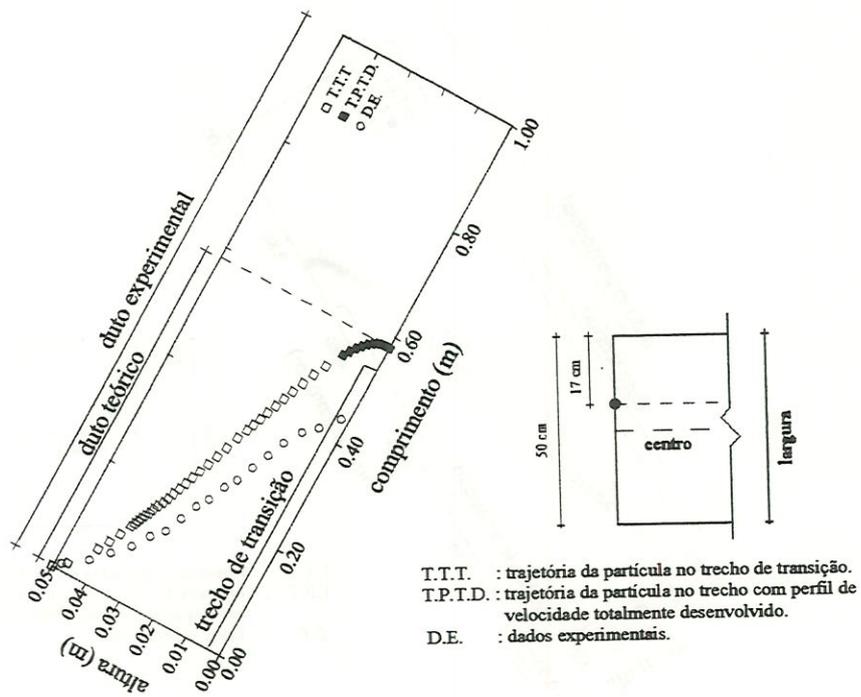


FIGURA E.26 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

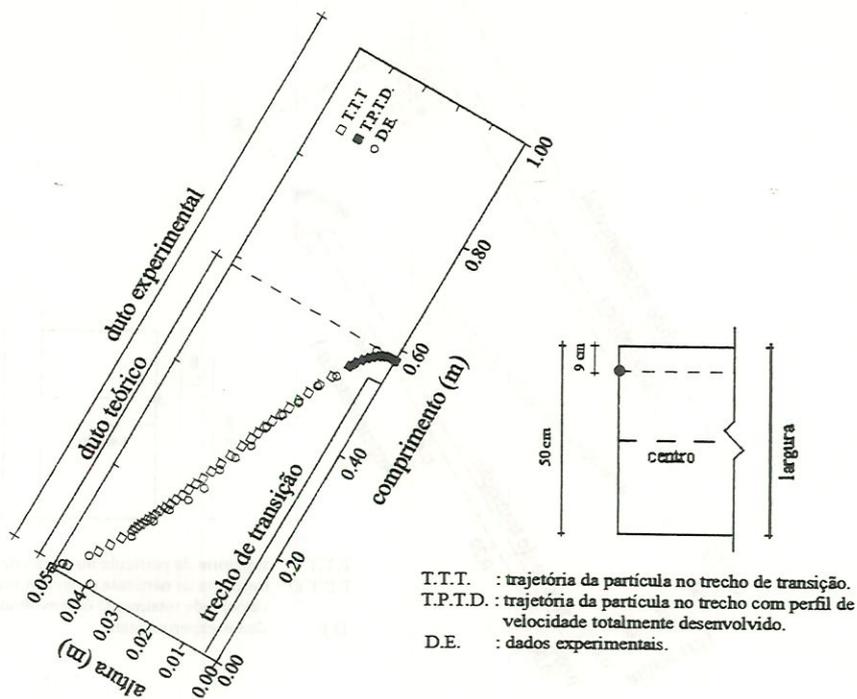


FIGURA E.27 - Trajetória da partícula 3 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,32 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

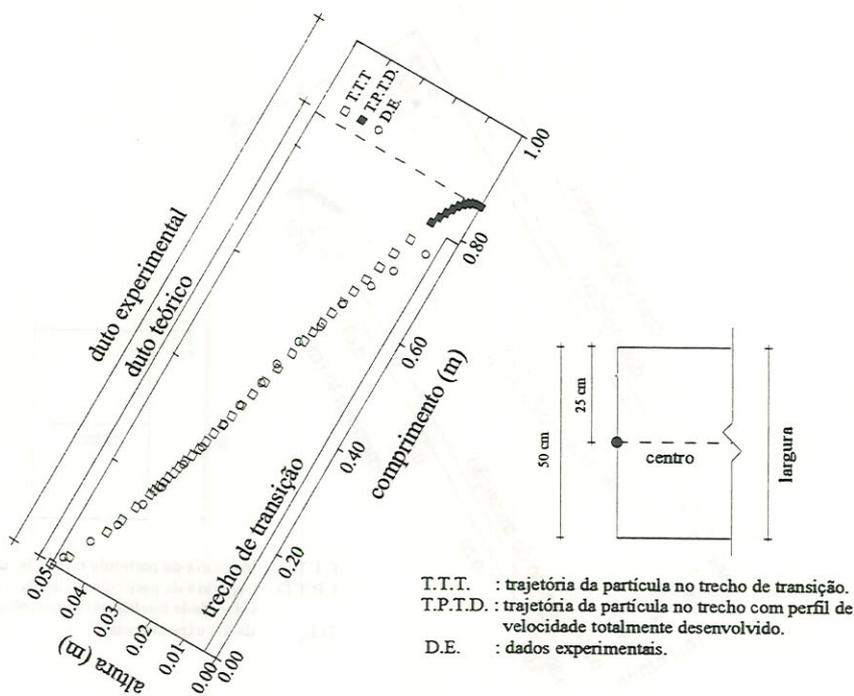


FIGURA E.28 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

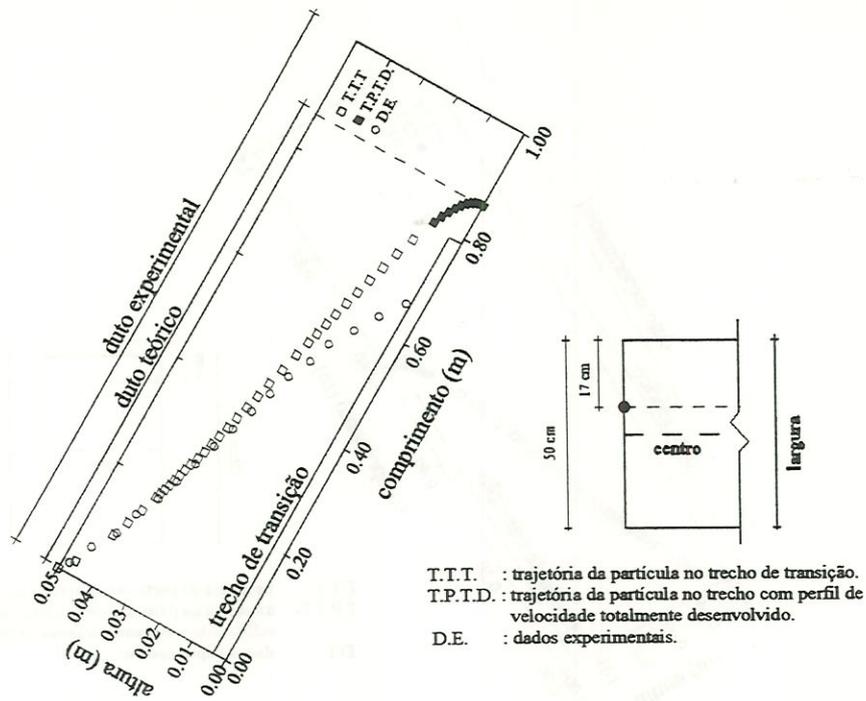


FIGURA E.29 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

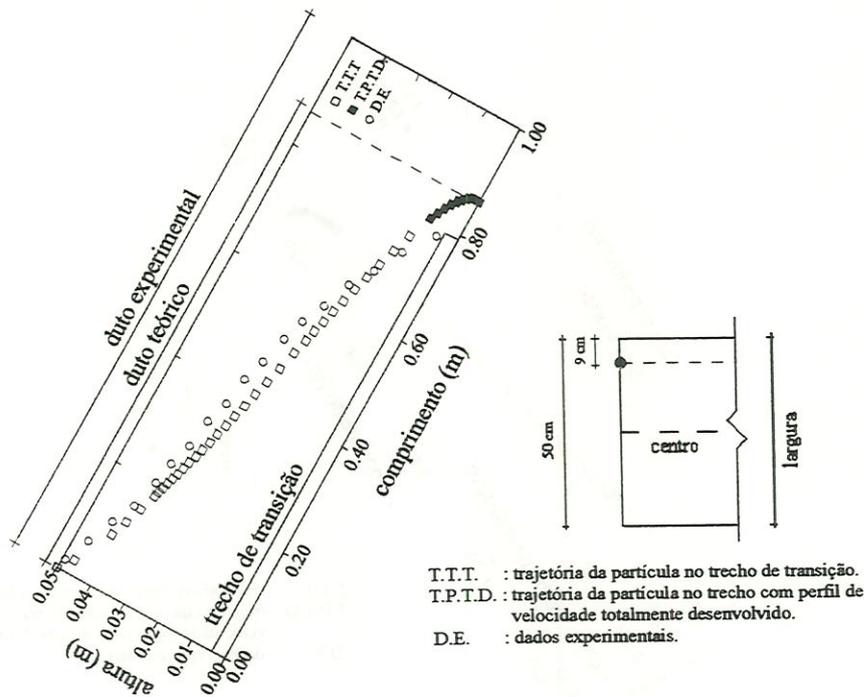


FIGURA E.30 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

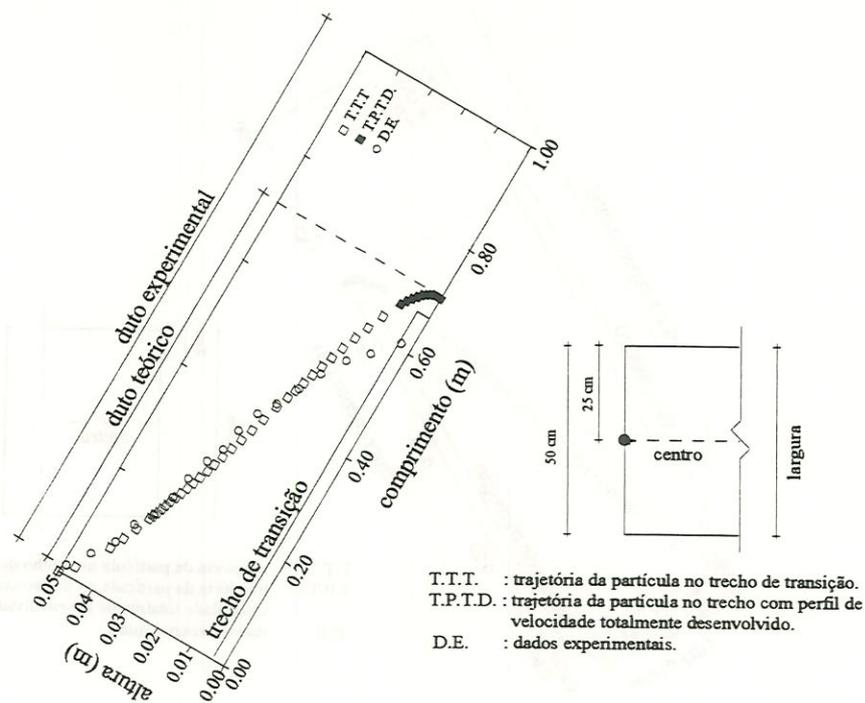


FIGURA E.31 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

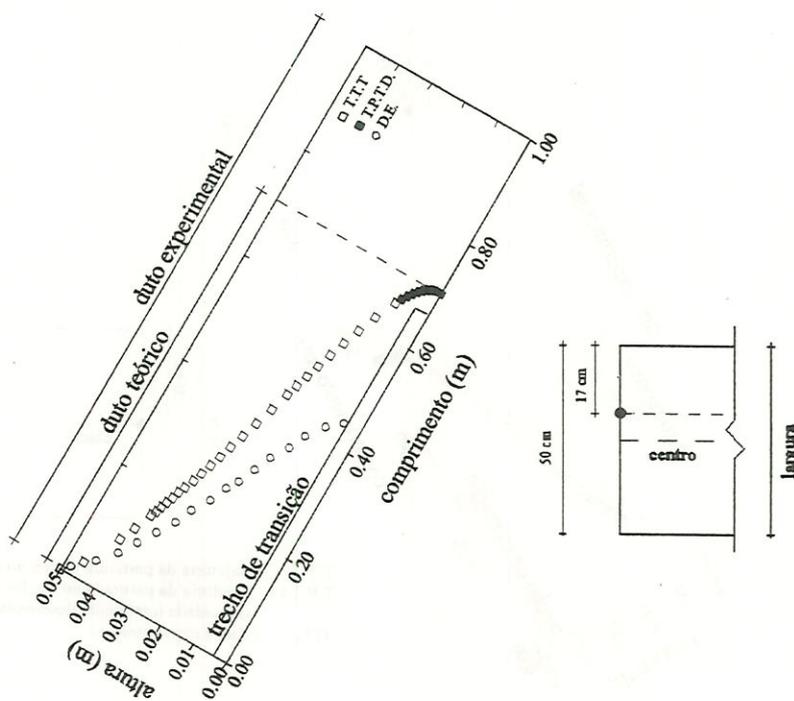


FIGURA E.32 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

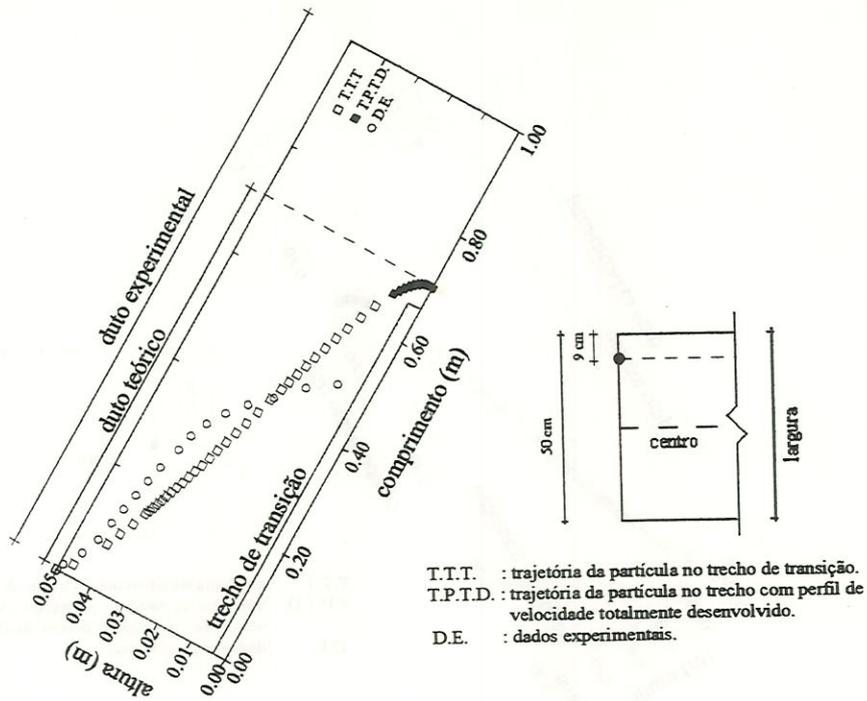


FIGURA E.33 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

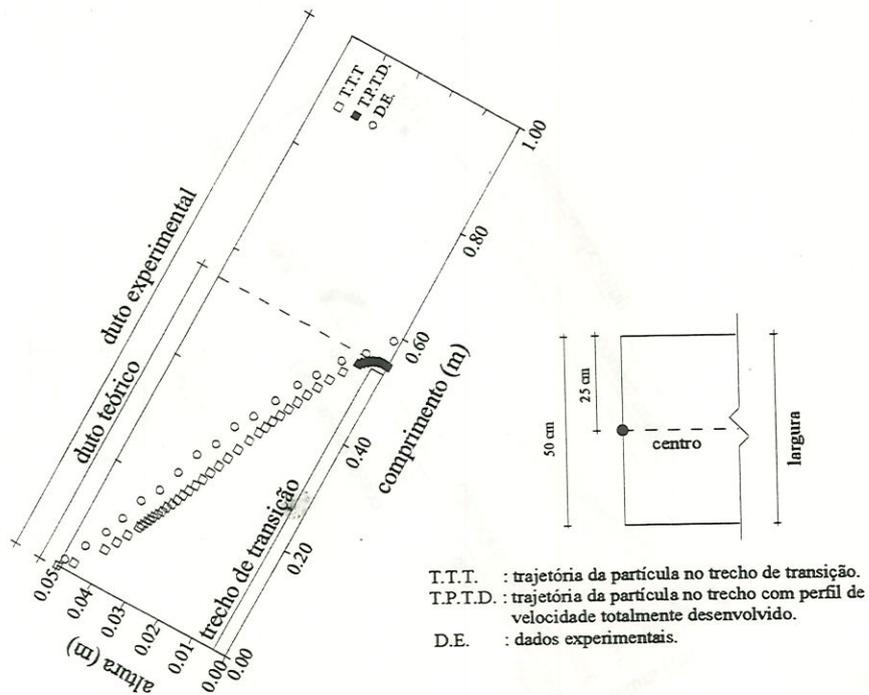


FIGURA E.34 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

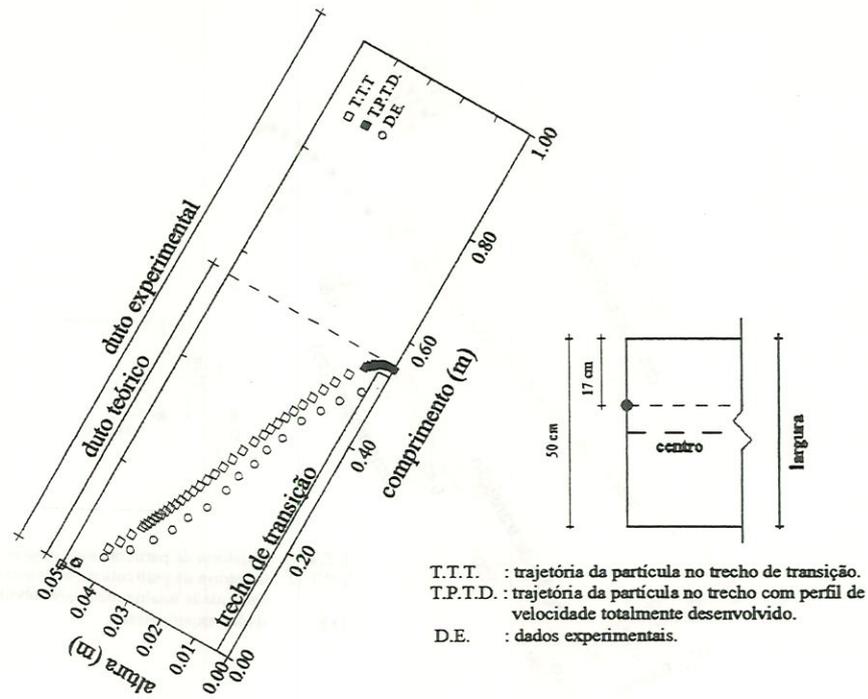


FIGURA E.35 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

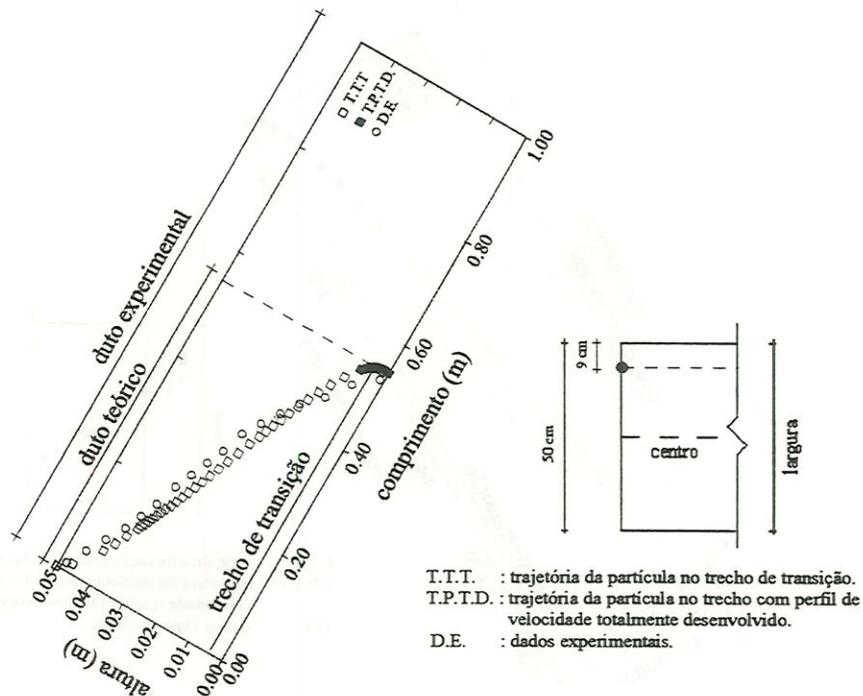


FIGURA E.36 - Trajetória da partícula 4 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,50 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

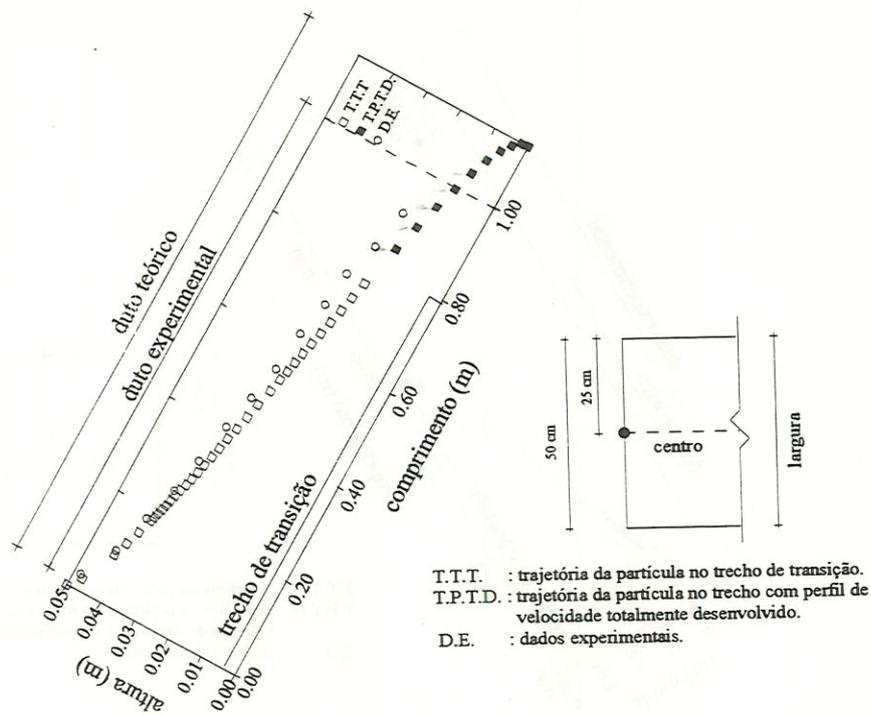


FIGURA E.37 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

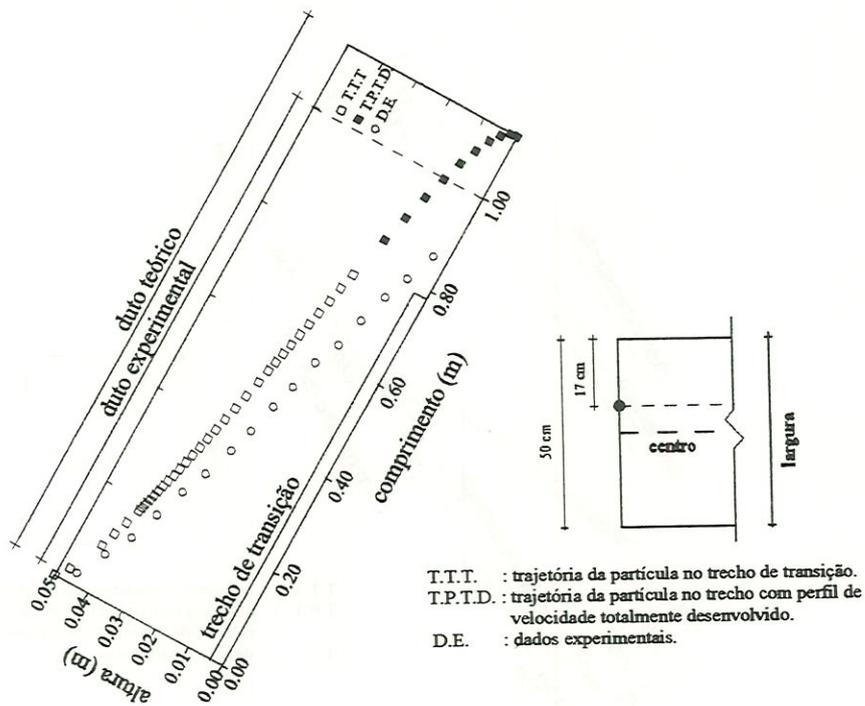


FIGURA E.38 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

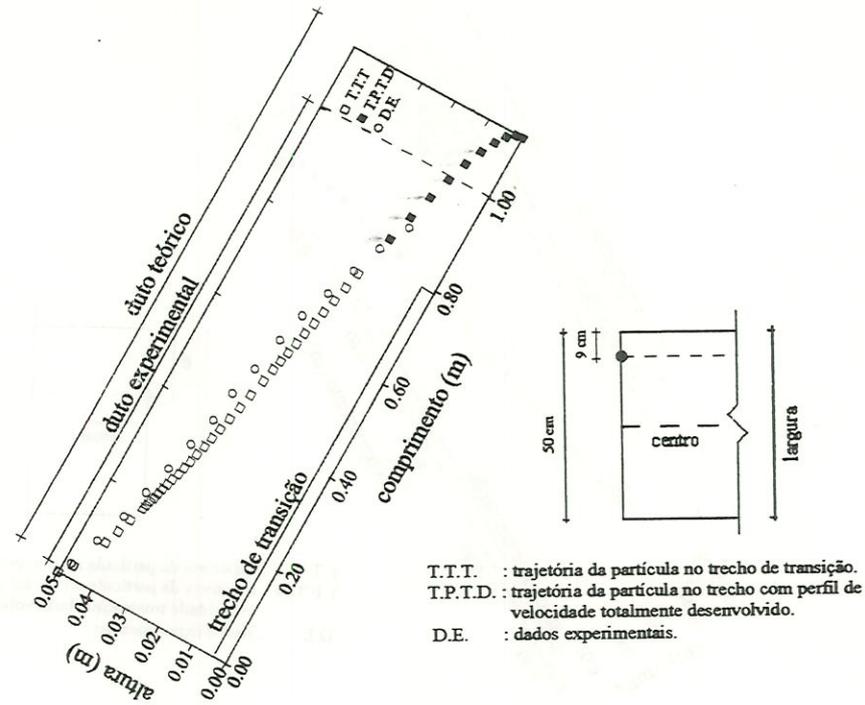


FIGURA E.39 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

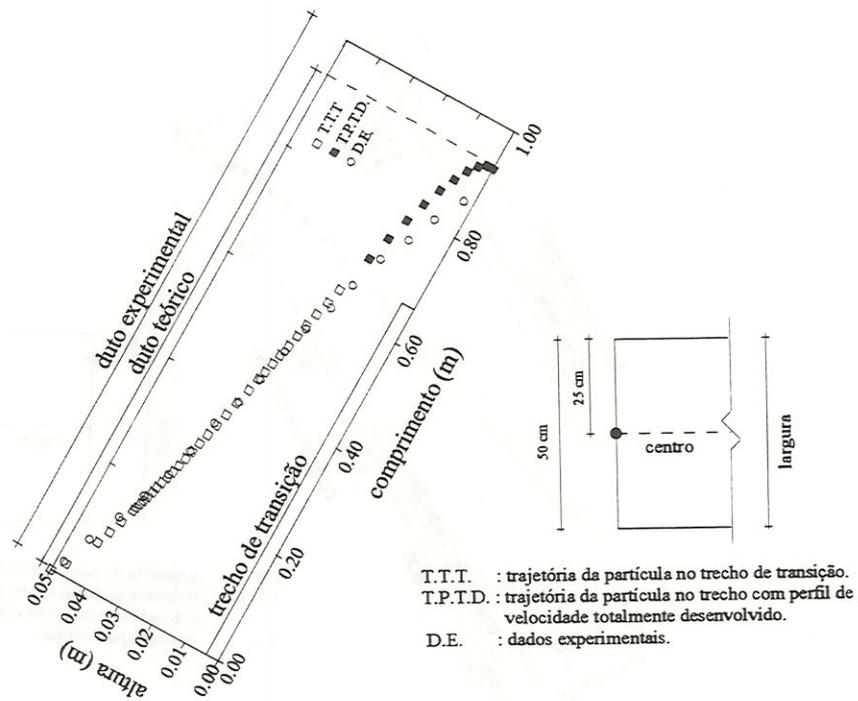


FIGURA E.40 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

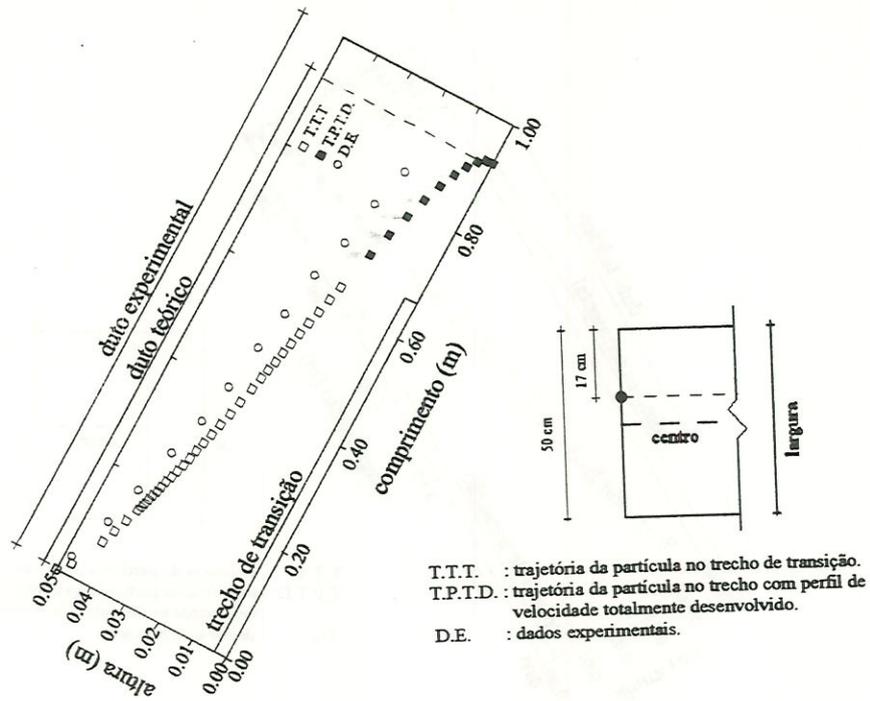


FIGURA E.41 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

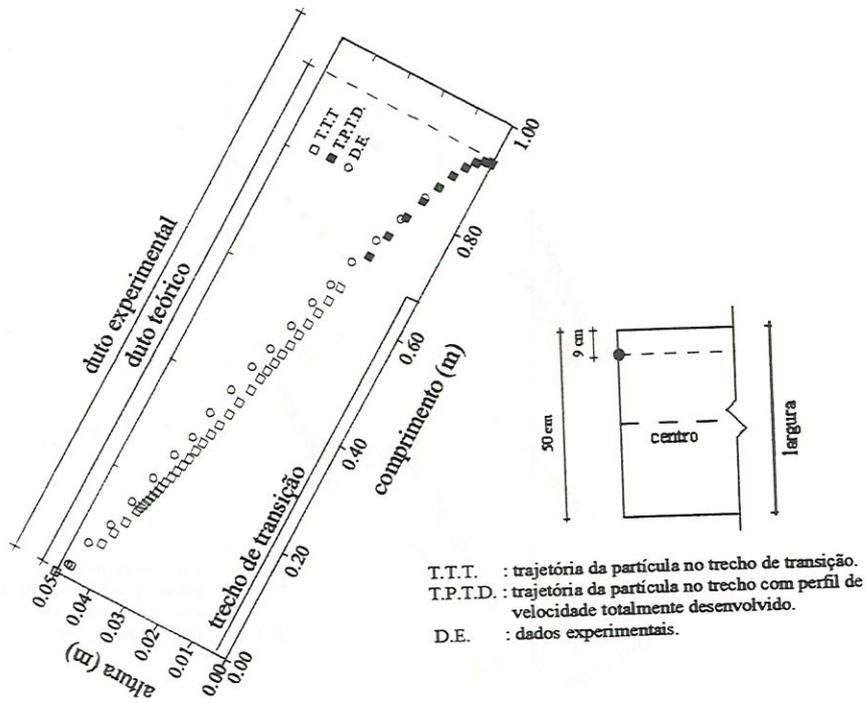


FIGURA E.42 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

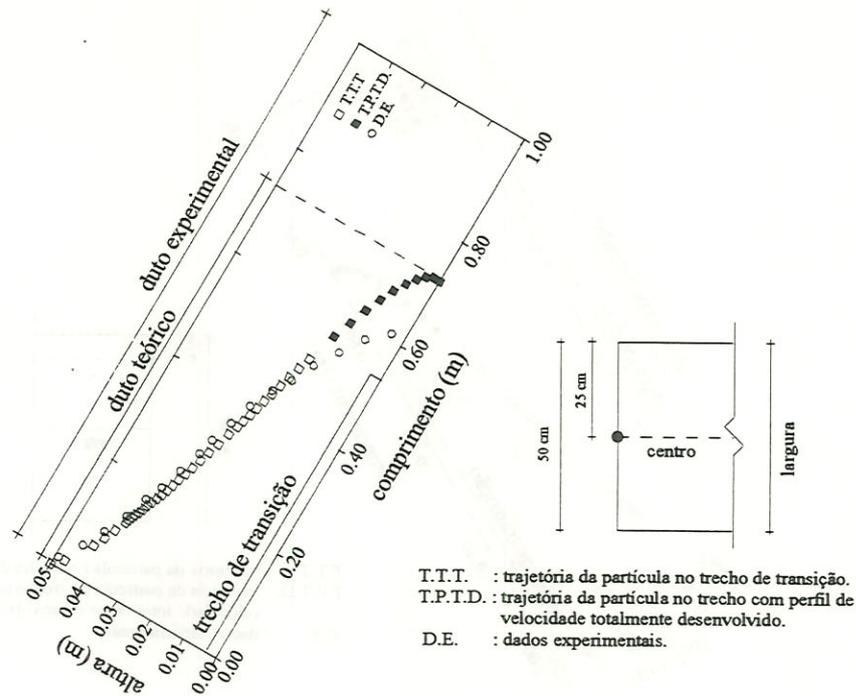


FIGURA E.43 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{cm} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

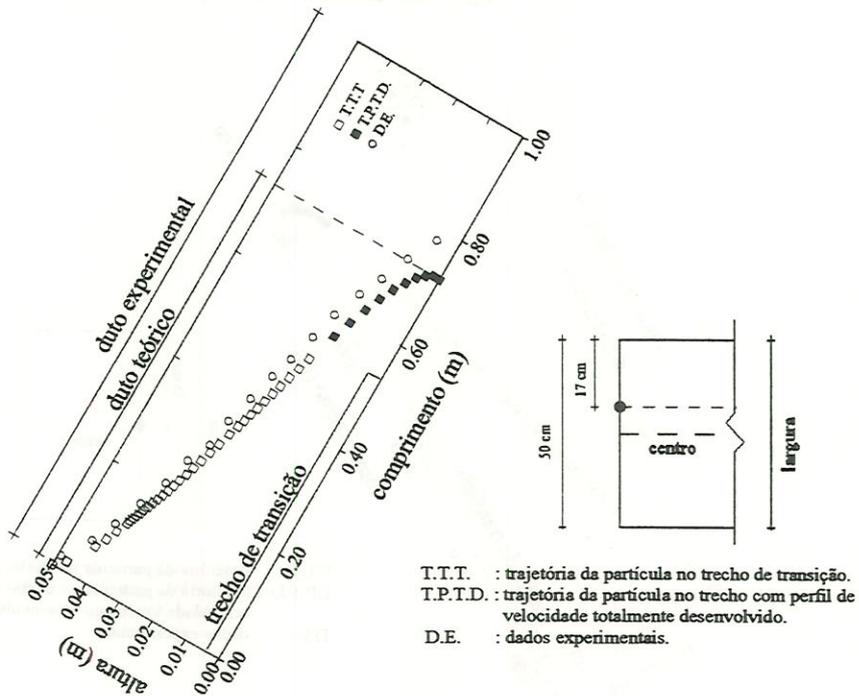


FIGURA E.44 - Trajetória da partícula 5 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{cm} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

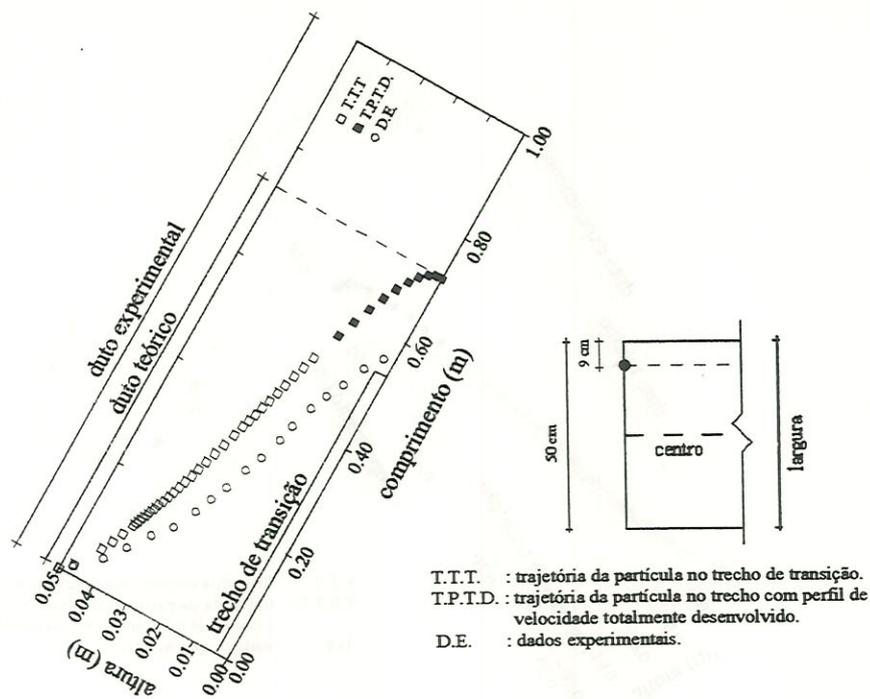


FIGURA E.45 - Trajetória da partícula 5

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 2,72 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

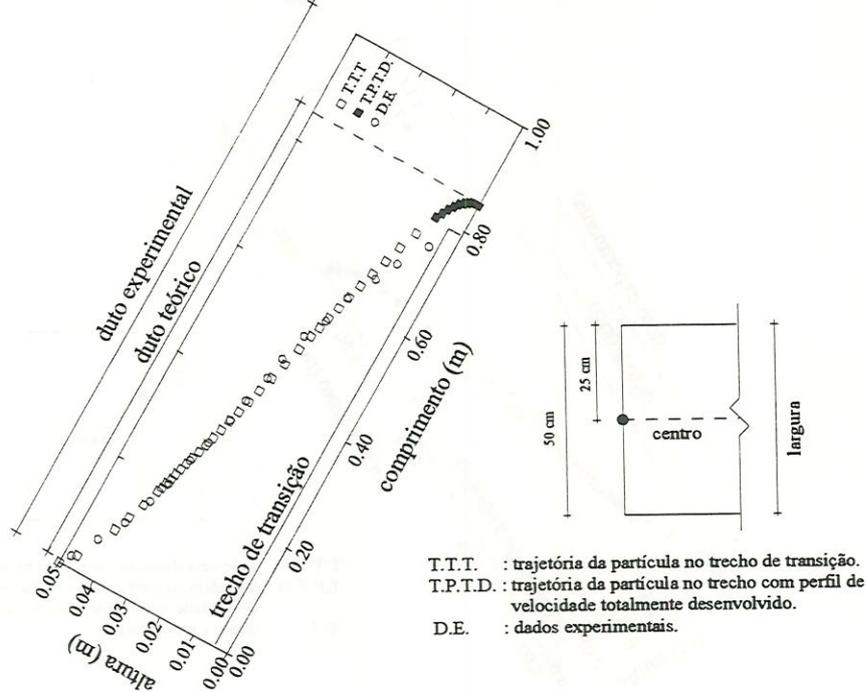


FIGURA E.46 - Trajetória da partícula 6

$a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$



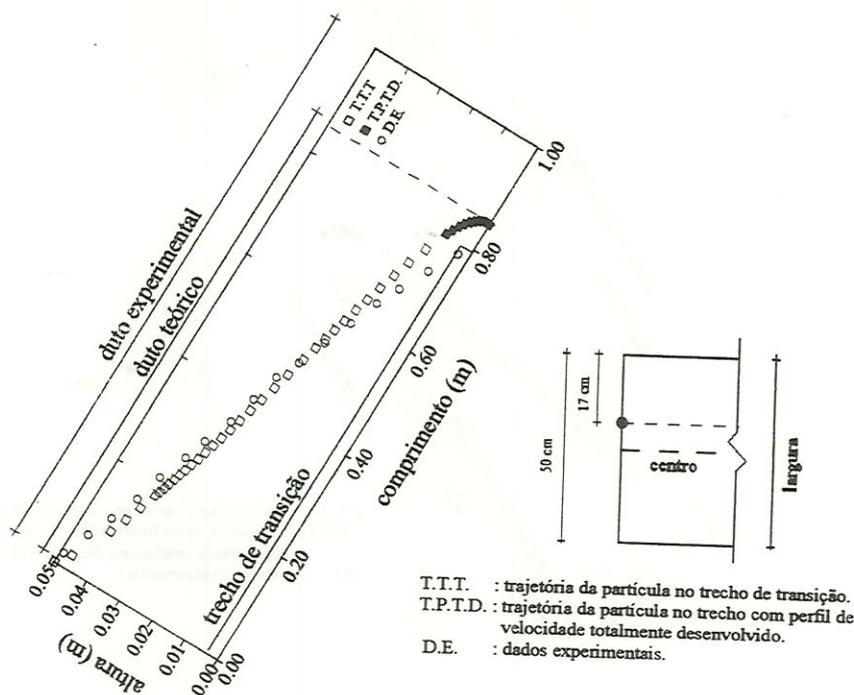


FIGURA E.47 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

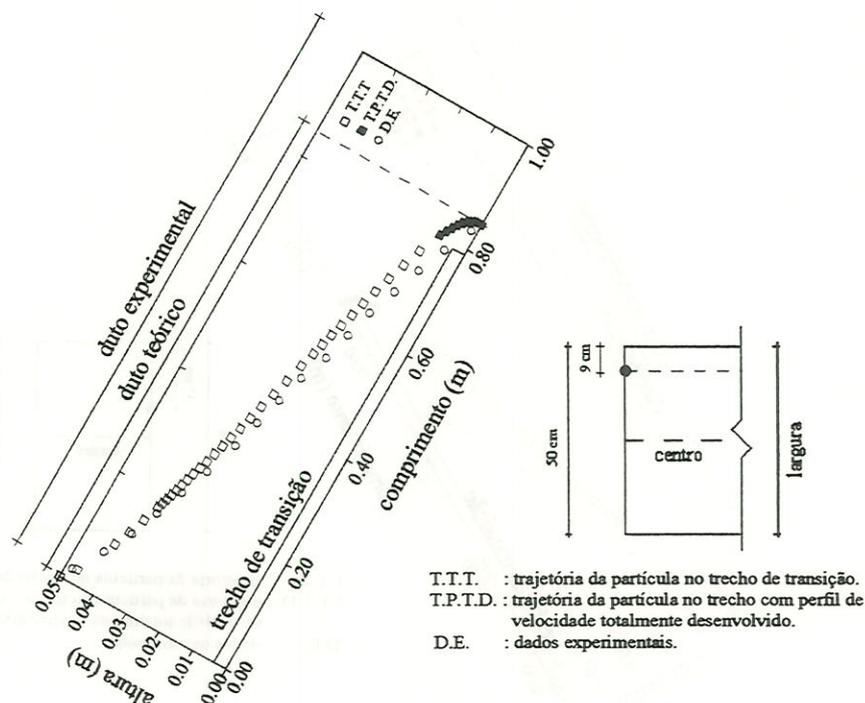


FIGURA E.48 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$



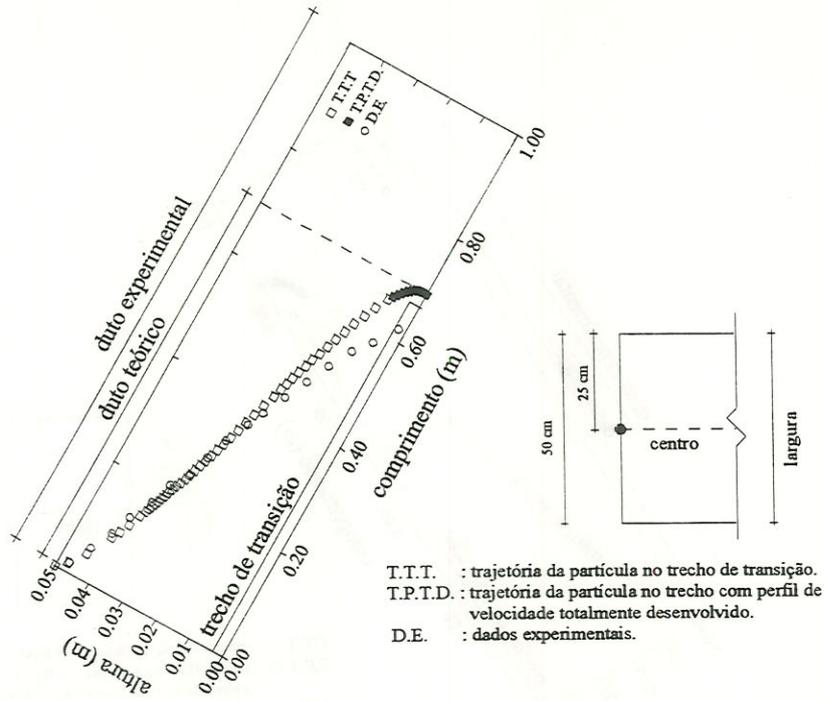


FIGURA E.49 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

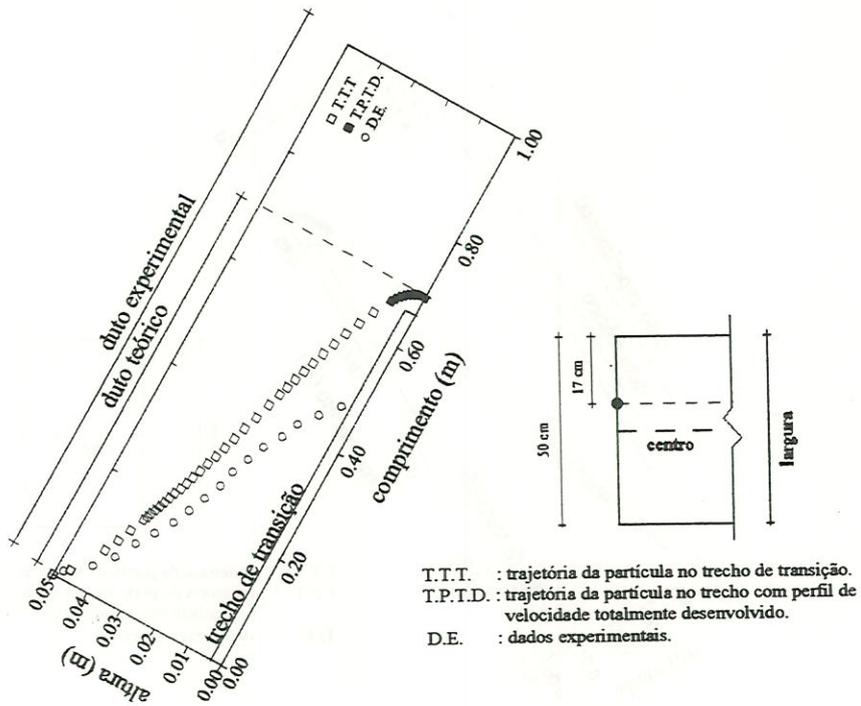


FIGURA E.50 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

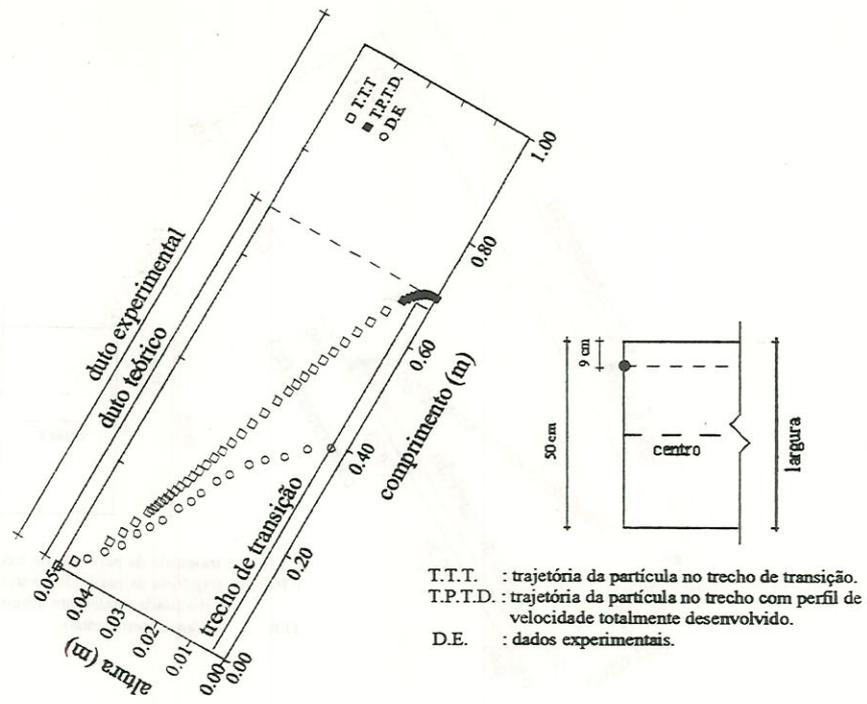


FIGURA E.51 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

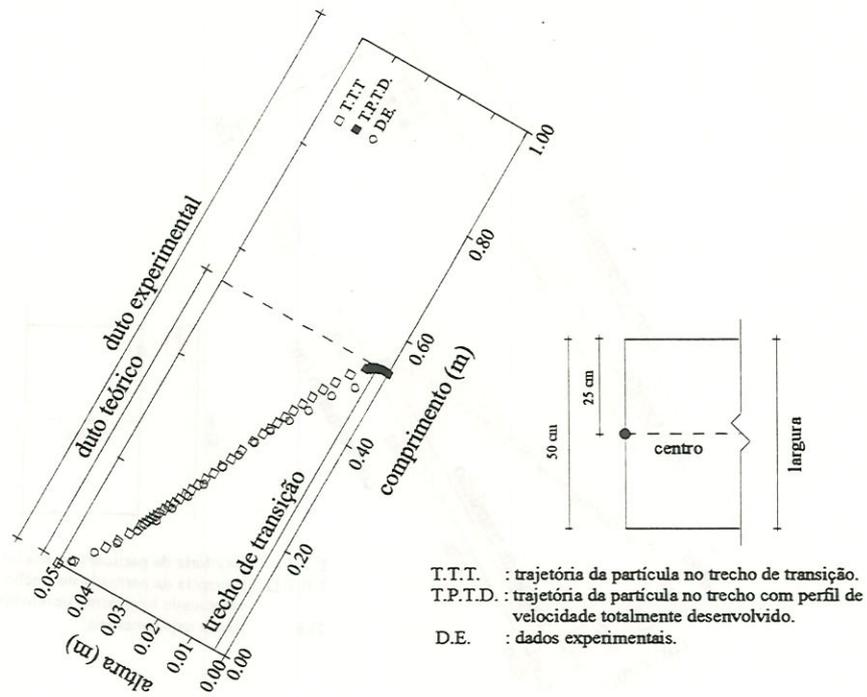


FIGURA E.52 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

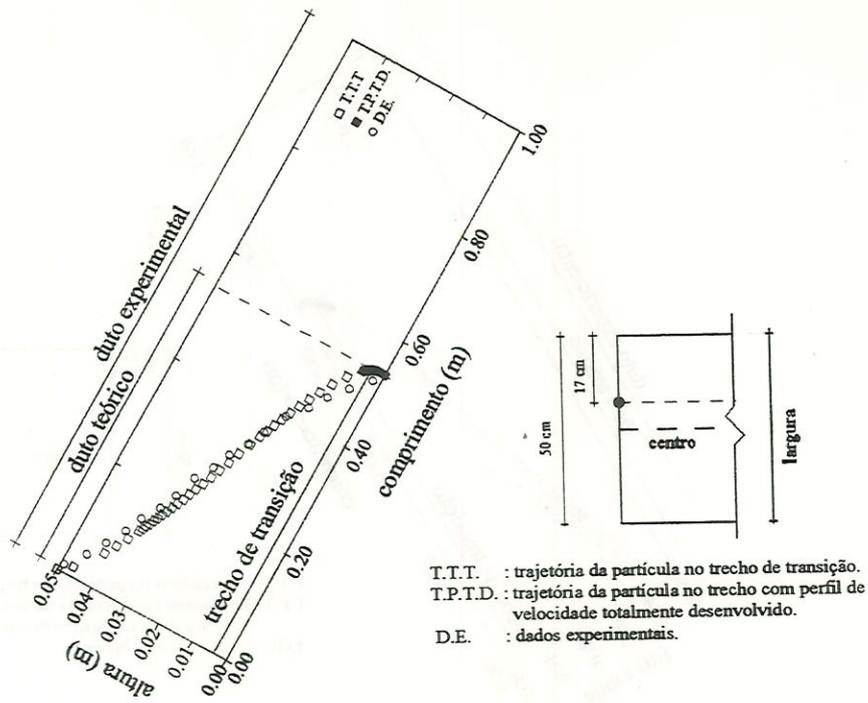


FIGURA E.53 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

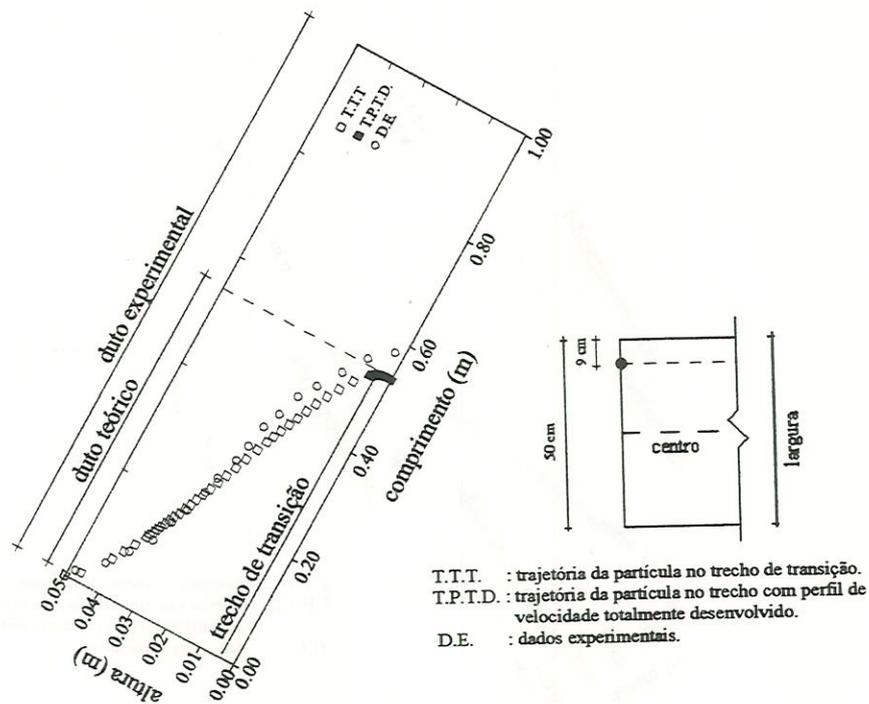


FIGURA E.54 - Trajetória da partícula 6 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,56 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

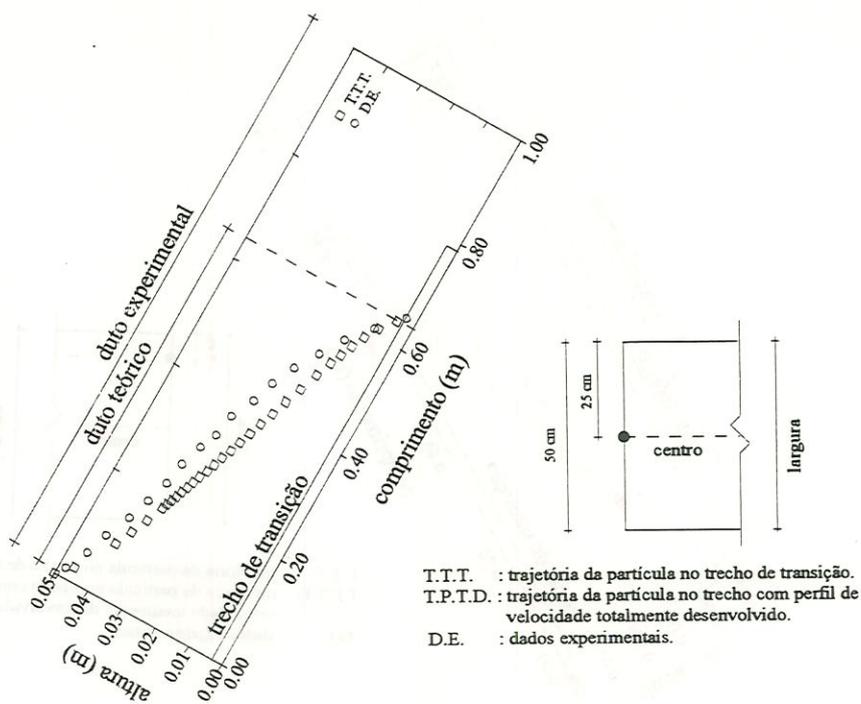


FIGURA E.55 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

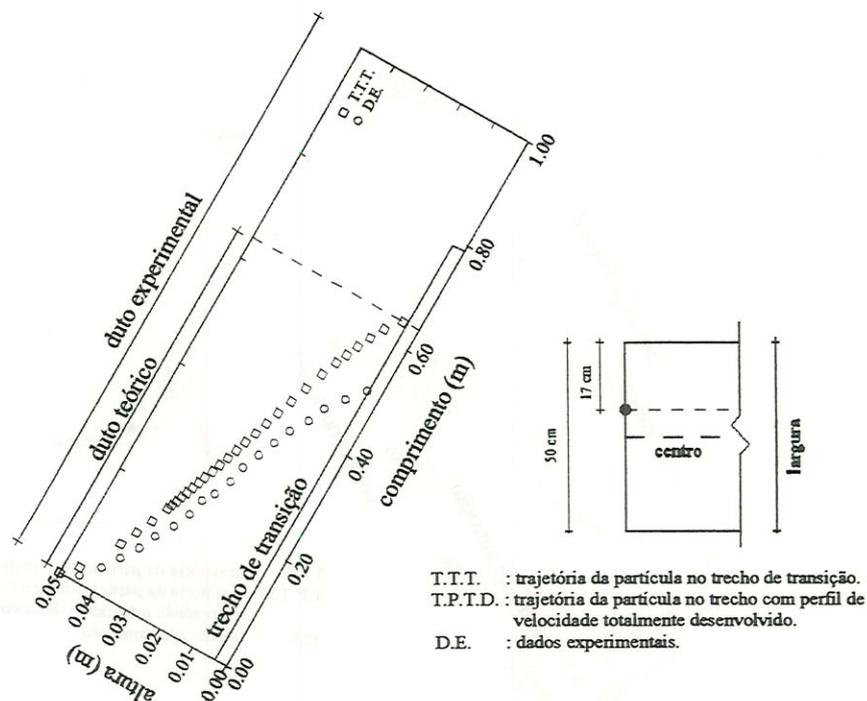


FIGURA E.56 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

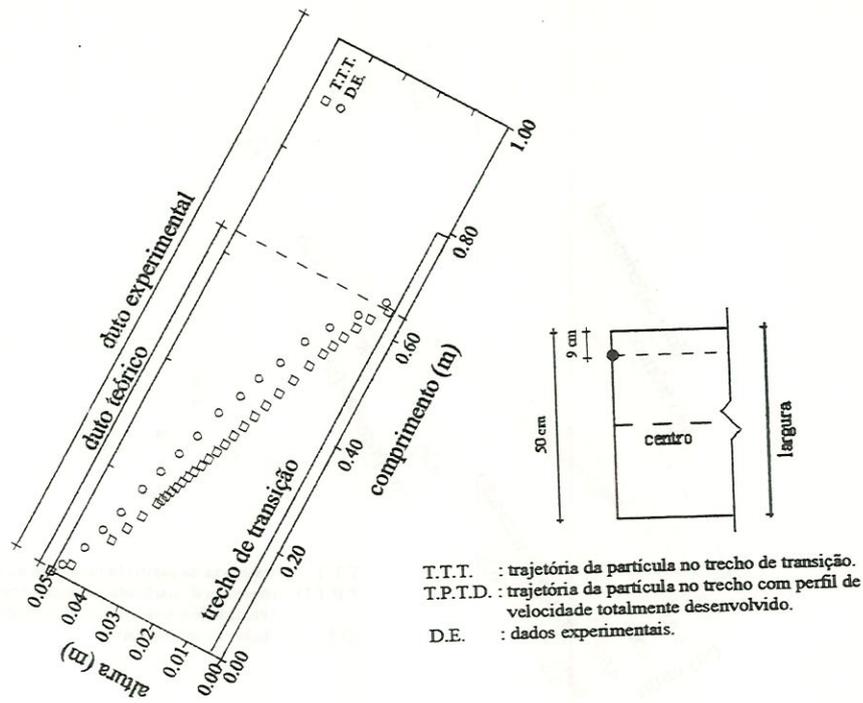


FIGURA E.57 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

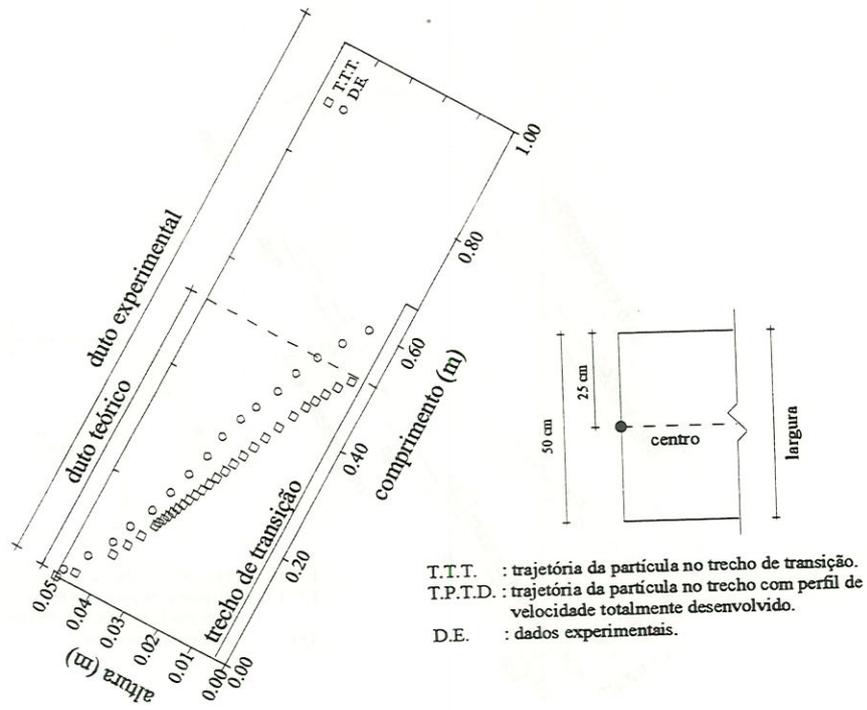


FIGURA E.58 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

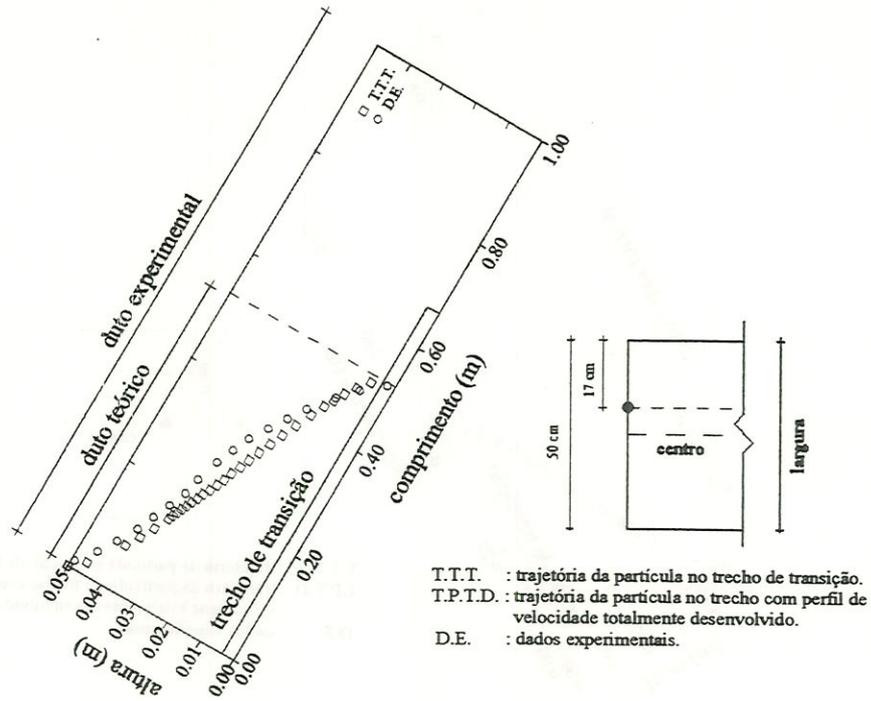


FIGURA E.59 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

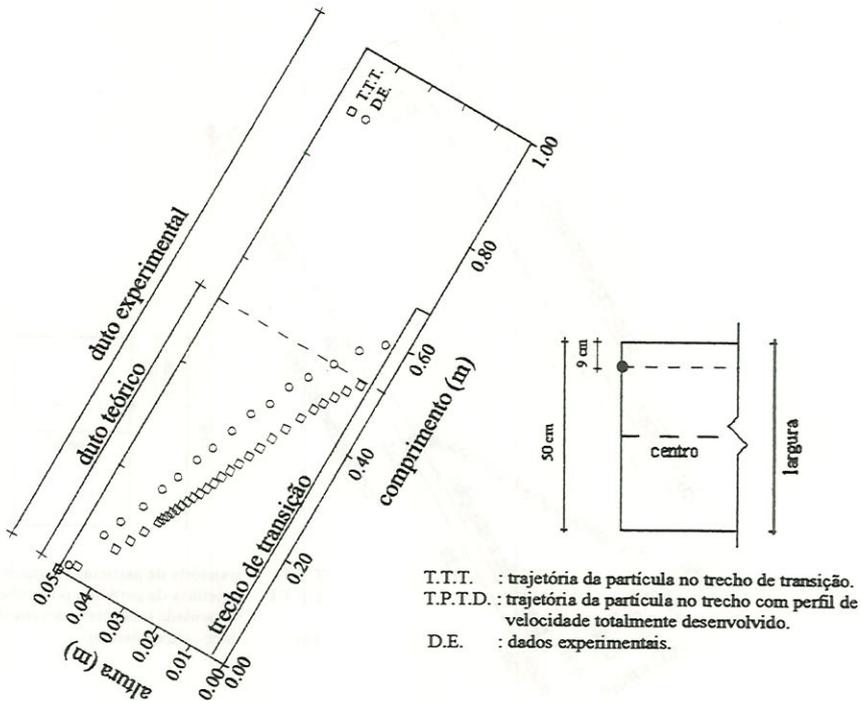


FIGURA E.60 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

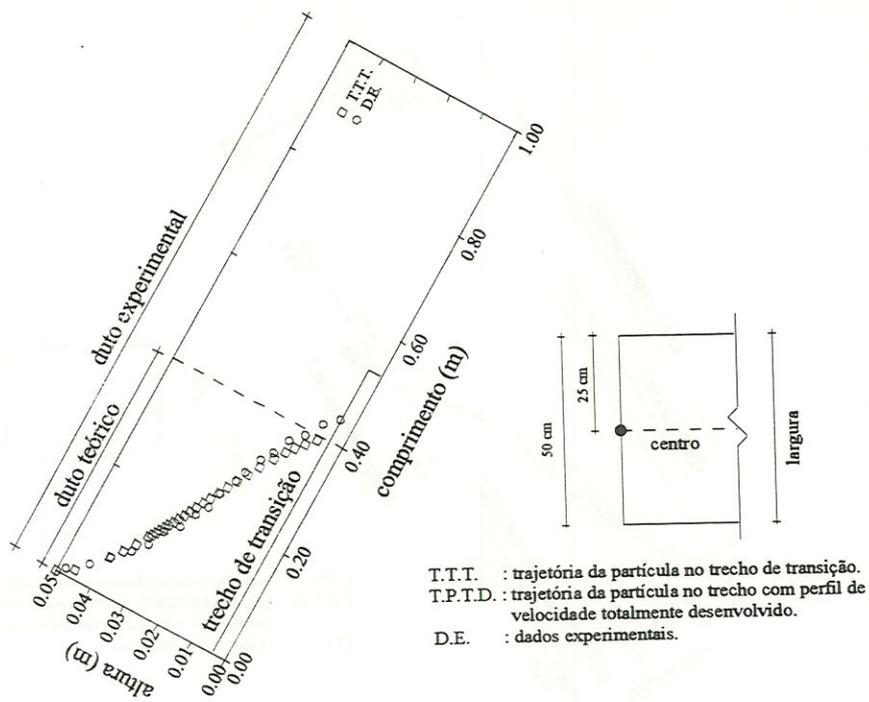


FIGURA E.61 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

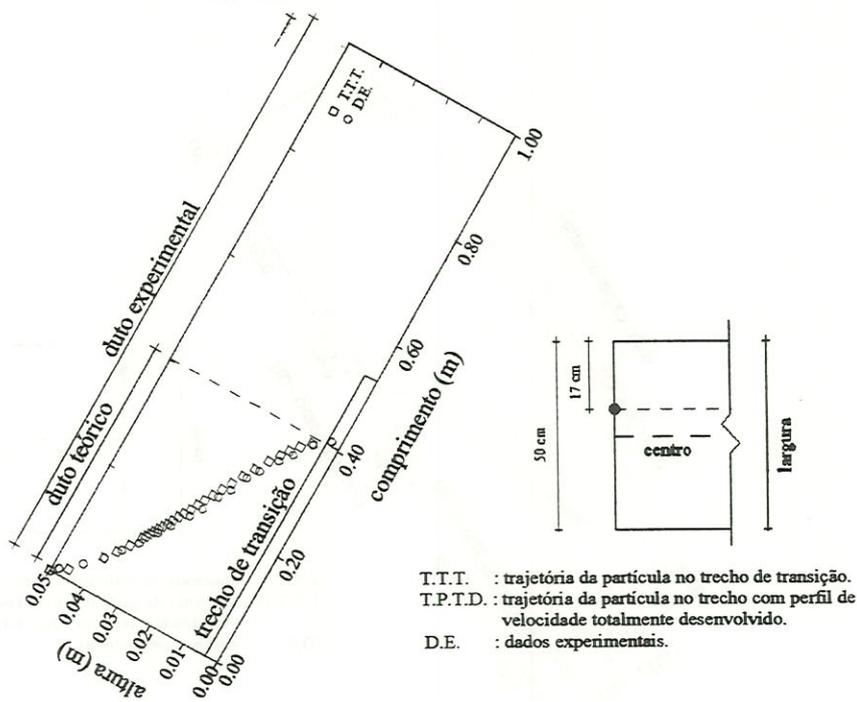


FIGURA E.62 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

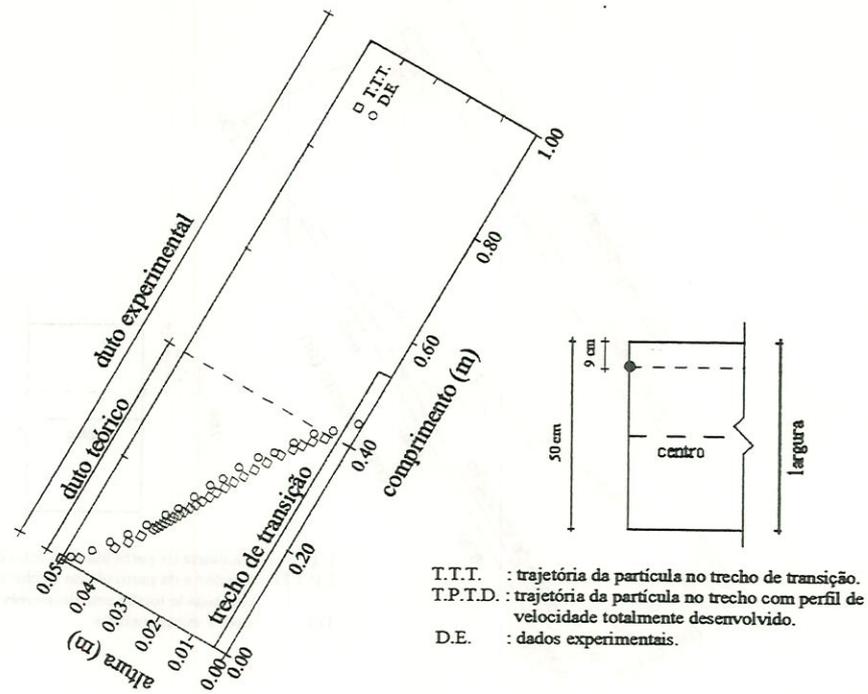


FIGURA E.63 - Trajetória da partícula 7 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,52 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

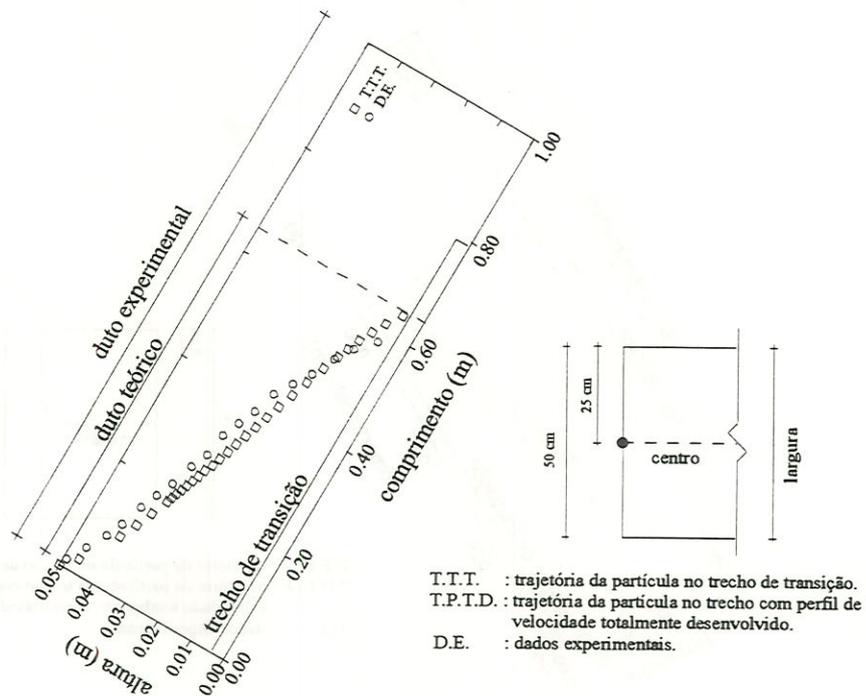


FIGURA E.64 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

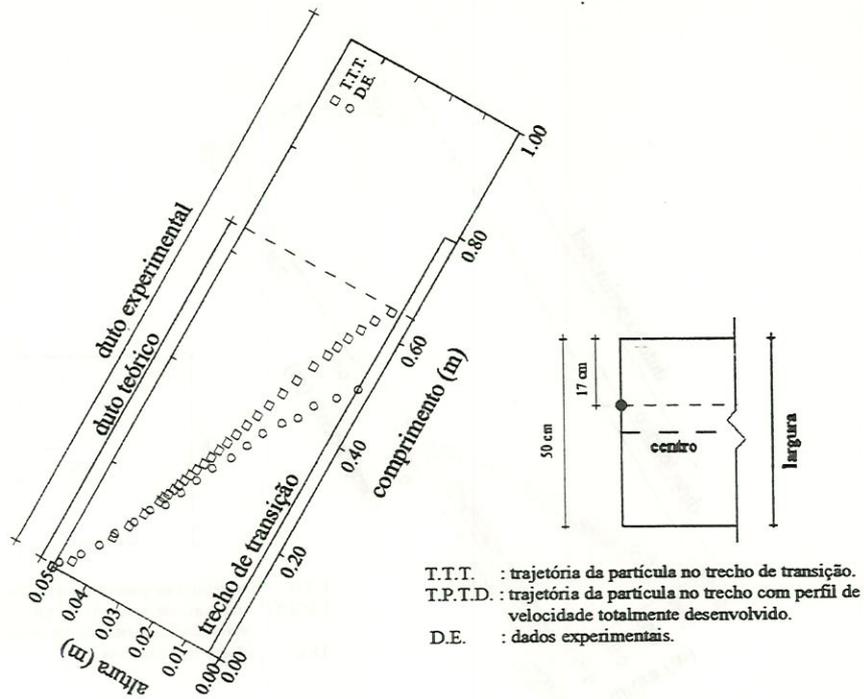


FIGURA E.65 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

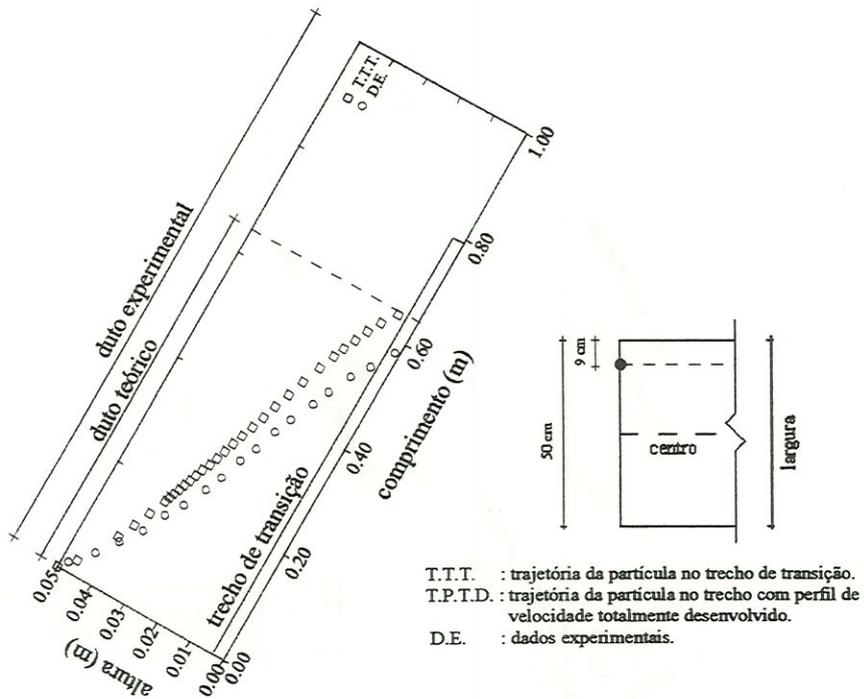


FIGURA E.66 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

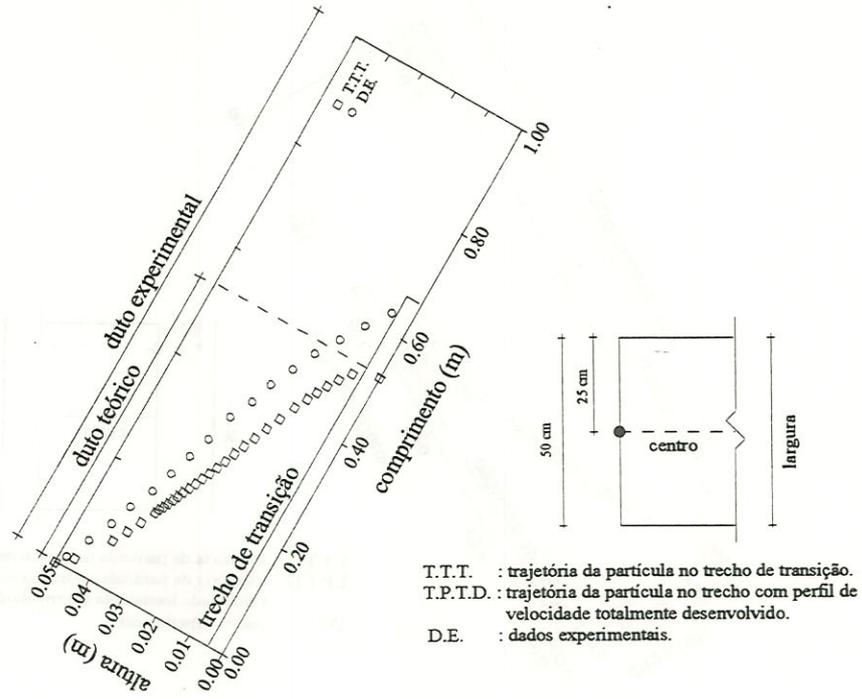


FIGURA E.67 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

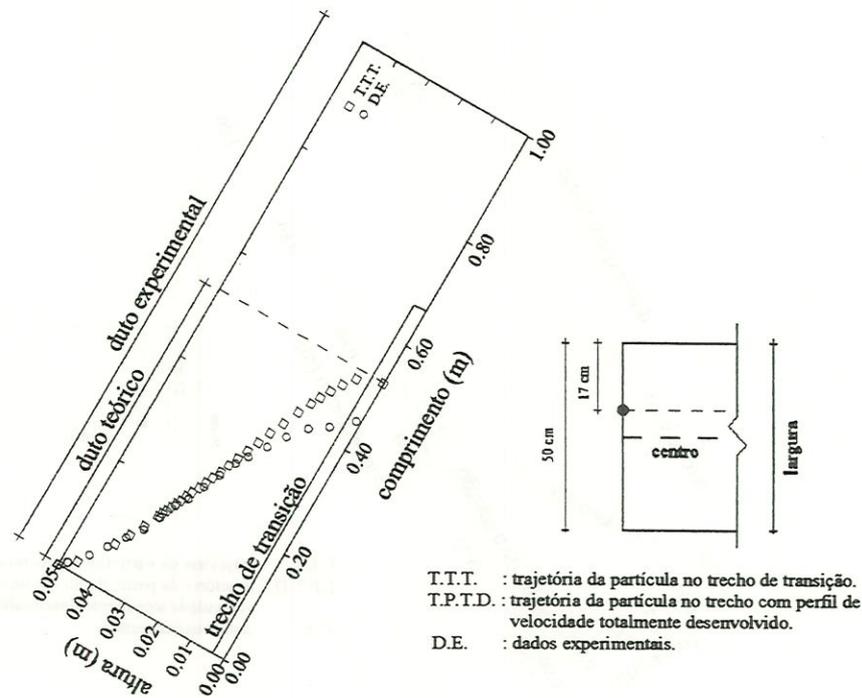


FIGURA E.68 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

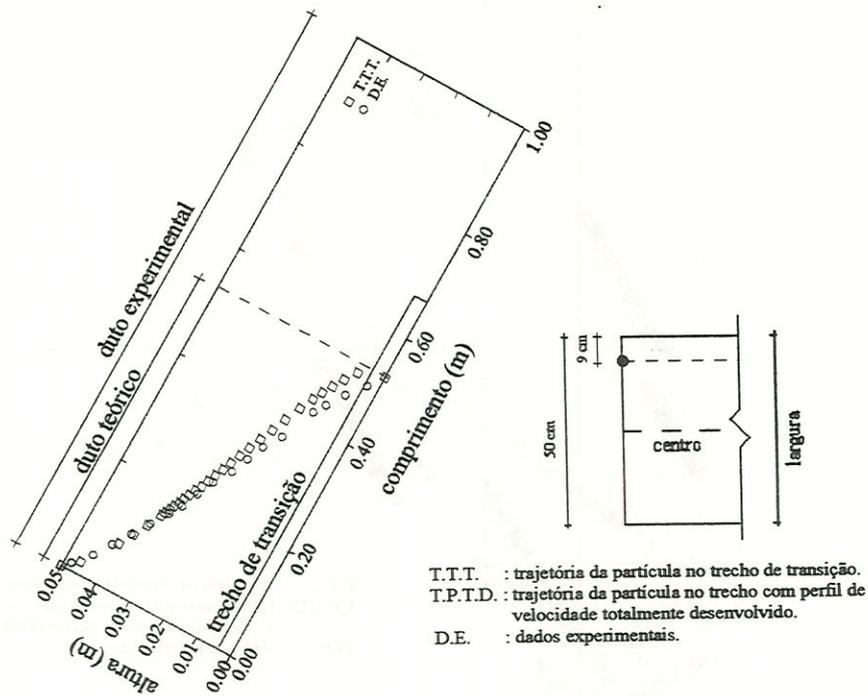


FIGURA E.69 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05$ m $b = 0,5$ m $D_c = 0,091$ m $l_r = 0,66$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 4,48$ cm/min $Re = 376,46$

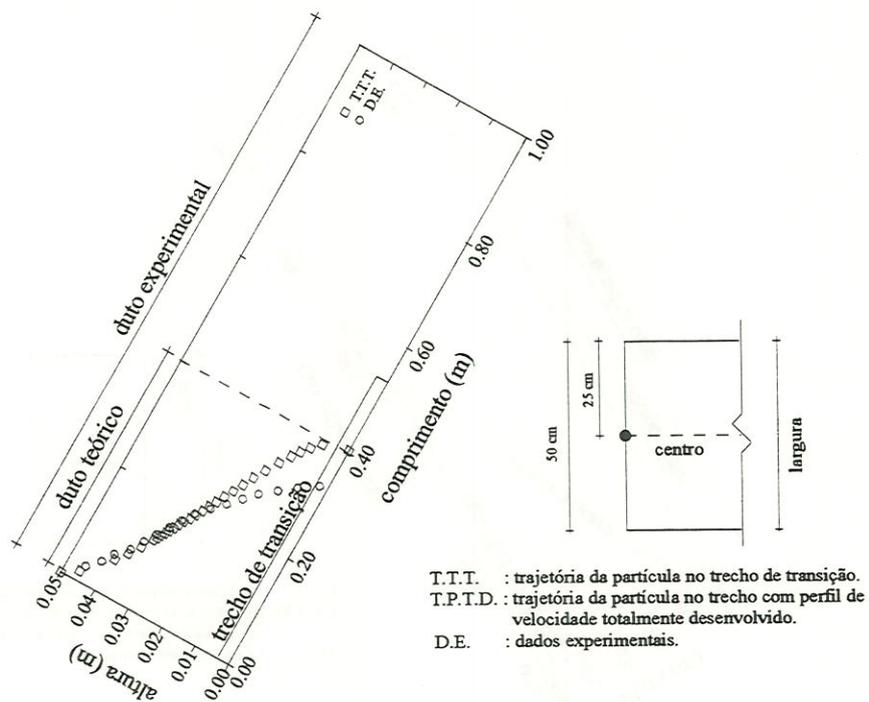


FIGURA E.70 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05$ m $b = 0,5$ m $D_c = 0,091$ m $l_r = 0,53$ m
 $V_{em} = 20$ cm/min $V_s = 4,48$ cm/min $Re = 300,62$

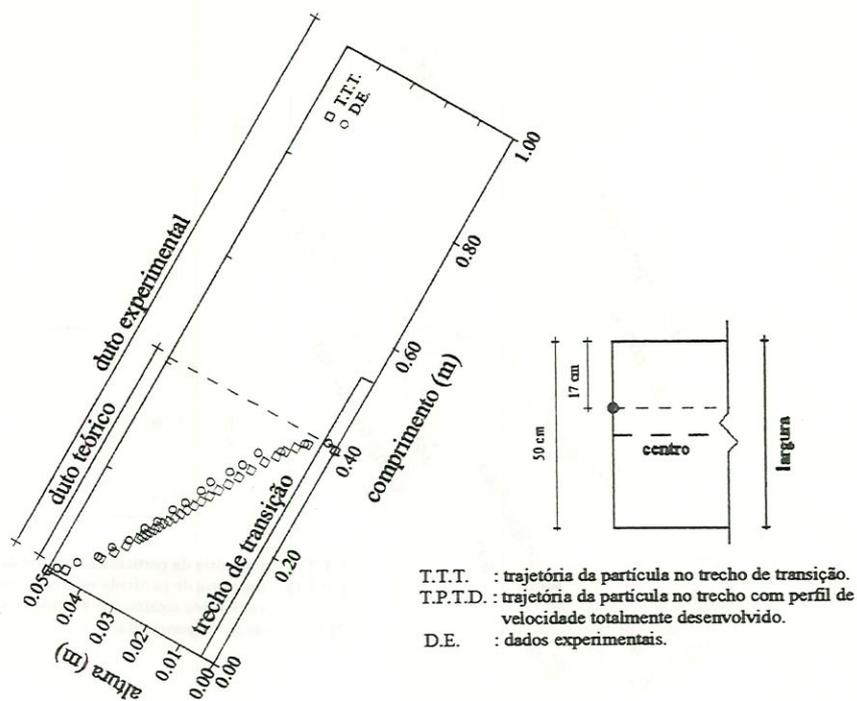


FIGURA E.71 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

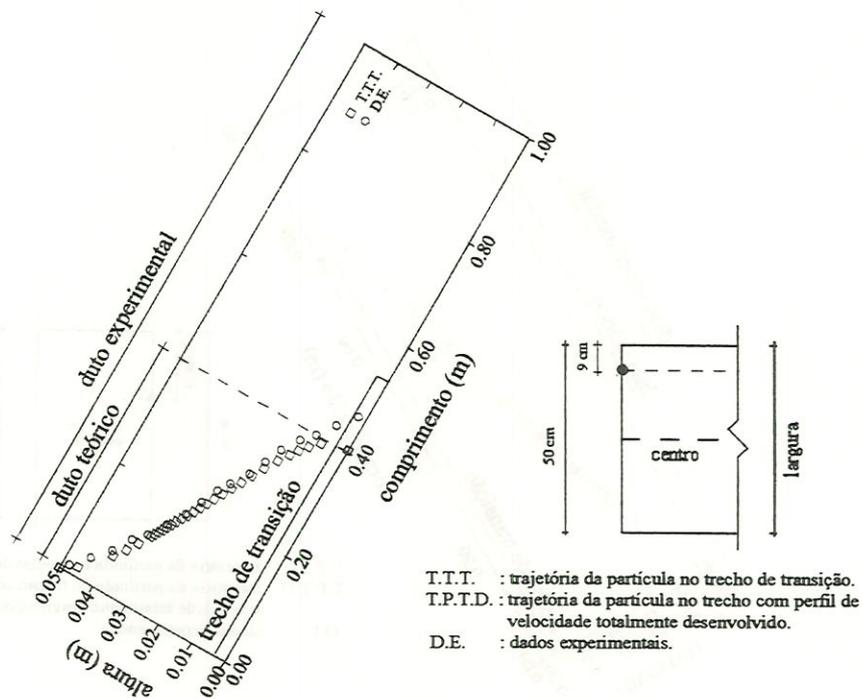


FIGURA E.72 - Trajetória da partícula 8 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 4,48 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

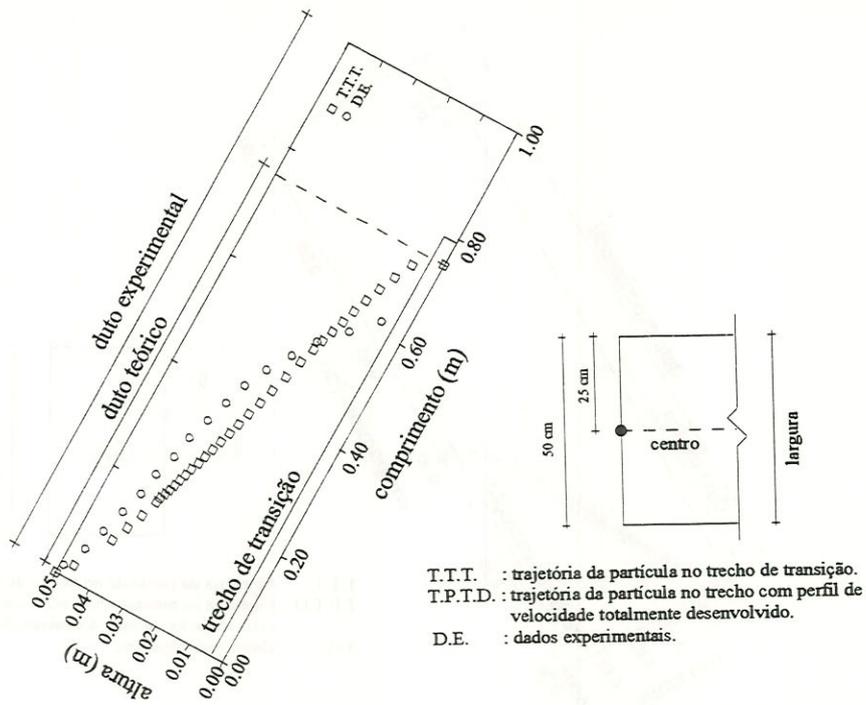


FIGURA E.73 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

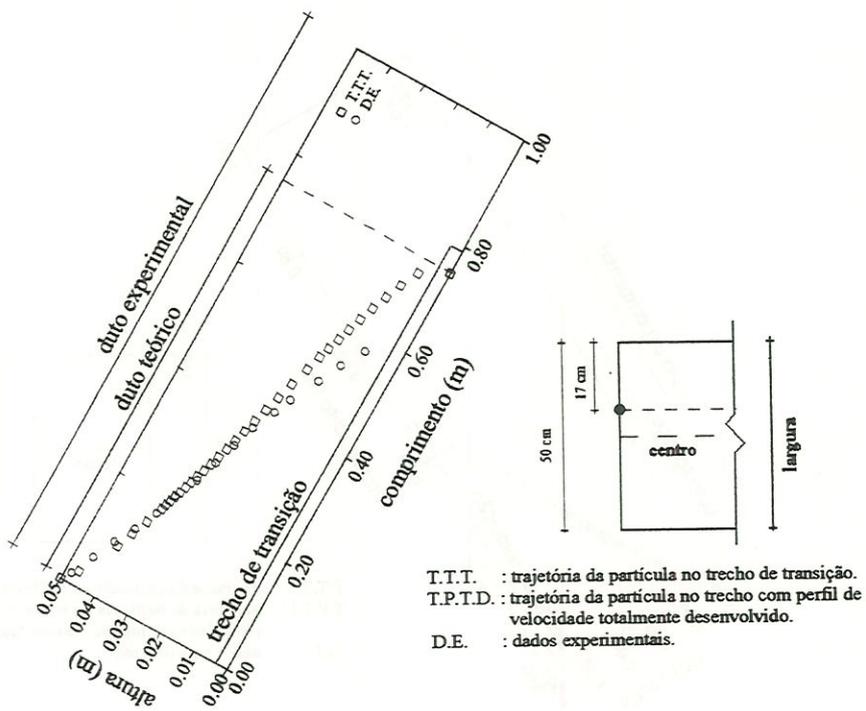


FIGURA E.74 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,79 \text{ m}$
 $V_{em} = 30 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 451,38$

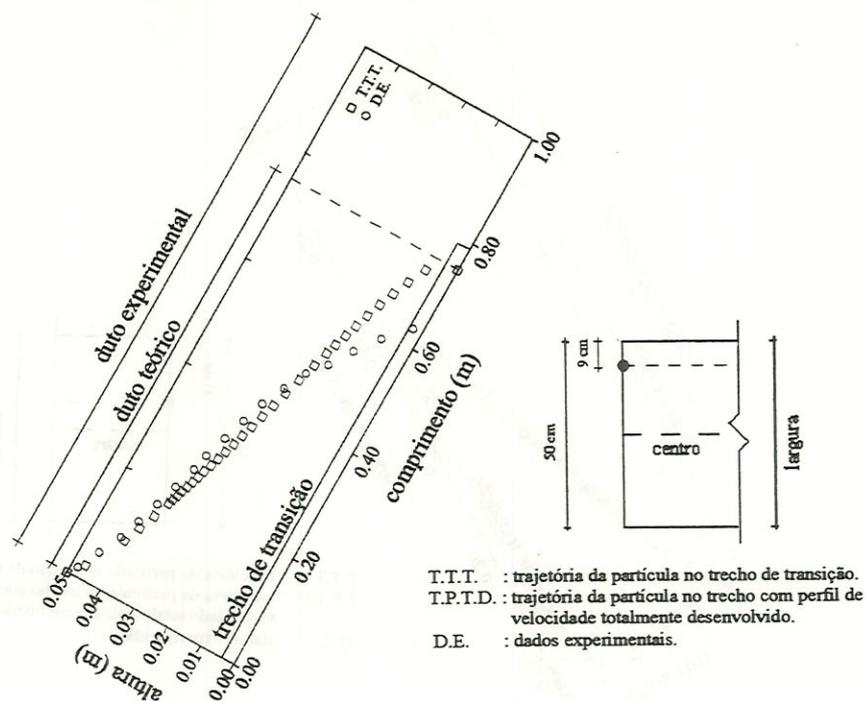


FIGURA E.75 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05$ m $b = 0,5$ m $D_c = 0,091$ m $l_r = 0,79$ m
 $V_{em} = 30$ cm/min $V_s = 3,93$ cm/min $Re = 451,38$

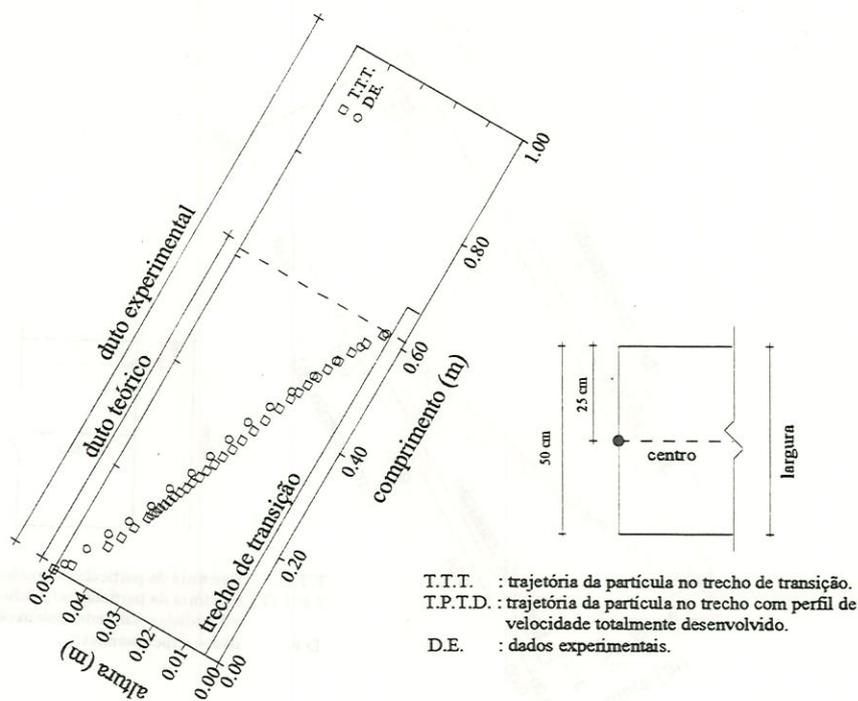


FIGURA E.76 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05$ m $b = 0,5$ m $D_c = 0,091$ m $l_r = 0,66$ m
 $V_{em} = 25$ cm/min $V_s = 3,93$ cm/min $Re = 376,46$

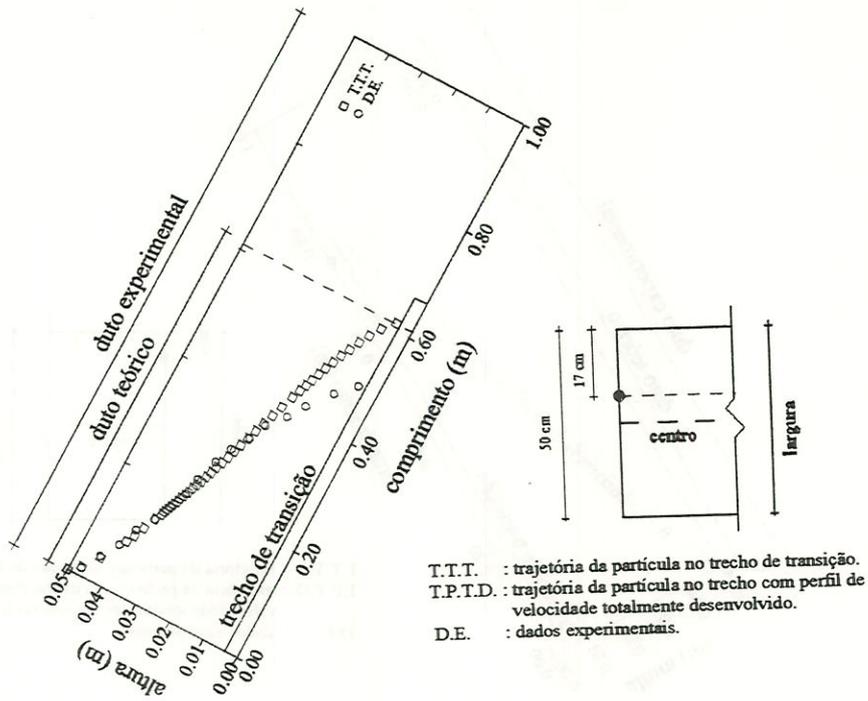


FIGURA E.77 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

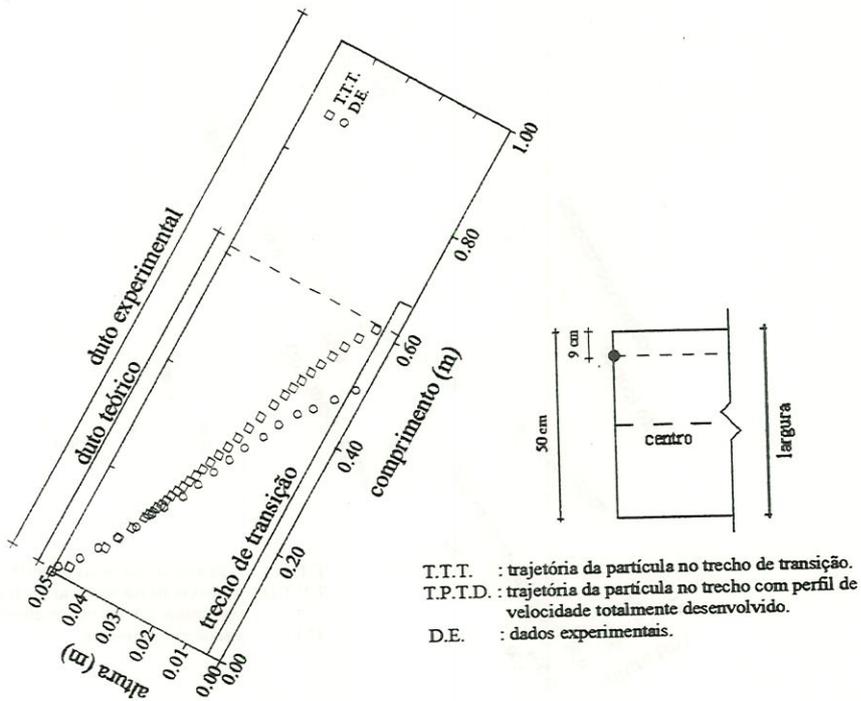


FIGURA E.78 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,66 \text{ m}$
 $V_{em} = 25 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 376,46$

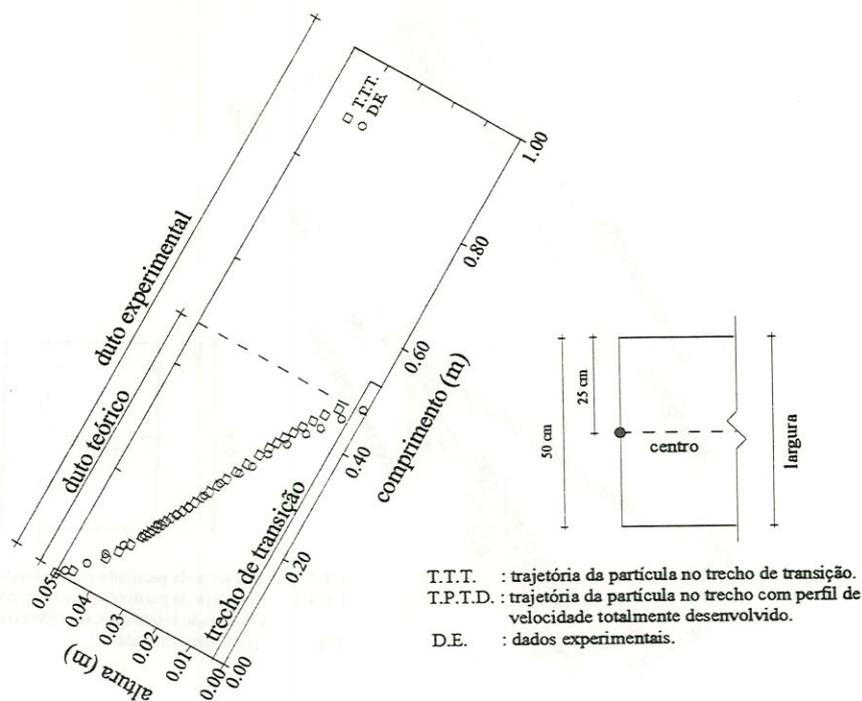


FIGURA E.79 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

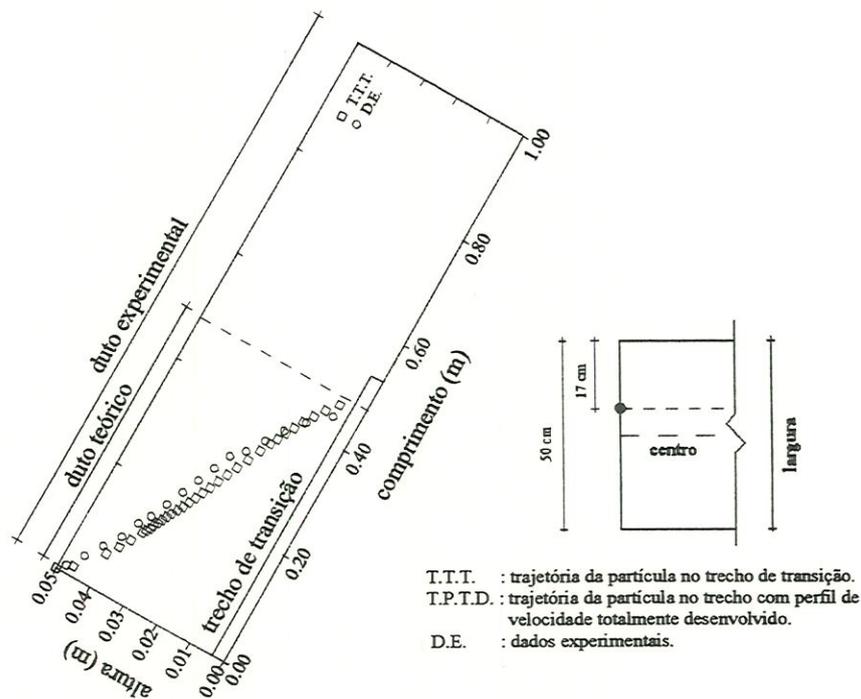


FIGURA E.80 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

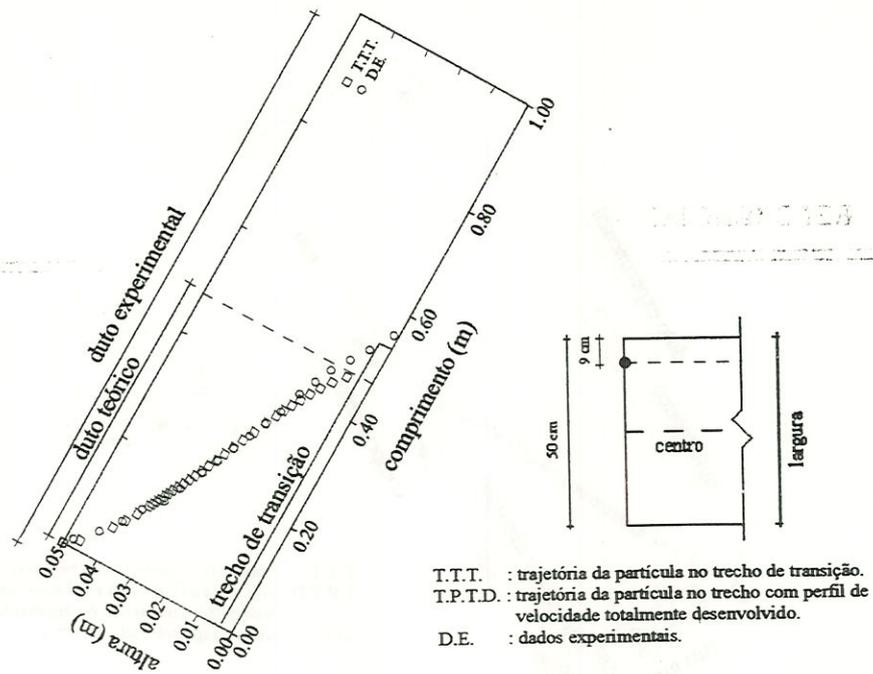


FIGURA E.81 - Trajetória da partícula 9 $a = 0,05 \text{ m}$ $b = 0,5 \text{ m}$ $D_c = 0,091 \text{ m}$ $l_r = 0,53 \text{ m}$
 $V_{em} = 20 \text{ cm/min}$ $V_s = 3,93 \text{ cm/min}$ $Re = 300,62$

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMP, T.R. (1946). Sedimentation and design of settling tanks *ASCE -Transactions*, v.111, p. 895 -936.
- CAMP, T.R.(1953). Studies of Sedimentation Basin Design. *Sewage and Industrial Wastes*, v. 25, n.1, p.1-12, jan.
- CAMPBELL, W.D.; SLATERRY, J.C. (1963). Flow in Entrance of a Tube. *Journal of Basic Engineering*.
- COSTA NETO, J. I. (1996). Sedimentação de partículas discretas em dutos utilizados na decantação de alta taxa considerando escoamento laminar nos trechos de transição e de perfil desenvolvido. São Carlos. 118p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CULP, G.L. & HANSEN, S.D. (1967). Applying Shallow depth Sedimentation Theory. *JAWWA*, v.59, n.9, p.1134-1148, Sept.
- CULP, G.L.; HANSEN, S.D.; RICHARDSON, G.(1968). High-Rate Sedimentation in water treatment works. *Journal AWWA* . v. 60, n.6, p.681-698, Jun.
- CULP, G.L., et al (1969). Tube clarification process, operating experiences in water treatment works. *Journal of the sanitary division ASCE-transactions*. v. 95, p.829-847, oct.
- CUNHA, F.H.R (1989). Estudo do comportamento Hidráulico e da eficiência na Decantação de Alta Taxa. São Carlos. 319p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- DI BERNARDO, L. (1993) *Métodos e Técnicas de Tratamento de água*. v. 1. Rio de Janeiro, ABES. Cap.9, p.355-462: Sedimentação e Flotação.
- DI BERNARDO, L.; SCHULZ, H. E.(1991) Desenvolvimento da zona de transição em dutos usados na decantação de alta taxa, In: 16° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIEMBIENTAL. Goiânia - Go. Brasil, set. 1991.
- DI BERNARDO, L.; SCHULZ, H. E.; ROMA W.N.L. (1991) Características hidráulicas dos sedimentadores laminares, In: 16° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIEMBIENTAL. Goiânia - Go. Brasil, set. 1991
- FADEL, A.A. & BAUMANN, E.R. Tube setler Modelling. *Journal of Enviromental Engineering - ASCE*. vol 116. n.1, p.107-124. Jan/feb.
- FISCHERSTROM, C.N.H. (1955). Sedimentation in Retangular Basins. *JEED - Proceeding ASCE*, v.48, n.4,p.437-448. Apr.
- FOX, R.W. & McDONALD, A. T. (1995). *Introdução à Mecânica dos fluidos*. Trad. Pôr Alexandre Matos de Souza Melo. 5.ed. Rio de Janeiro. Guanabara. Cap8, p.253-275: Escoamento viscoso incompressível, interno.
- GOLDSTEIN, R.J.; KREID, D.K. (1967). Measurement of Laminar Flow Development in a Square Duct Using a Laser-Doppler Flowmeter. *Jornal of applied Mechanics*. p.813-818, Dec.
- HAN, L.S. (1960). Hydrodinamic Entrance Lengths for incompressible laminar flow in rectangular Ducts. *Journal of Applied Mechanics*. p.403-409, sept.
- HANSEN, S.D. & CULP, G. L.(1967). Applying Shallow depth Sedimentation Theory. *JAWWA*, v.59, n.9, p.1134-1148, Sept.
- HANSEN, S.D. ; CULP, G. L.; STUKENBERG, J.R. (1969). Pratical Application of idealized Sedimentation Theory. In: Wastewater treatment. *Journal WPC*, v.41, n.8, p.1421-1444, August.
- HAZEN, A. (1904). On sedimentation *ASCE-transactions*, Paper N. 980.

- LANGHAAR, H.L.(1942). Steady flow in the transition length of a Straight Tube . *JAM-transactions of the ASME*. p.A55-A58, June.
- McGAUMEY, P.H. (1956) Theory of sedimentation. *Journal AWWA*. v.48, n.4, p.437 - 448, Apr.
- ROUSE, H. (1959) *Advanced Mechanics of Fluids* . N.Y. John Wiley & Sons. CapV, p.218-219. JOHN WILEY & SONS. , Chap V : Laminar Motion.
- SCHILLER, L. (1922). Die entwicklung der laminaren geschwindigkeitsverteilung und ihre Bedeutung fur Zahigkeitsmessungen. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*. v.2, p.96-106.
- SIEGEL, R. (1953). The Effect of Heating on Boundary Layer transition for liquid flow in a Tube. Tese de Sc.D.
- SOARES, C.A. (1992) Sedimentação de partículas discretas na zona de transição em dutos de seção quadrada e retangular. São Carlos. 90p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SCHLICHTING (1934). Laminare Kanaleinaufstromung. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*. v.13, p.368.
- SPARROW, E.M.; LIN, S.H.; LUNDGREN, T.S. (1964). Flow Development in the Hydrodynamic Entrance Region of tubes and Ducts. *Journal of Physics fluids*. v.7, n.3, p.338-347, march.
- SPARROW, E.M.; HIXON, C.W.; SHAVIT,G.(1967). Experiments of Laminar flow Development in Retangular Ducts. *Journal of Basic Engineering*. v.89, n.1, p116-124, March
- VAN DIJKE, M (1982). Na Album of fluid Motion. *Department of Mechanical Engineering Stanford University*. California-USA, p.61
- YAO, K.M. (1970) Theoretical study of High-Rate Sedimentation. *Journal Water Pollution Central Federation*. v. 42, n.2, p.218-228, Feb.

YAO, K.M. (1973) Design of High-Rate Settlers . *Journal of Enviromental Engineering Division - ASCE*. v. 99, n.EE5, p.621-637. Oct.

Para os dados apresentados (Figura 1) no C.A. (AAS) há dois pontos de amostragem nos horizontes de solo logo após a construção são apresentados nos tabelas 1 e 2. O ponto de amostragem A, que se encontra a partir do solo até a profundidade de 10 cm, refere-se ao solo imediatamente após a construção e o ponto de amostragem B, que se encontra a profundidade de 20 cm, refere-se ao solo imediatamente após a construção de 15 dias.

Planos de C.A. (AAS)

Os pontos de perfil A e B, quando do perfil A, referem-se ao solo imediatamente após a construção e o ponto de perfil B, refere-se ao solo imediatamente após a construção de 15 dias. Os pontos de perfil A e B, quando do perfil B, referem-se ao solo imediatamente após a construção e o ponto de perfil B, refere-se ao solo imediatamente após a construção de 15 dias.

Tabela 1 - Características das Tarefas

Valor	Características
88,2	h (cm)
100	h (cm)

APÊNDICE

Tabela 2 - Características das Tarefas e dos Recursos

Recursos	Valor A	Valor B
1 (cm)	0,00	0,00
2 (cm)	0,00	0,00
3 (cm)	0,00	0,00
4 (cm)	0,00	0,00
5 (cm)	0,00	0,00
6 (cm)	0,00	0,00
7 (cm)	0,00	0,00
8 (cm)	0,00	0,00
9 (cm)	0,00	0,00
10 (cm)	0,00	0,00
11 (cm)	0,00	0,00
12 (cm)	0,00	0,00
13 (cm)	0,00	0,00
14 (cm)	0,00	0,00
15 (cm)	0,00	0,00
16 (cm)	0,00	0,00
17 (cm)	0,00	0,00
18 (cm)	0,00	0,00
19 (cm)	0,00	0,00
20 (cm)	0,00	0,00
21 (cm)	0,00	0,00
22 (cm)	0,00	0,00
23 (cm)	0,00	0,00
24 (cm)	0,00	0,00
25 (cm)	0,00	0,00
26 (cm)	0,00	0,00
27 (cm)	0,00	0,00
28 (cm)	0,00	0,00
29 (cm)	0,00	0,00
30 (cm)	0,00	0,00
31 (cm)	0,00	0,00
32 (cm)	0,00	0,00
33 (cm)	0,00	0,00
34 (cm)	0,00	0,00
35 (cm)	0,00	0,00
36 (cm)	0,00	0,00
37 (cm)	0,00	0,00
38 (cm)	0,00	0,00
39 (cm)	0,00	0,00
40 (cm)	0,00	0,00
41 (cm)	0,00	0,00
42 (cm)	0,00	0,00
43 (cm)	0,00	0,00
44 (cm)	0,00	0,00
45 (cm)	0,00	0,00
46 (cm)	0,00	0,00
47 (cm)	0,00	0,00
48 (cm)	0,00	0,00
49 (cm)	0,00	0,00
50 (cm)	0,00	0,00
51 (cm)	0,00	0,00
52 (cm)	0,00	0,00
53 (cm)	0,00	0,00
54 (cm)	0,00	0,00
55 (cm)	0,00	0,00
56 (cm)	0,00	0,00
57 (cm)	0,00	0,00
58 (cm)	0,00	0,00
59 (cm)	0,00	0,00
60 (cm)	0,00	0,00
61 (cm)	0,00	0,00
62 (cm)	0,00	0,00
63 (cm)	0,00	0,00
64 (cm)	0,00	0,00
65 (cm)	0,00	0,00
66 (cm)	0,00	0,00
67 (cm)	0,00	0,00
68 (cm)	0,00	0,00
69 (cm)	0,00	0,00
70 (cm)	0,00	0,00
71 (cm)	0,00	0,00
72 (cm)	0,00	0,00
73 (cm)	0,00	0,00
74 (cm)	0,00	0,00
75 (cm)	0,00	0,00
76 (cm)	0,00	0,00
77 (cm)	0,00	0,00
78 (cm)	0,00	0,00
79 (cm)	0,00	0,00
80 (cm)	0,00	0,00
81 (cm)	0,00	0,00
82 (cm)	0,00	0,00
83 (cm)	0,00	0,00
84 (cm)	0,00	0,00
85 (cm)	0,00	0,00
86 (cm)	0,00	0,00
87 (cm)	0,00	0,00
88 (cm)	0,00	0,00
89 (cm)	0,00	0,00
90 (cm)	0,00	0,00
91 (cm)	0,00	0,00
92 (cm)	0,00	0,00
93 (cm)	0,00	0,00
94 (cm)	0,00	0,00
95 (cm)	0,00	0,00
96 (cm)	0,00	0,00
97 (cm)	0,00	0,00
98 (cm)	0,00	0,00
99 (cm)	0,00	0,00
100 (cm)	0,00	0,00

EXEMPLO

Para os dutos padronizados (Figuras 1) da CIA HANSEN, utilizados habitualmente nos decantadores de alta taxa, cujas características são apresentadas nas tabelas 1 e 2, e utilizando a tabela 4, que foi construída a partir do modelo proposto, determine as velocidades de sedimentação e as velocidades de escoamento que poderão ser adotadas para projeto, para os comprimentos de $l_t = 0,6$ m e 1,2 m.

Dutos da Cia Hansen

l_1 : largura do perfil; h_1 : altura do perfil; l_2 : largura do duto formado entre perfis; h_2 altura do duto formado entre perfis; A_1 : área da seção transversal do perfil; A_2 : área da seção transversal do duto formado entre perfis; P_1 : perímetro da seção transversal do perfil; P_2 : perímetro da seção transversal do duto formado entre perfis.

Tabela 1 – Características dos Dutos

Característica	Valor
l_1 (mm)	88,5
h_1 (mm)	48,0
l_2 (mm)	77,5
h_2 (mm)	39,0
e (mm)	1,0
A_1 (cm ²)	41,7
A_2 (cm ²)	30,4
P_1 (cm)	27,3
P_2 (cm)	23,2

Tabela 2 - Dimensões dos dutos e dos módulos

Característica	Perfil A	Perfil B
L_t (mm)	600	1 200
h (mm)	520	1 040
a (mm)	500	500
b (mm)	1 185	1 185
Área total da seção transversal (m ²)	0,52	0,52
Área útil da seção transversal (m ²)	0,50	0,50
Peso do módulo (kg)	18,3	36,6
c (mm)	1 250	1 250
v (mm)	52	52
p (mm)	25	25
q (mm)	30	30
r (mm)	40	40
s (mm)	4	4
t (mm)	60	60
u (mm)	10	10

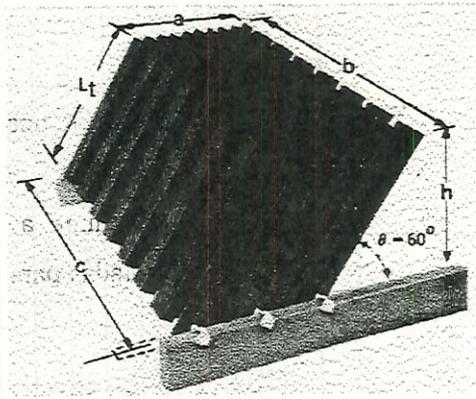
DUTO DE PLÁSTICO (48x88,5 mm)

TABELA 3 – Sedimentação no comprimento de transição

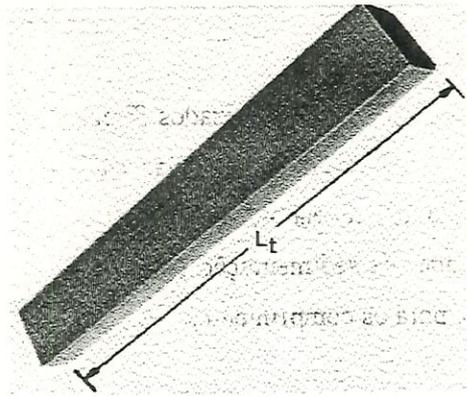
Vs (cm/min)	Velocidade de escoamento (cm/min)									
	10 cm/min		15 cm/min		20cm/min		25 cm/min		30 cm/min	
	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
1.0	0.4405	0.0283	0,6595	0.0286	0,8785	0.0292	1,1010	0.0293	1,3191	0.0293
1.5	0.4405	0.0218	0,6595	0.0223	0,8785	0.0233	1,1010	0.0234	1,3191	0.0236
2.0	0.4405	0.0143	0,6595	0.0155	0,8785	0.0170	1,1010	0.0173	1,3191	0.0175
2.5	0.4163	0.0045	0,6595	0.0053	0,8785	0.0089	1,1010	0.0097	1,3191	0.0101
3.0	0.3291	0.0048	0,5320	0.0048	0,7678	0.0044	0,9844	0.0041	1,1946	0.0042
3.5	0.2654	0.0049	0,4391	0.0045	0,6356	0.0050	0,8219	0.0043	0,9962	0.0049
4.0	0.2176	0.0049	0,3678	0.0045	0,5452	0.0043	0,7034	0.0042	0,8606	0.0042

TABELA 4 – Comprimento total do sedimentador

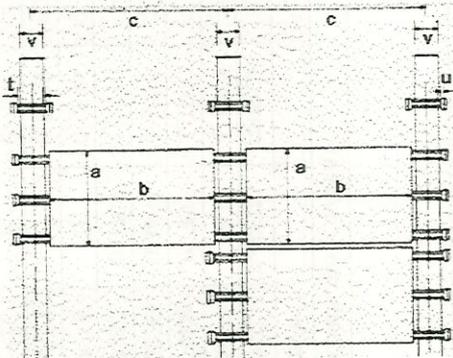
Vs (cm/min)	Velocidade de escoamento (cm/min)														
	10 cm/min			15 cm/min			20cm/min			25 cm/min			30 cm/min		
	transição	total	p.desenv.	transição	total	p.desenv.	transição	total	p.desenv.	transição	total	p.desenv.	transição	total	p.desenv.
1.0	0.4405	1,2149	0,7744	0,6595	1,8602	1,2007	0,8785	2,5397	1,6612	1,1010	3,1945	2,0935	1,3191	3,8548	2,5357
1.5	0.4405	0,9653	0,5248	0,6595	1,2035	0,5440	0,8785	1,6680	0,7895	1,1010	2,1064	1,0054	1,3191	2,5485	1,2294
2.0	0.4405	0,5560	0,1155	0,6595	0,8740	0,2145	0,8785	1,2250	0,3465	1,1010	1,5558	0,4548	1,3191	1,8813	0,5622
2.5	0.4163	0,4163	0	0,6595	0,6772	0,0177	0,8785	0,9582	0,0797	1,1010	1,224	0,1230	1,3191	1,4818	0,1627
3.0	0.3291	0,3291	0	0,5320	0,5320	0	0,7678	0,7678	0	0,9844	0,9844	0	1,1946	1,1946	0
3.5	0.2654	0,2654	0	0,4391	0,4391	0	0,6356	0,6356	0	0,8219	0,8219	0	0,9962	0,9962	0
4.0	0.2176	0,2176	0	0,3678	0,3678	0	0,5452	0,5452	0	0,7034	0,7034	0	0,8606	0,8606	0



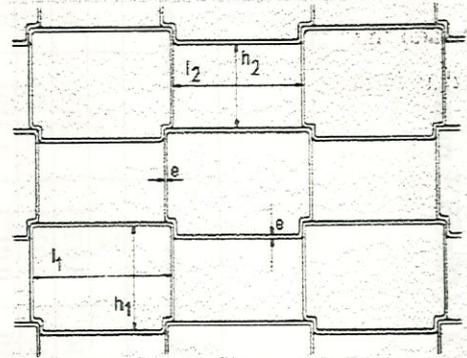
a) módulo



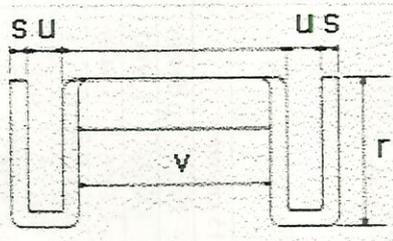
b) perfil de decantação



c) disposição dos módulos, em planta



d) dimensões dos dutos



e) Apoio dos Módulos



FIGURA 1 - Características dos Módulos Tubulares da Cia Hansen.

SOLUÇÃO

PARA $l_t = 0,6$ m

Para Velocidade de escoamento = 10 cm/min

As velocidades de escoamento poderão ser : 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 cm/min

Para Velocidade de escoamento = 15 cm/min

As velocidades de escoamento poderão ser : 3,0; 3,5; 4,0 cm/min

Para Velocidade de escoamento = 20 cm/min

As velocidades de escoamento poderão ser : 4,0 cm/min

PARA $l_t = 1,2$ m

Para Velocidade de escoamento = 10 cm/min

As velocidades de escoamento poderão ser : 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 cm/min

Para Velocidade de escoamento = 15 cm/min

As velocidades de escoamento poderão ser : 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 cm/min

Para Velocidade de escoamento = 20 cm/min

As velocidades de escoamento poderão ser : 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 cm/min

Para Velocidade de escoamento = 25 cm/min

As velocidades de escoamento poderão ser : 3,0; 3,5; 4,0 cm/min

Para Velocidade de escoamento = 30 cm/min

As velocidades de escoamento poderão ser : 3,5; 4,0 cm/min



SOLUCIÓN

PARA $\mu = 0.5 \text{ m}$

Para Velocidad de escape = 10 cm/min
 Las velocidades de escape pedidas son: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 cm/min

Para Velocidad de escape = 15 cm/min
 Las velocidades de escape pedidas son: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0 cm/min

Para Velocidad de escape = 20 cm/min
 Las velocidades de escape pedidas son: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0, 16.0, 17.0, 18.0, 19.0, 20.0 cm/min

PARA $\mu = 1.5 \text{ m}$

Para Velocidad de escape = 10 cm/min
 Las velocidades de escape pedidas son: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 cm/min

Para Velocidad de escape = 15 cm/min
 Las velocidades de escape pedidas son: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0 cm/min

Para Velocidad de escape = 20 cm/min
 Las velocidades de escape pedidas son: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0, 16.0, 17.0, 18.0, 19.0, 20.0 cm/min

Para Velocidad de escape = 25 cm/min
 Las velocidades de escape pedidas son: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0, 16.0, 17.0, 18.0, 19.0, 20.0, 21.0, 22.0, 23.0, 24.0, 25.0 cm/min

Para Velocidad de escape = 30 cm/min
 Las velocidades de escape pedidas son: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0, 16.0, 17.0, 18.0, 19.0, 20.0, 21.0, 22.0, 23.0, 24.0, 25.0, 26.0, 27.0, 28.0, 29.0, 30.0 cm/min